



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

State-of-the-Art (SoTa) analysis των Home Energy Management Systems (HEMS)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος, Π. Μπιμπίκας

Επιβλέπων : Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ

Αθήνα, Οκτώβριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

State-of-the-Art (SoTa) analysis των Home Energy Management Systems (HEMS)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος, Π. Μπιμπίκας

Επιβλέπων : Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Οκτωβρίου 2025.

Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής ΕΜΠ

Ψαρράς Ιωάννης
Καθηγητής ΕΜΠ

Μαρινάκης Ευάγγελος
Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2025

Αθανάσιος Π. Μπιμπίκας
Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος “Τεχνο-οικονομικά
Συστήματα” της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών

Copyright © Αθανάσιος, Π. Μπιμπίκας, 2025.
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

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας Κατοικίας (Home Energy Management Systems – HEMS), τα οποία αποτελούν βασικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης και της ανάπτυξης των έξυπνων δικτύων. Τα HEMS συνδυάζουν τεχνολογίες, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η Μηχανική Μάθηση (ML), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και τα εξειδικευμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας (Zigbee, Z-Wave, Modbus, KNX), με στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη μείωση του κόστους στα σύγχρονα νοικοκυριά.

Η μελέτη αναλύει τις αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις των HEMS, τις τεχνολογίες επικοινωνίας και τη λειτουργική τους ολοκλήρωση με έξυπνες συσκευές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παράλληλα, παρουσιάζονται οι κύριες τεχνικές προκλήσεις που αφορούν τη διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια δεδομένων και την προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά ενεργειακά περιβάλλοντα.

Η εργασία περιλαμβάνει εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και αποτύπωση των σύγχρονων τάσεων και εμπορικών λύσεων HEMS, αναδεικνύοντας καλές πρακτικές και ερευνητικά κενά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σύνδεση των HEMS με την ενεργειακή βιωσιμότητα και τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος, καθώς και στη διερεύνηση της εφαρμογής τους στο ελληνικό ενεργειακό πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του δικτύου και των καταναλωτικών συνηθειών.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αναδεικνύουν τον ρόλο των HEMS ως κρίσιμων υποδομών για την ενεργειακή απόδοση, την αποκέντρωση της παραγωγής και τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο, έξυπνο και συμμετοχικό ενεργειακό οικοσύστημα.

Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας Κατοικίας (HEMS) · Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids) · Δίκτυα Ευφών και Διασυνδεδεμένων Συσκευών (IoT) · Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) · Μηχανική Μάθηση (ML) · Απόκριση στη Ζήτηση (Demand Response) · Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας · Ενεργειακή Αποδοτικότητα · Υπολογιστικό Νέφος και Edge Computing · Έξυπνες Κατοικίες

Abstract

This thesis explores Home Energy Management Systems (HEMS), which represent a cornerstone of the digital and sustainable energy transition. HEMS are designed to optimize household energy consumption by integrating advanced technologies such as Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), the Internet of Things (IoT), and specialized communication protocols including Zigbee, Z-Wave, Modbus, and KNX.

The study provides a comprehensive overview of HEMS architectures, communication frameworks, and smart device integration, emphasizing issues of interoperability, data security, and adaptability in diverse energy environments. Through this analysis, the thesis investigates how HEMS enable real-time energy optimization, support renewable energy integration, and facilitate intelligent load management within smart homes and smart grids.

An extensive literature review identifies key technological trends, commercial implementations, and successful pilot projects across Europe, highlighting both current achievements and persisting research challenges. Special consideration is given to the application of HEMS in the Greek energy context, taking into account the specific characteristics of local energy systems and consumption patterns.

The findings underline the pivotal role of HEMS in achieving higher levels of energy efficiency, sustainability, and user engagement. Ultimately, the research demonstrates that the convergence of AI-driven analytics, IoT connectivity, and distributed energy systems forms the foundation for next-generation smart, flexible, and sustainable residential energy ecosystems.

Keywords

Home Energy Management Systems (HEMS) · Smart Grids · Intelligent and Connected Device Networks (IoT) · Artificial Intelligence (AI) · Machine Learning (ML) · Demand Response (DR) · Renewable Energy Integration · Energy Efficiency · Edge and Cloud Computing · Smart Homes

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, την αγάπη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε κάθε βήμα αυτής της διαδρομής. Η δύναμη, η κατανόηση και η αδιάκοπη ενθάρρυνσή τους υπήρξαν το σταθερό μου στήριγμα.

Αυτή η επιτυχία δεν θα ήταν εφικτή χωρίς εκείνους.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες.....	9
Εισαγωγή.....	15
Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	17
Σκοπός και Στόχοι	18
Μεθοδολογία.....	19
Δομή	20
Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Υπόβαθρο των HEMS.....	21
1.1 Ορισμός και Βασικές Αρχές των HEMS.....	21
1.1.1 Ιστορική Εξέλιξη των HEMS.....	21
1.1.2 Κατηγορίες HEMS	22
1.1.3 Κύρια Συνιστώσα ενός HEMS	23
1.1.4 Πλεονεκτήματα των HEMS	24
1.1.5 Παραδείγματα Χρήσης HEMS.....	26
1.2 Αρχιτεκτονικές και Τεχνολογίες HEMS	28
1.2.1 Δομή και Αρχιτεκτονική των HEMS	28
1.2.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας στα HEMS	29
1.2.3 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα HEMS	36
Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες Τάσεις και Καινοτομίες στα Οικιακά HEMS	39
2.1 Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας στα Σύγχρονα Νοικοκυριά: Αναγκαιότητα, Τεχνολογίες και Οφέλη.....	39
2.1.1 Ανάγκη για Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας στα Σύγχρονα Νοικοκυριά	39
2.1.2 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν την Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας	40
2.1.3 Οφέλη της Έξυπνης Διαχείρισης Ενέργειας μέσω HEMS.....	41
2.2 Διασύνδεση HEMS με Smart Home Συστήματα	42

2.2.1 Η σημασία της διασύνδεσης των HEMS με Smart Home Συστήματα	42
2.2.2 Τεχνολογίες που επιτρέπουν τη διασύνδεση των HEMS με Smart Home Συστήματα.....	43
2.2.3 Οφέλη της Διασύνδεσης HEMS με Smart Home Συστήματα	44
2.3 Ενσωμάτωση και Αυτοματοποιημένη Προσαρμογή στα HEMS.....	45
2.3.1 Ενσωμάτωση IoT Συσκευών και Αισθητήρων	45
2.3.2 Αυτοματοποιημένη Προσαρμογή μέσω AI/IoT στα HEMS	47
2.3.3 Πρότυπα Διαλειτουργικότητας (Interoperability Standards)	50
2.3.4 Κυβερνοασφάλεια και Προστασία Δεδομένων στα HEMS.....	52
2.4 Διασύνδεση HEMS με το Ηλεκτρικό Δίκτυο (Grid Connection)	57
2.4.1 Θεωρητικό Πλαίσιο.....	57
2.4.2 Κρίσιμες Έννοιες.....	58
2.4.3 Σενάρια Εφαρμογής (Ελλάδα – Ευρώπη)	63
2.4.4 Μελλοντικές Τάσεις Διασύνδεσης HEMS–Grid.....	64
2.5 Ενεργειακή Απόδοση και Οικονομική Βιωσιμότητα.....	66
2.5.1 Δυνατότητες Μείωσης Ενεργειακού Κόστους μέσω HEMS	67
2.5.2 Παροχές και Κίνητρα για τους Καταναλωτές	69
Κεφάλαιο 3: Ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης και Προηγμένων Αλγορίθμων στα HEMS	71
3.1 Επισκόπηση της Χρήσης της Τεχνητής Νοημοσύνης στα HEMS.....	71
3.1.1 Πώς η Τεχνητή Νοημοσύνη Αλλάζει τη Διαχείριση Ενέργειας	73
3.1.2 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις της Χρήσης AI στα HEMS	75
3.2 Προηγμένοι Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης στη Διαχείριση Ενέργειας.....	76
3.3 Κατηγορίες Αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης για HEMS	78
3.4 Προγνωστικά Μοντέλα και Αυτόνομη Διαχείριση Φορτίων.....	80
3.4.1 Προγνωστικά Μοντέλα για τη Διαχείριση Ενέργειας στα HEMS.....	81
3.4.2 Αυτόνομη Διαχείριση Φορτίων μέσω AI-driven HEMS	83
3.5 Σύγχρονες Εφαρμογές AI στα HEMS.....	83

3.5.1 Εφαρμογή ΑΙ στην Ανάλυση Ενεργειακής Κατανάλωσης και Πρόβλεψη Ζήτησης	84
3.5.2 Χρήση ΑΙ για την Ανίχνευση Ανωμαλιών και Σφαλμάτων στο Δίκτυο.....	85
3.5.3 Εφαρμογές ΑΙ σε Εμπορικά Συστήματα HEMS	85
3.6 Σύγχρονες Εμπορικές Πλατφόρμες HEMS και Τάσεις Αγοράς	91
3.6.1 Tiko	91
3.6.2 Bosch Smart Home.....	93
3.6.3 Hive (Centrica Hive Active Heating)	95
3.6.4 Sonnen (SonnenBatterie).....	97
3.6.5 SolarEdge	99
Κεφάλαιο 4: HEMS και Έξυπνες Πόλεις / Case Studies	104
4.1 Ευρωπαϊκά Case Studies	106
4.1.1 Άμστερνταμ – HEMS, Smart Grids και Urban Living Labs.....	106
4.1.2 Βαρκελώνη – HEMS, Ανακαινίσεις Κτιρίων και Ενεργειακές Κοινότητες	109
4.1.3 Γερμανία – Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής (VPPs) και HEMS	111
4.2 Η Ελληνική Πραγματικότητα: Ενεργειακές Κοινότητες και Έξυπνα Δίκτυα με HEMS	114
4.2.1 Κρήτη – Η Ενεργειακή Κοινότητα Μινωικής Εμπειρίας (Minoan Energy Community – MEC).....	115
4.2.2 Τήλος – Υβριδικό Μικροδίκτυο, Αποθήκευση και HEMS σε Νησιωτικό Περιβάλλον.....	117
4.2.3 Αστυπάλαια – Smart & Sustainable Island: HEMS, Αποθήκευση και Ηλεκτροκίνηση.....	119
4.2.4 Καρδίτσα – Ενεργειακή Κοινότητα Καρδίτσας (ESEK)	121
4.2.5 Έξυπνοι Μετρητές και HEMS-readiness στην Ελλάδα	123
4.3 Συνολική Τεχνική Αποτίμηση για την Ελλάδα (HEMS–Grid–Κοινότητες–Νησιά)	125
4.3.1 Τεχνική Αρχιτεκτονική που Αναδύεται	125
4.3.2 Τι δείχνουν τα ελληνικά case studies	126
4.3.3 Κύριοι Τεχνικοί Μοχλοί Απόδοσης	127

4.3.4 Κενά και Προκλήσεις (Τεχνικές/Θεσμικές).....	128
4.3.5 Οδικός Χάρτης 2025–2030 (Στοχευμένες Ενέργειες).....	128
4.3.6 Συμπέρασμα	129
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	130
5.1 Συνοπτική Ανακεφαλαίωση	130
5.2 Κύρια Ευρήματα της SoTA Ανάλυσης	131
5.3 Κενά και Προκλήσεις.....	133
5.4 Μελλοντικές Τάσεις	134
5.5 Συνολική Αποτίμηση.....	136
Βιβλιογραφία.....	139

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, η αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και η ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των ενεργειακών πόρων αποτελούν κρίσιμα ζητήματα τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο. Η ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυση ηλεκτρικών συσκευών, η αυξανόμενη χρήση ηλεκτροκίνητων οχημάτων (EVs) και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στις κατοικίες δημιουργούν νέες προκλήσεις στη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η υιοθέτηση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων όπως τα Home Energy Management Systems (HEMS) μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση του κόστους κατανάλωσης και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του ηλεκτρικού δικτύου.

Η δυνατότητα ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων με χαμηλότερο κόστος και βελτιωμένες δυνατότητες επικοινωνίας τα καθιστά πιο προσβάσιμα στους καταναλωτές και οδηγεί στην ευκολότερη και συχνότερη εφαρμογή τους. Αυτή η εξέλιξη ενισχύει την ποιότητα ζωής των χρηστών, επιτρέποντας καλύτερη ενεργειακή διαχείριση και αυτοματοποίηση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό των HEMS είναι η επικοινωνία τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Όταν είναι σχεδιασμένα με βάση διεθνή πρωτόκολλα και πρότυπα επικοινωνίας, επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ενέργειας και δεδομένων μεταξύ του σπιτιού και του δικτύου. Ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να παρακολουθεί τις ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ τα ίδια τα HEMS μπορούν να λαμβάνουν εντολές για προσαρμογή της κατανάλωσης, βοηθώντας έτσι στην καλύτερη εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η χρήση των HEMS δεν περιορίζεται μόνο στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά μπορεί να επεκταθεί σε μικροδίκτυα, όπου το σπίτι λειτουργεί ως ένας αποκεντρωμένος κόμβος ενέργειας. Η παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα και μπαταρίες μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή αυτονομία του χρήστη και να επιτρέψει την απόδοση ενέργειας πίσω στο δίκτυο. Παράλληλα, η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο με τον διαχειριστή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ανοίγει νέες προοπτικές για δυναμική τιμολόγηση, απόκριση στη ζήτηση (Demand Response) και βελτιστοποίηση χρήσης ανανεώσιμων πηγών.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Η ανάπτυξη των HEMS ανοίγει επίσης νέους δρόμους για έρευνα και καινοτομία, καθώς υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης των αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας, των προτύπων επικοινωνίας και των στρατηγικών ένταξης σε έξυπνα δίκτυα. Επιπλέον, η σύνδεση των HEMS με δίκτυα blockchain επιτρέπει την ανάπτυξη αποκεντρωμένων ενεργειακών συναλλαγών, όπου οι καταναλωτές μπορούν να αγοράζουν και να πωλούν ενέργεια μεταξύ τους χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων φορέων.

Η εφαρμογή των HEMS προσφέρει ευκαιρίες για ενεργειακή αυτονομία, μείωση κόστους και ενίσχυση της βιώσιμης κατανάλωσης, ενώ η συνεργασία τους με έξυπνα δίκτυα μπορεί να οδηγήσει σε ένα πιο ευέλικτο, αξιόπιστο και αποδοτικό ενεργειακό σύστημα. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αναλύσει την τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση των HEMS (State-of-the-Art), τις κύριες προκλήσεις εφαρμογής τους και τις πιθανές μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της έξυπνης διαχείρισης ενέργειας.

Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και αξιολόγηση των Home Energy Management Systems (HEMS), με στόχο την κατανόηση της τεχνολογικής τους προόδου, των εμπορικών εφαρμογών και των ερευνητικών εξελίξεων στον τομέα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διαφορετικές αρχιτεκτονικές και μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης σε οικιακά περιβάλλοντα.

Η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα δημιουργούν την ανάγκη για ευφυή διαχείριση της ενέργειας. Τα HEMS έχουν αναδειχθεί ως μια καινοτόμος λύση, η οποία επιτρέπει τη δυναμική παρακολούθηση, τη ρύθμιση και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, αξιοποιώντας τεχνολογίες αιχμής όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και τα έξυπνα δίκτυα (Smart Grids).

Η εργασία αυτή στοχεύει:

Στη διερεύνηση των τεχνολογικών αρχιτεκτονικών των HEMS, αναλύοντας τις διαφορές μεταξύ κεντριοποιημένων και αποκεντρωμένων προσεγγίσεων. Στην αξιολόγηση των εμπορικών και ακαδημαϊκών εφαρμογών, συγκρίνοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε προσέγγισης. Στην ανάλυση των τεχνολογιών επικοινωνίας και ελέγχου, όπως τα πρωτόκολλα Zigbee, Z-Wave, Modbus και KNX. Στην αξιολόγηση των ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων της υιοθέτησης των HEMS σε νοικοκυριά και μικροδίκτυα. Στην ανάδειξη των ρυθμιστικών πλαισίων και πολιτικών που προωθούν την υιοθέτηση των HEMS διεθνώς.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις δυνατότητες ενσωμάτωσης των HEMS σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα, επιτρέποντας τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ καταναλωτών και παρόχων ενέργειας. Η εργασία θα εξετάσει επίσης τις προοπτικές ανάπτυξης νέων τεχνολογιών στον τομέα, όπως η αυτονομία μέσω αποκεντρωμένων ενεργειακών συναλλαγών και η εφαρμογή blockchain στην ενεργειακή διαχείριση.

Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και την ανάλυση σύγχρονων λύσεων, η εργασία στοχεύει στην παροχή μιας ολοκληρωμένης εικόνας της υπάρχουσας κατάστασης των HEMS, αναδεικνύοντας τις βέλτιστες πρακτικές και τις πιθανές κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της οικιακής ενεργειακής διαχείρισης.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και αξιολόγηση των Home Energy Management Systems (HEMS), με στόχο την κατανόηση της τεχνολογικής τους προόδου, των εμπορικών εφαρμογών και των ερευνητικών εξελίξεων στον τομέα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διαφορετικές αρχιτεκτονικές και μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης σε οικιακά περιβάλλοντα.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, εξετάζονται:

- Οι βασικές τεχνολογίες και τα πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στα HEMS.
- Οι τρόποι με τους οποίους τα HEMS βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα και συμβάλλουν στη μείωση του κόστους κατανάλωσης.
- Η σύγκριση μεταξύ εμπορικών λύσεων και ερευνητικών προσεγγίσεων, προκειμένου να αναδειχθούν οι βέλτιστες πρακτικές.
- Οι μελλοντικές τάσεις και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα HEMS, με έμφαση στην ενσωμάτωσή τους σε έξυπνα δίκτυα και μικροδίκτυα.

Η εργασία επιχειρεί να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της παρούσας κατάστασης των HEMS, εντοπίζοντας τις τεχνολογικές καινοτομίες και τις πιθανές ερευνητικές κατευθύνσεις που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης σε οικιακά περιβάλλοντα.

Σκοπός και Στόχοι

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να αναλύσει και να αξιολογήσει τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ενέργειας κατοικιών (HEMS) και να διερευνήσει τις προκλήσεις και τις προοπτικές της ενσωμάτωσής τους σε ευφυή ενεργειακά δίκτυα. Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία στοχεύει να απαντήσει στα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

- Τι είναι τα Home Energy Management Systems (HEMS) και πώς λειτουργούν;
- Ποιες είναι οι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της ενέργειας σε οικιακά περιβάλλοντα;

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Πώς επηρεάζουν τα HEMS την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη μείωση του κόστους; Πώς μπορούν τα HEMS να ενσωματωθούν σε έξυπνα δίκτυα και μικροδίκτυα;
- Ποιες είναι οι κύριες προκλήσεις και τα ερευνητικά κενά στον τομέα των HEMS;
- Ποιες είναι οι εμπορικές και ακαδημαϊκές εφαρμογές των HEMS, και πώς συγκρίνονται;
- Πώς μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση των HEMS μέσω τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η ανάλυση δεδομένων;

Η εργασία επιχειρεί να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της παρούσας κατάστασης των HEMS, εντοπίζοντας τις τεχνολογικές καινοτομίες και τις πιθανές ερευνητικές κατευθύνσεις που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης σε οικιακά περιβάλλοντα.

Μεθοδολογία

Η ανάπτυξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζεται σε βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση υπαρχουσών επιστημονικών μελετών, ερευνητικών άρθρων και εμπορικών εφαρμογών που αφορούν τα Home Energy Management Systems (HEMS). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω διαδικτυακών επιστημονικών βάσεων δεδομένων και ακαδημαϊκών πηγών.

Παράλληλα, αναλύονται τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε υφιστάμενα HEMS, όπως τα συστήματα ελέγχου φορτίου, οι αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας, καθώς και τα επικοινωνιακά πρωτόκολλα που επιτρέπουν τη διασύνδεση με έξυπνα δίκτυα. Εξετάζονται εμπορικές εφαρμογές και ακαδημαϊκές μελέτες για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των HEMS στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Η ανάλυση περιλαμβάνει:

- Μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και σύγκριση τεχνολογιών HEMS.
- Επισκόπηση εμπορικών λύσεων και αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Ανάλυση της ενσωμάτωσης των HEMS σε έξυπνα δίκτυα και μικροδίκτυα.
- Καταγραφή των ερευνητικών προκλήσεων και των πιθανών βελτιώσεων στον τομέα.

Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας της παρούσας κατάστασης των HEMS, εντοπίζοντας τις βέλτιστες πρακτικές και τις δυνατότητες εξέλιξής τους στον τομέα της ενεργειακής διαχείρισης κατοικιών.

Δομή

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες σχετικά με τα Home Energy Management Systems (HEMS), η σημασία τους στην ενεργειακή διαχείριση, καθώς και οι τεχνολογίες που τα καθιστούν αποτελεσματικά.

Επίσης, γίνεται αναφορά στη συμβολή τους στη διασύνδεση των κατοικιών με τα έξυπνα δίκτυα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται σε βάθος οι τεχνολογικές αρχιτεκτονικές και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας των HEMS, όπως Zigbee, Z-Wave, Modbus και KNX, και ο ρόλος τους στη διαχείριση της οικιακής ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εμπορικές εφαρμογές και οι ακαδημαϊκές προσεγγίσεις των HEMS, συγκρίνοντας τις δυνατότητές τους και τις προοπτικές εξέλιξής τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται οι προκλήσεις υιοθέτησης των HEMS, όπως η κυβερνοασφάλεια, η διαλειτουργικότητα και το ρυθμιστικό πλαίσιο, καθώς και οι επιπτώσεις στην αγορά ενέργειας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των μελλοντικών τάσεων στα HEMS, όπως η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης, η χρήση αποκεντρωμένων ενεργειακών συναλλαγών και η αλληλεπίδραση με ηλεκτρικά οχήματα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των βασικών ευρημάτων, καθώς και με προτάσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις στον τομέα των HEMS.

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Υπόβαθρο των HEMS

1.1 Ορισμός και Βασικές Αρχές των HEMS

1.1.1 Ιστορική Εξέλιξη των HEMS

Η ιστορική πορεία των Home Energy Management Systems (HEMS) ακολουθεί την εξέλιξη της ενεργειακής τεχνολογίας και των κοινωνικών αναγκών:

1970s – Ενεργειακή κρίση: Γεννιέται η ανάγκη για αποδοτικότερη χρήση ενέργειας και εμφανίζονται οι πρώτες ιδέες παρακολούθησης κατανάλωσης (Arthur D. Little, 2023).

1990s – Έξυπνοι μετρητές: Οι καταναλωτές αποκτούν real-time δεδομένα κατανάλωσης· θεμέλια για τα πρώτα HEMS, παρότι χωρίς αυτοματοποίηση (OSTI.GOV, 2018).

2000s – IoT και επικοινωνία: Η διάδοση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) επιτρέπει απομακρυσμένο έλεγχο μέσω Zigbee, KNX κ.ά., μετατρέποντας τα HEMS σε δυναμικά εργαλεία (B. Mahapatra & Nayyar, 2022).

2010s – AI και Smart Grids: Ενσωματώνονται αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, με δυνατότητες πρόβλεψης φορτίου και συμμετοχής σε Demand Response, ενισχύοντας τη διασύνδεση κατοικίας–δικτύου (Takahashi κ.ά., 2019)

Σήμερα – Ολοκληρωμένα οικοσυστήματα: Τα HEMS ενσωματώνουν ΑΠΕ, αποθήκευση και ηλεκτροκίνηση (V2G), ενώ εξελίσσονται σε ψηφιακούς κόμβους ενεργειακής δημοκρατίας, με προοπτική blockchain trading και προηγμένη αποθήκευση (gridX, 2023a).

Από τις πρώτες εφαρμογές παρακολούθησης μέχρι τα σημερινά AI-driven συστήματα, τα HEMS έχουν εξελιχθεί σε θεμέλιο λίθο της ενεργειακής μετάβασης, συνδυάζοντας τεχνολογία, αποδοτικότητα και συμμετοχή πολιτών.

1.1.2 Κατηγορίες HEMS

Αυτόνομα HEMS

Αυτά τα συστήματα λειτουργούν χωρίς σύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, βασιζόμενα αποκλειστικά σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες, καθώς και σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες λιθίου. Τα αυτόνομα HEMS χρησιμοποιούνται συνήθως σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές όπου η πρόσβαση στο δίκτυο είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη (B. K. Mahapatra & Nayyar, 2022).

Επιπλέον, τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης της αποθήκευσης ενέργειας, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή αυτονομία των κατοικιών. Χρησιμοποιούν έξυπνα λογισμικά πρόβλεψης και διαχείρισης, τα οποία λαμβάνουν υπόψη δεδομένα καιρικών συνθηκών και μοτίβα κατανάλωσης ενέργειας, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα των αποθηκευτικών συστημάτων.

Διασυνδεδεμένα HEMS

Αυτά τα συστήματα είναι ενσωματωμένα στο ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο και επιτρέπουν τη δυναμική προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου. Μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας με το δίκτυο, τα διασυνδεδεμένα HEMS μπορούν να εφαρμόζουν στρατηγικές Demand Response (DR), μειώνοντας τη ζήτηση σε περιόδους αιχμής και αξιοποιώντας οικονομικά οφέλη μέσω προγραμμάτων δυναμικής τιμολόγησης (B. K. Mahapatra & Nayyar, 2022).

Επιπλέον, αυτά τα συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να διοχετεύουν περίσσεια ενέργειας πίσω στο δίκτυο μέσω τεχνολογιών όπως το Vehicle-to-Grid (V2G). Τα σύγχρονα διασυνδεδεμένα HEMS αξιοποιούν αναλύσεις δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αυτοματοποιημένους μηχανισμούς ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Επίσης, μπορούν να συνδυάζονται με τεχνολογίες blockchain, επιτρέποντας αποκεντρωμένες συναλλαγές ενέργειας μεταξύ καταναλωτών και προμηθευτών.

Υβριδικά HEMS

Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν στοιχεία των αυτόνομων και διασυνδεδεμένων HEMS, επιτρέποντας στους χρήστες να λειτουργούν αυτόνομα, ενώ παράλληλα διατηρούν τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με το ηλεκτρικό δίκτυο όταν χρειάζεται.

Αυτό επιτρέπει στους καταναλωτές να χρησιμοποιούν αποθηκευμένη ενέργεια σε περιόδους υψηλών τιμών και να συνδέονται στο δίκτυο όταν η ενέργεια είναι πιο φθηνή ή η αποθηκευμένη ενέργεια εξαντληθεί. Τα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες προηγμένης αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες υψηλής απόδοσης και έξυπνους ελεγκτές, για να μεγιστοποιήσουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών.

Αυτή η υβριδική προσέγγιση μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα των HEMS, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές σε έξυπνες πόλεις, σύγχρονα ενεργειακά αποδοτικά κτίρια και βιομηχανικές εφαρμογές. Επίσης, επιτρέπουν την ευελιξία στη διαχείριση της ενέργειας μέσω τεχνητής νοημοσύνης, η οποία αναλύει τα δεδομένα κατανάλωσης και προτείνει δυναμικές προσαρμογές για τη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων (B. K. Mahapatra & Nayyar, 2022).

1.1.3 Κύρια Συνιστώσα ενός HEMS

Τα Home Energy Management Systems (HEMS) αποτελούνται από βασικές τεχνολογικές συνιστώσες που συνεργάζονται για την καλύτερη παρακολούθηση και διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας σε μια κατοικία.

Αισθητήρες και Έξυπνοι Μετρητές

Καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχουν δεδομένα σχετικά με τη χρήση συσκευών. Οι έξυπνοι μετρητές διευκολύνουν την επικοινωνία με το δίκτυο και αποτελούν τη βάση για πιο συνειδητή διαχείριση ενέργειας.

Συσκευές Ελέγχου Ενέργειας

Πρόκειται για τις μονάδες που επεξεργάζονται τα δεδομένα και ρυθμίζουν αυτόματα τη λειτουργία των συσκευών. Έτσι, επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας, μετατόπιση φορτίων σε ώρες χαμηλού κόστους και μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε συνδυασμό με ΑΠΕ.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Συνδεσιμότητα και Δικτύωση

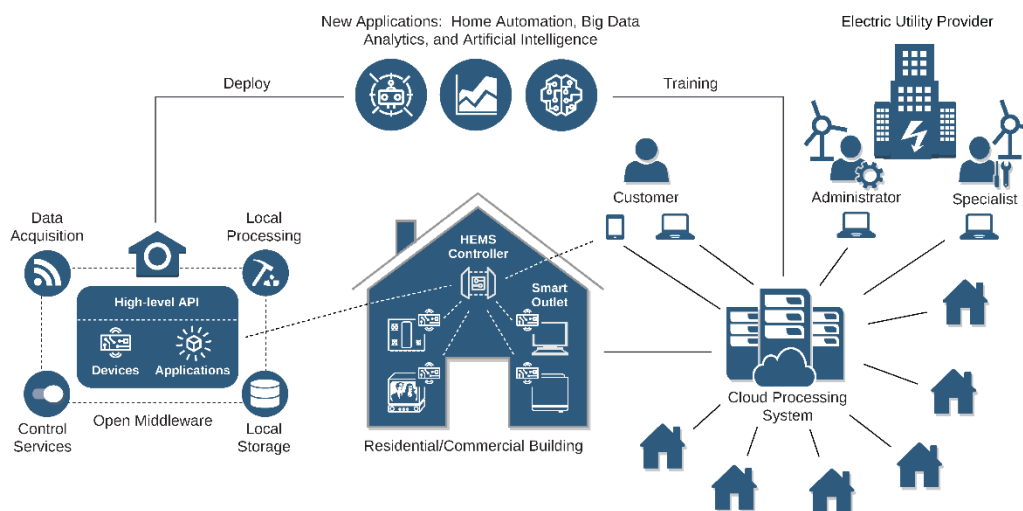
Τα HEMS βασίζονται σε τεχνολογίες όπως Wi-Fi, Zigbee ή Z-Wave για την επικοινωνία των συσκευών, ενώ συχνά υποστηρίζονται από πλατφόρμες cloud για την ανάλυση δεδομένων.

Διεπαφές Χρήστη

Οι εφαρμογές για κινητά ή web δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης κατανάλωσης, δημιουργίας προγραμμάτων χρήσης και απομακρυσμένου ελέγχου. Παράλληλα, παρέχουν αναφορές και ειδοποιήσεις για ενεργοβόρες συσκευές.

Συνολική Λειτουργία

Η συνεργασία όλων αυτών των στοιχείων οδηγεί σε μείωση κόστους, εξοικονόμηση ενέργειας και καλύτερη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών. Τα πιο σύγχρονα HEMS επεκτείνονται σταδιακά με δυνατότητες τεχνητής νοημοσύνης, βελτιωμένη αποθήκευση και νέες μορφές διαχείρισης, αποτελώντας κεντρικό στοιχείο για τα μελλοντικά «έξυπνα σπίτια».



Εικόνα 1: Ενδεικτική αρχιτεκτονική Home Energy Management System (HEMS)

1.1.4 Πλεονεκτήματα των HEMS

Τα Home Energy Management Systems (HEMS) αποτελούν κεντρικό στοιχείο της ενεργειακής μετάβασης, καθώς ενισχύουν την αποδοτικότητα, μειώνουν το κόστος και προωθούν πιο βιώσιμες πρακτικές κατανάλωσης.

Ενεργειακή αποδοτικότητα

Μέσω δυναμικής διαχείρισης φορτίου, τα HEMS μειώνουν σπατάλες και βελτιστοποιούν τη χρήση ενέργειας. Έξυπνοι αλγόριθμοι επιτρέπουν την αναγνώριση ενεργοβόρων συσκευών, την αποθήκευση ενέργειας για χρήση σε ώρες αιχμής, αλλά και τον προγραμματισμό συσκευών με βάση δεδομένα κατανάλωσης και καιρού (U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2018).

Οικονομικά οφέλη

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με την έξυπνη διαχείριση τιμολογίων οδηγεί σε άμεση μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η συμμετοχή σε προγράμματα δυναμικής τιμολόγησης και Demand Response δημιουργεί πρόσθετες ευκαιρίες εξοικονόμησης, ενώ τεχνολογίες όπως το Vehicle-to-Grid (V2G) προσφέρουν δυνατότητα πώλησης πλεονάζουσας ενέργειας (B. K. Mahapatra & Nayyar, 2022; Takahashi κ.ά., 2019)

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα HEMS συμβάλλουν στη μείωση εκπομπών CO₂ και ενισχύουν τη διείσδυση ΑΠΕ, μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα, προωθούν την ιδέα των «πράσινων κατοικιών» και την ενσωμάτωση σε μοντέλα κυκλικής οικονομίας, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται, ανταλλάσσεται ή καταναλώνεται τοπικά.

Σταθερότητα και ανθεκτικότητα δικτύου

Μέσω της απόκρισης ζήτησης, τα HEMS εξισορροπούν φορτία και αυξάνουν τη σταθερότητα του συστήματος, αποτρέποντας υπερφορτώσεις. Η αποκέντρωση και η συμμετοχή σε μικροδίκτυα ενισχύει την ευελιξία και προστατεύει τους καταναλωτές από διακυμάνσεις κόστους (gridX, 2023b).

Μελλοντική εξέλιξη

Η πρόοδος της τεχνητής νοημοσύνης και του blockchain καθιστά τα HEMS ακόμα πιο αυτόνομα, με δυνατότητες peer-to-peer συναλλαγών, ολοκληρωμένης διαχείρισης αποθήκευσης και ενσωμάτωσης με ηλεκτρικά οχήματα. Η τάση είναι προς πλήρως

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

αυτοματοποιημένα και συνεργατικά συστήματα που ενισχύουν την ενεργειακή δημοκρατία (gridX, 2023a; B. Mahapatra & Nayyar, 2022).

Συνολικά, τα HEMS δεν αποτελούν απλώς εργαλεία οικιακής εξοικονόμησης, αλλά κρίσιμους κόμβους για τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος σε μακροκλίμακα. (B. Mahapatra & Nayyar, 2022)

1.1.5 Παραδείγματα Χρήσης HEMS

Η εφαρμογή των Home Energy Management Systems (HEMS) εξαπλώνεται διεθνώς, με κάθε περιοχή να τα αξιοποιεί ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες και τις ενεργειακές της προκλήσεις

Ιαπωνία – Πιλοτικά Προγράμματα και Έξυπνα Δίκτυα

Μετά το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα, η Ιαπωνία ενσωμάτωσε HEMS σε πιλοτικά έργα που συνδέουν κατοικίες με smart grids. Οι χρήστες διαχειρίζονται αποδοτικότερα την ενέργεια από ΑΠΕ και αποθήκευση, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο (International Energy Agency (IEA), 2021).

Ευρωπαϊκή Ένωση – Smart Cities και Ενεργειακές Κοινότητες

Σε πόλεις όπως το Άμστερνταμ και η Βαρκελώνη, τα HEMS συνδυάζονται με μικροδίκτυα, φωτοβολταϊκά και αποθήκευση, επιτρέποντας peer-to-peer συναλλαγές. Πρωτοβουλίες του Horizon 2020 και του Green Deal ενισχύουν την ενσωμάτωσή τους σε ενεργειακές κοινότητες (European Commission, 2020b).

Ηνωμένες Πολιτείες – HEMS και Ηλεκτρικά Οχήματα

Στις ΗΠΑ, έμφαση δίνεται στη διασύνδεση HEMS με EVs και V2G τεχνολογίες. Λύσεις από Tesla και Schneider Electric επιτρέπουν τη χρήση μπαταριών οχημάτων ως αποθήκες ενέργειας, ενώ πολιτείες όπως η Καλιφόρνια προωθούν κίνητρα για την υιοθέτηση (Schneider Electric, 2023).

Αυστραλία – Αποθήκευση Ηλιακής Ενέργειας

Με το υψηλό ηλιακό δυναμικό, η Αυστραλία αναπτύσσει HEMS συνδεδεμένα με φωτοβολταϊκά και VPPs. Η χρήση AI επιτρέπει βέλτιστη φόρτιση συσκευών και αποθήκευση

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

ενέργειας, ενισχύοντας τη συμμετοχή των καταναλωτών στην αγορά (Clean Energy Council, 2022).

Νότια Κορέα – AI-driven Smart Homes

Μεγάλα οικιστικά συγκροτήματα αξιοποιούν HEMS με real-time παρακολούθηση και AI ανάλυση κατανάλωσης. Σε πόλεις όπως η Σεούλ, τα HEMS διασυνδέονται με το δίκτυο, υποστηρίζοντας ενεργειακά αυτόνομα κτίρια (Kim & Park, 2021).

Καναδάς – Ανθεκτικότητα σε Ακραία Καιρικά Φαινόμενα

Σε περιοχές με σκληρό κλίμα, τα HEMS χρησιμοποιούνται για δυναμική διαχείριση θέρμανσης και αποθήκευσης. Πιλοτικά έργα όπως το Smart Grid Atlantic ενισχύουν την ανθεκτικότητα του συστήματος απέναντι σε ακραίες συνθήκες (Smart Grid Innovation Network Canada, 2022).

Συμπέρασμα

Η διεθνής εμπειρία αποδεικνύει ότι τα HEMS είναι πολύ περισσότερα από «έξυπνοι θερμοστάτες»: αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για την ενεργειακή δημοκρατία, τη βιωσιμότητα και την προσαρμογή των δικτύων στις σύγχρονες ανάγκες.

1.2 Αρχιτεκτονικές και Τεχνολογίες HEMS

Η ανάπτυξη των Home Energy Management Systems (HEMS) βασίζεται σε συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές και τεχνολογικές προσεγγίσεις που καθορίζουν τη λειτουργικότητα, την αποδοτικότητα και την ικανότητα ενσωμάτωσής τους με έξυπνα δίκτυα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εξέλιξη των HEMS περιλαμβάνει την προσαρμογή σε σύγχρονα μοντέλα ενεργειακής διαχείρισης, επικοινωνίας και αποθήκευσης, καθιστώντας τα απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

1.2.1 Δομή και Αρχιτεκτονική των HEMS

Η αρχιτεκτονική των Home Energy Management Systems (HEMS) οργανώνεται σε επίπεδα λειτουργικότητας που διασφαλίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ οικιακών συσκευών, αποθήκευσης και ηλεκτρικού δικτύου. Στη βιβλιογραφία διακρίνονται τρεις κύριες προσεγγίσεις:

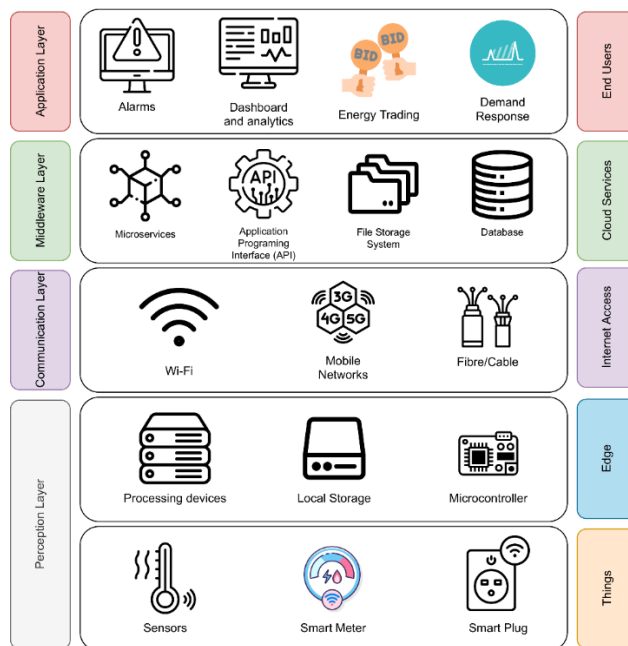
Κεντροποιημένη αρχιτεκτονική: Τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται σε κεντρικό διακομιστή (τοπικό ή cloud), προσφέροντας πλήρη εικόνα και δυνατότητες απομακρυσμένου ελέγχου και αυτοματισμού.

Κατανεμημένη αρχιτεκτονική: Η επεξεργασία γίνεται σε τοπικό επίπεδο (edge computing), μειώνοντας την εξάρτηση από το cloud και επιτρέποντας ταχύτερη λήψη αποφάσεων.

Υβριδική προσέγγιση: Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο μοντέλων, με ισορροπία ανάμεσα στην τοπική αυτονομία και την απομακρυσμένη ανάλυση δεδομένων (Khabbush κ.ά., 2020).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 2: Δομή και αρχιτεκτονική ενός HEMS με διαστρωματική προσέγγιση (αισθητήρες, δίκτυα, πλατφόρμες cloud, εφαρμογές)

1.2.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας στα HEMS

Η επικοινωνία αποτελεί το θεμέλιο των HEMS: χωρίς αξιόπιστη και αποδοτική δικτύωση, η αισθητήρια συλλογή, ο έλεγχος φορτίων και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μένουν θεωρία. Η επιλογή πρωτοκόλλου δεν είναι ομοιόμορφη· εξαρτάται από εμβέλεια, κατανάλωση ισχύος, ρυθμό δεδομένων, latency, ασφάλεια, διαλειτουργικότητα και κόστος εγκατάστασης.

Με βάση αυτά τα κριτήρια, τα πρωτόκολλα ομαδοποιούνται σε:

- Χαμηλής ισχύος ασύρματα για οικιακό αυτοματισμό (Zigbee, Z-Wave)
- Ενσύρματα/κτιριακά bus για αξιόπιστο έλεγχο (Modbus, KNX)
- IP/LPWAN για ευρύτερη συνδεσιμότητα και cloud/edge ολοκλήρωση (Wi-Fi, LoRaWAN). Ακολουθεί συνοπτική αποτίμηση, με έμφαση σε πλεονεκτήματα, περιορισμούς και ενδεικτικές χρήσεις στα HEMS.

Στη συνέχεια, αναλύουμε κάθε πρωτόκολλο ως προς αρχιτεκτονική, ισχυρά σημεία/περιορισμούς και ενδεικτικές εφαρμογές στα HEMS

Χαμηλής ισχύος ασύρματα πρωτόκολλα (οικιακός αυτοματισμός)

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Zigbee

Ασύρματο πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης, σε 2.4 GHz, με mesh τοπολογία και πολύ μεγάλη επεκτασιμότητα κόμβων. Κατάλληλο για αισθητήρες/ενεργοποιητές με μπαταρία και πυκνά δίκτυα IoT.

Ισχυρά σημεία: πολύ χαμηλή κατανάλωση, mesh ανθεκτικότητα, διαλειτουργικότητα/ανοιχτό οικοσύστημα, μεγάλος αριθμός συσκευών.

Περιορισμοί: εμβέλεια ανά κόμβο μικρή, συνύπαρξη με Wi-Fi στη 2.4 GHz (πιθανές παρεμβολές), ανάγκη hub/bridge προς IP.

Τυπικές χρήσεις HEMS: θερμοστάτες, έξυπνες πρίζες/φώτα, μέτρηση και έλεγχος φορτίων. (Aghenta & Iqbal, 2019).

Στον Πίνακα 1 βλέπουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 1

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
Συχνότητα λειτουργίας	2.4 GHz (παγκόσμια)
Εύρος ζώνης	250 kbps
Τοπολογία Δικτύου	Mesh, Star, Tree
Εμβέλεια	10-100 μέτρα (ανάλογα με τις παρεμβολές)
Κατανάλωση Ενέργειας	Πολύ χαμηλή – σχεδιασμένο για συσκευές με μπαταρία
Μέγιστος αριθμός κόμβων	65.000 συσκευές σε ένα δίκτυο
Κρυπτογράφηση	AES-128 για ασφάλεια επικοινωνίας
Καθυστέρηση Επικοινωνίας (latency)	30-100ms

Z-Wave

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Ιδιόκτητο πρωτόκολλο χαμηλής ισχύος (Silicon Labs), σε υπο-GHz (π.χ. 868 MHz EE), με mesh και έμφαση στην αξιοπιστία.

Ισχυρά σημεία: λιγότερες παρεμβολές από Wi-Fi (υπο-GHz), αξιόπιστο mesh, ενιαία πιστοποίηση/συμβατότητα, AES-128.

Περιορισμοί: έως ~232 συσκευές/δίκτυο, κλειστό οικοσύστημα, υψηλότερο κόστος, hub απαραίτητο.

Τυπικές χρήσεις HEMS: μετρητές, διακόπτες/ρελέ, θέρμανση/ασφάλεια. (GeeksforGeeks, 2022; Z-Wave Alliance, 2024; Z-Wave.Me, 2024).

Στον Πίνακα 2 βλέπουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του Z-Wave

Πίνακας 2

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
Συχνότητα λειτουργίας	868 MHz (Ευρώπη), 908 MHz (ΗΠΑ)
Εύρος ζώνης	100 kbps
Τοπολογία Δικτύου	Mesh
Εμβέλεια	30-150 μέτρα
Κατανάλωση Ενέργειας	Πολύ χαμηλή
Μέγιστος αριθμός συσκευών	232 συσκευές
Κρυπτογράφηση	AES-128
Καθυστέρηση Επικοινωνίας (latency)	<100ms
Πάροχος Τεχνολογίας	Silicon Labs

Ενσύρματα/κτιριακά bus (βιομηχανικά & οικιακά)

Modbus (RTU / TCP)

Ανοικτό, απλό, ευρέως υιοθετημένο. RTU για σειριακά (RS-485), TCP πάνω από Ethernet/IP.

Ισχυρά σημεία: απλότητα, διαθεσιμότητα σε μετρητές/μετατροπείς/PLC, ευκολία ενσωμάτωσης.

Περιορισμοί: χαμηλές ταχύτητες (ειδικά RTU), έλλειψη εγγενών μηχανισμών ασφάλειας/ταυτοποίησης.

Τυπικές χρήσεις HEMS: ανάγνωση μετρητών, υποσταθμών, inverters, BMS διασύνδεση. (Davis & Lee, 2016; Doe & Smith, 2020; Wilson & Martinez, 2020).

KNX

Διεθνές πρότυπο κτιριακού αυτοματισμού (ISO/IEC 14543-3), με bus (twisted-pair), IP, RF.

Ισχυρά σημεία: αξιοπιστία μέσω αφιερωμένου bus, διαλειτουργικότητα πολλών κατασκευαστών, μεγάλη γκάμα συσκευών (HVAC/φωτισμός/σκίαση).

Περιορισμοί: απαιτεί εξειδικευμένο σχεδιασμό/προγραμματισμό (ETS), υψηλότερο αρχικό κόστος.

Τυπικές χρήσεις HEMS: ολοκληρωμένος κτιριακός έλεγχος, σύνδεση με HEMS gateway. (BAS-IP, 2023; KNX Association, 2023; Lapshin, 2023).

IP τεχνολογίες ευρείας διάθεσης

Wi-Fi (802.11 a/b/g/n/ac/ax, 6E/7)

Υψηλές ταχύτητες, ευρεία διαθεσιμότητα, απευθείας σύνδεση σε cloud.

Ισχυρά σημεία: throughput/ώριμο οικοσύστημα, απλή υλοποίηση εφαρμογών/OTA.

Περιορισμοί: υψηλότερη κατανάλωση, συμφόρηση 2.4 GHz, απαιτεί καλή κάλυψη AP.

Τυπικές χρήσεις HEMS: κεντρικοί ελεγκτές/πύλες, συσκευές υψηλών δεδομένων, απευθείας cloud (Kuenzi κ.ά., 2020; López-Pérez κ.ά., 2019).

Το Wi-Fi λειτουργεί σε τρεις βασικές ζώνες συχνοτήτων οι οποίες φαίνονται στο Πίνακα 3:

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Πίνακας 3

Συχνότητα	Χαρακτηριστικά	Χρήση
2.4 GHz	Μεγάλη εμβέλεια, χαμηλότερες ταχύτητες, μεγαλύτερη συμφόρηση	Οικιακά δίκτυα, IoT
5 GHz	Υψηλότερες ταχύτητες, μικρότερη εμβέλεια, λιγότερες παρεμβολές	Streaming, gaming, επαγγελματικά δίκτυα
6 GHz (Wi-Fi 6E)	Πολύ υψηλές ταχύτητες, χαμηλή συμφόρηση	Μελλοντικά δίκτυα, AR/VR, βιομηχανικές εφαρμογές

Η ζώνη των 6 GHz προστέθηκε πρόσφατα με το Wi-Fi 6E, προσφέροντας λιγότερες παρεμβολές και μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων

Η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων έχει αυξηθεί δραστικά με τις νέες εκδόσεις του προτύπου 802.11 και αποτυπώνεται στο Πίνακα 4.

Πίνακας 4

Πρότυπο	Χρονιά	Θεωρητική Ταχύτητα
802.11b	1999	11 Mbps
802.11g	2003	54 Mbps
802.11n (Wi-Fi 4)	2009	600 Mbps
802.11ac (Wi-Fi 5)	2013	3.5 Gbps
802.11ax (Wi-Fi 6)	2019	9.6 Gbps
802.11be (Wi-Fi 7)	Αναμένεται	46 Gbps

Το Wi-Fi 6 και το Wi-Fi 7 χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές πολυπλεξίας (OFDMA, MU-MIMO) για να αυξήσουν την απόδοση, ειδικά σε περιβάλλοντα με πολλές συσκευές (Kuenzi κ.ά., 2020; López-Pérez κ.ά., 2019).

LoRaWAN

LPWAN για μεγάλες αποστάσεις/πολύ χαμηλή κατανάλωση, σε μη αδειοδοτούμενες μπάντες (π.χ. 868 MHz).

Ισχυρά σημεία: έτη αυτονομίας μπαταρίας, χιλιόμετρα εμβέλεια, μεγάλης κλίμακας IoT. Περιορισμοί: πολύ χαμηλοί ρυθμοί (0.3–50 kbps), latency, χρήση ISM (πιθανή συμφόρηση). Τυπικές χρήσεις HEMS/πόλης: τηλεμετρία μετρητών/περιβάλλοντος, απομακρυσμένα assets, community-scale εφαρμογές. Τάσεις: LoRaWAN 2.0, AI για ανίχνευση ανωμαλιών,

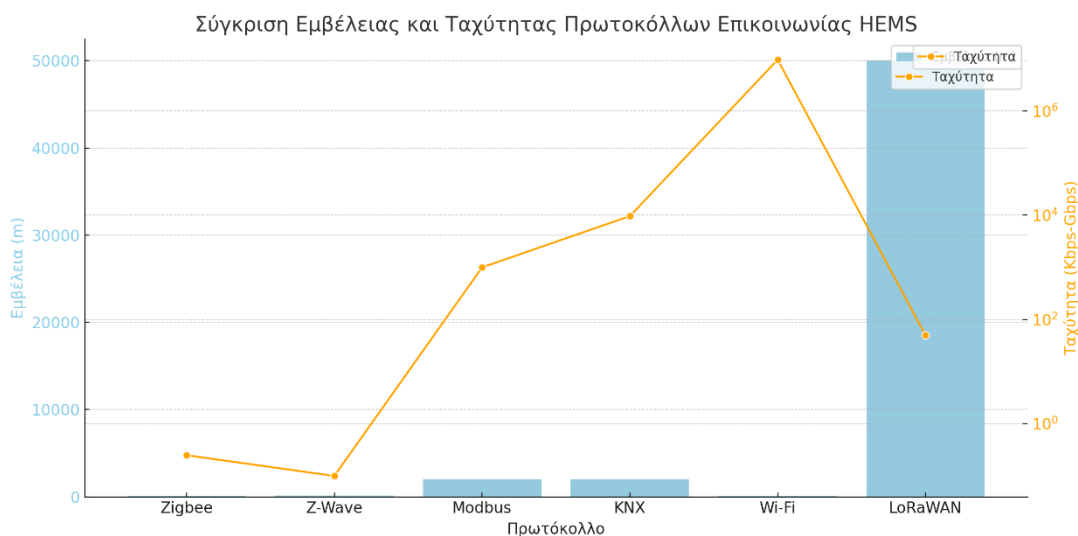
State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

δορυφορική διασύνδεση, συνύπαρξη με 5G/Wi-Fi σε υβριδικά σενάρια (Hoeller κ.ά., 2020; Jouhari κ.ά., 2022; Muppala, 2021).

Πίνακας 5: Συγκριτικός Πίνακας Χαρακτηριστικών

Πρωτόκολλο	Συχνότητα (MHz/GHz)	Εμβέλεια	Ταχύτητα Δεδομένων	Κατανάλωση Ενέργειας	Τοπολογία Δικτύου	Κύριες Εφαρμογές
Zigbee	2.4 GHz	10-100 m	250 Kbps	Πολύ χαμηλή	Mesh	Έξυπνα σπίτια, IoT, αισθητήρες
Z-Wave	868 MHz (Ευρώπη), 915 MHz (ΗΠΑ)	30-150 m	100 Kbps	Πολύ χαμηλή	Mesh	Οικιακός αυτοματισμός, έξυπνες συσκευές
Modbus	RS-232/RS-485/Ethernet	1-2 km (ενσύρματο)	1 Mbps	Χαμηλή	Master-Slave	Βιομηχανικός αυτοματισμός, έλεγχος PLC
KNX	868 MHz / Συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων	1-2 km (ενσύρματο)	9600 bps - 100 Mbps	Μέτρια	Bus	Κτιριακός αυτοματισμός, HVAC, έξυπνα κτίρια
Wi-Fi	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	30-100 m	9.6 Gbps (Wi-Fi 6)	Υψηλή	Star	Internet, streaming, επικοινωνία δεδομένων
LoRaWAN	868 MHz (Ευρώπη), 915 MHz (ΗΠΑ)	10-50 km	0.3 - 50 Kbps	Πολύ χαμηλή	Star	IoT, έξυπνες πόλεις, αγροτική τεχνολογία



Εικόνα 3: Συνδυαστική απεικόνιση της εμβέλειας και της ταχύτητας δεδομένων των βασικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στα HEMS

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Εκτός από τα παραπάνω πρωτόκολλα, τα HEMS υποστηρίζουν **Cloud-based και Edge Computing** Προσεγγίσεις, οι οποίες καθορίζουν την αποδοτικότητα και την ταχύτητα ανταπόκρισης του συστήματος.

Cloud-based HEMS

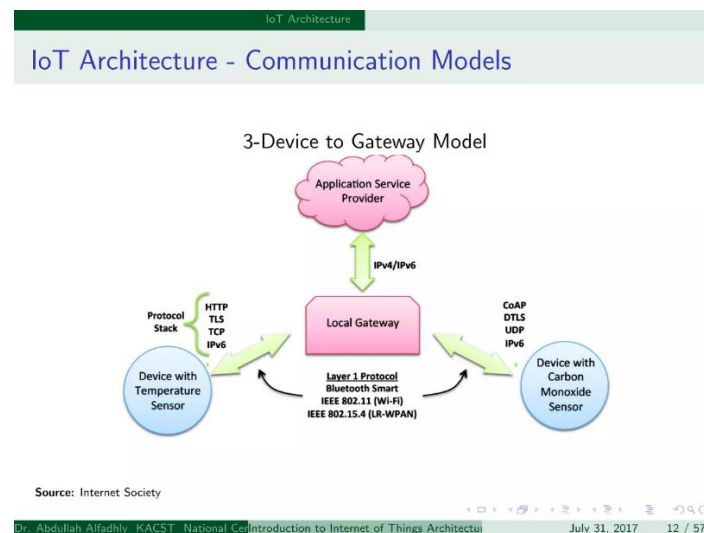
Κεντρική ανάλυση/ενορχήστρωση, big-data & AI/ML, εύκολη κλιμάκωση και απομακρυσμένη πρόσβαση· ευάλωτο σε latency/συνδεσιμότητα και απαιτεί ισχυρή ασφάλεια/συμμόρφωση (CLS Facility Services, 2023; Nutanix, 2023).

Edge-based HEMS

Τοπική λήψη αποφάσεων (χαμηλό latency), ιδιωτικότητα, λειτουργία και με διακοπές δικτύου· περιορισμένοι πόροι/συντήρηση/ενοποίηση (Harvard University, John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, 2023; STL Partners, 2023).

Υβριδικό Cloud-Edge

Τοπικός έλεγχος κρίσιμων βρόχων (φορτία, BESS, EV), με cloud για μακρο-βελτιστοποίηση/εκμάθηση/στόλους· κυρίαρχη SoTA κατεύθυνση στα εμπορικά οικοσυστήματα HEMS.



Εικόνα 4: Μοντέλα επικοινωνίας και επίπεδα πρωτοκόλλων στο IoT (π.χ. επίπεδα φυσικού, δικτύου, μεταφοράς, εφαρμογής)

1.2.3 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα HEMS

Η ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα Home Energy Management Systems (HEMS) αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο για τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο, όπου η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα μειώνεται δραστικά και η αυτονομία των νοικοκυριών ενισχύεται (Kabalcı, 2016; Khan κ.ά., 2020).

Καθώς η κλιματική αλλαγή και η ανάγκη για ενεργειακή επάρκεια πιέζουν προς την υιοθέτηση έξυπνων λύσεων, τα HEMS με ΑΠΕ επιτρέπουν τη δυναμική διαχείριση της ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), το Blockchain και τα IoT-enabled συστήματα (Anvari-Moghaddam κ.ά., 2020).

Ο Ρόλος των HEMS στην Οικιακή Ενεργειακή Μετάβαση

Τα HEMS λειτουργούν ως κεντρικοί "εγκέφαλοι" που επιτρέπουν την παρακολούθηση, αυτοματοποίηση και αποδοτική κατανομή της ενέργειας σε ένα νοικοκυριό. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ στα HEMS περιλαμβάνει:

- Σύνδεση Ανανεώσιμων Πηγών (π.χ. φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, βιομάζα).
- Διαχείριση Φορτίου μέσω έξυπνων αλγορίθμων που αποφασίζουν πότε και πώς χρησιμοποιείται η ενέργεια.
- Αποθήκευση Πλεονάζουσας Ενέργειας για χρήση σε περιόδους χαμηλής παραγωγής.
- Αλληλεπίδραση με το Δίκτυο για συμμετοχή σε μηχανισμούς Demand Response και Net Metering (Parageorgiou κ.ά., 2022).

Τύποι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα HEMS

Η επιλογή της κατάλληλης ΑΠΕ για ένα νοικοκυριό εξαρτάται από γεωγραφικούς, κλιματολογικούς και τεχνολογικούς παράγοντες.

Α. Ηλιακή Ενέργεια (Φωτοβολταϊκά Συστήματα - PVs)

- Βασικός πυλώνας της αποκεντρωμένης ενέργειας. Οι νέες τεχνολογίες όπως τα Tandem Solar Cells και Perovskite PVs αυξάνουν την απόδοση κατά 20-30% (Huang κ.ά., 2020).
- Bifacial PVs μπορούν να αξιοποιήσουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία για μεγαλύτερη παραγωγή. Τα Bifacial Photovoltaic Panels (Bifacial PVs) είναι διπλής

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

όσης φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και από τις δύο πλευρές τους (Song κ.ά., 2022).

- Ηλιακή Θερμική Ενέργεια (Solar Thermal) → Χρήση για ζεστό νερό και θέρμανση χώρων.

Β. Αιολική Ενέργεια (Μικρές Ανεμογεννήτριες)

- Ιδανική για παράκτιες και ορεινές περιοχές με σταθερούς ανέμους.
- Οι κατακόρυφες ανεμογεννήτριες (VAWTs) είναι πιο ήσυχες και κατάλληλες για οικιστικές περιοχές (Bahaj & Myers, 2007).
- Συνδυασμός ηλιακής και αιολικής αυξάνει τη συνεχή παραγωγή ενέργειας.

Γ. Υβριδικά Συστήματα και Νέες Τεχνολογίες

- Φωτοβολταϊκά + Ανεμογεννήτριες + Αποθήκευση για αυτονομία 24/7.
- Hydrogen Fuel Cells: Μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο για μελλοντική χρήση.
- Geothermal Heat Pumps: Χρήση γεωθερμικής ενέργειας για τη θέρμανση/ψύξη του σπιτιού (Lund & Boyd, 2015).

Τεχνολογίες Διαχείρισης και Αποθήκευσης Ενέργειας στα HEMS

Η ενεργειακή αυτονομία εξαρτάται από την αποδοτική αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας και τη βελτιστοποιημένη κατανάλωση.

Α. Μπαταρίες και Συστήματα Αποθήκευσης

- Λιθίου-Ιόντων Μπαταρίες (Tesla Powerwall, LG RESU) για οικιακή αποθήκευση.
- Solid-State Batteries → Υψηλότερη χωρητικότητα και διπλάσια διάρκεια ζωής από τις συμβατικές μπαταρίες λιθίου (Q. Zhang κ.ά., 2020).
- Υβριδικά Συστήματα Αποθήκευσης (Supercapacitors + Batteries) → Άμεση απελευθέρωση ενέργειας σε αιχμακές ανάγκες.

Β. Έξυπνη Διαχείριση Φορτίου μέσω AI

- Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) & Machine Learning → Προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.
- Blockchain & P2P Trading → Ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ γειτόνων μέσω αποκεντρωμένων συναλλαγών.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- IoT-Enabled Sensors → Παρακολούθηση και βελτιστοποίηση κατανάλωσης μέσω δεδομένων (Gaur κ.ά., 2021).

Οφέλη από την Ενσωμάτωση ΑΠΕ στα HEMS

A. Οικονομικά Οφέλη

- Μείωση κόστους ενέργειας μέσω ιδιοκατανάλωσης και επιδοτήσεων ΑΠΕ.
- Συμμετοχή σε Net Metering και Demand Response, επιτρέποντας στους χρήστες να πουλάνε την περίσσεια ενέργεια.

B. Ενεργειακή Αυτονομία

- Μειωμένη εξάρτηση από το δίκτυο, ιδανικό για απομακρυσμένες περιοχές.
- Αυξημένη ανθεκτικότητα σε blackouts και αστάθεια του δικτύου.

Γ. Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα

- Μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα και μείωση εκπομπών CO₂.
- Βιώσιμη κατανάλωση ενέργειας που συνάδει με τις παγκόσμιες ενεργειακές τάσεις (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023).

Το Μέλλον των HEMS με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

- Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα HEMS αποτελεί αναγκαία εξέλιξη για ένα αποκεντρωμένο, αυτόνομο και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.
- Τα σύγχρονα AI-driven HEMS σε συνδυασμό με IoT, Blockchain και έξυπνα δίκτυα διαμορφώνουν την ενεργειακή επανάσταση του μέλλοντος.
- Οι τάσεις της αγοράς δείχνουν πως η παραγωγή, αποθήκευση και διαχείριση της ενέργειας μεταφέρεται στα χέρια των καταναλωτών, δημιουργώντας ενεργειακά αυτόνομα κτίρια και κοινότητες.

Η ενσωμάτωση ΑΠΕ οδηγεί αναπόφευκτα στη μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα HEMS διασυνδέονται με το ίδιο το ηλεκτρικό δίκτυο, ζήτημα που θα αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 2.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες Τάσεις και Καινοτομίες στα Οικιακά HEMS

Τα Home Energy Management Systems (HEMS) εξελίσσονται διαρκώς, ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της βιωσιμότητας. Το παρόν κεφάλαιο αναλύει τις σύγχρονες τεχνολογικές τάσεις, την αυτοματοποίηση μέσω έξυπνων αλγορίθμων και τη διασύνδεση των HEMS με προηγμένα Smart Home συστήματα, προσφέροντας μια συνολική εικόνα για το μέλλον της ενεργειακής διαχείρισης στα νοικοκυριά.

2.1 Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας στα Σύγχρονα Νοικοκυριά: Αναγκαιότητα, Τεχνολογίες και Οφέλη

2.1.1 Ανάγκη για Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας στα Σύγχρονα Νοικοκυριά

Οι σύγχρονες κατοικίες εξοπλίζονται σταδιακά με νέες τεχνολογίες που επιτρέπουν την ακριβή μέτρηση και προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας (Siano, 2014). Τα έξυπνα δίκτυα και οι συνδεδεμένες οικιακές συσκευές επιτρέπουν την υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών πρακτικών, όπως η προσαρμογή της χρήσης ηλεκτρικών φορτίων στις ώρες που το κόστος ενέργειας είναι χαμηλότερο και η βελτιστοποίηση της χρήσης της αποθηκευμένης ενέργειας από ηλιακά πάνελ (Fang κ.ά., 2012).

Οι καταναλωτές μέχρι πρόσφατα δεν είχαν πρόσβαση σε αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τη χρήση ενέργειας στο σπίτι τους, ενώ η τιμολόγηση του ρεύματος βασιζόταν κυρίως σε σταθερά τιμολόγια. Με την εισαγωγή των HEMS, τα δεδομένα αυτά είναι πλέον προσβάσιμα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στο χρήστη να βλέπει ακριβώς ποια συσκευή καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και να λαμβάνει μέτρα για τη βελτιστοποίηση της χρήσης της (Kavousi-Fard & Tarashkar, 2021).

Τα έξυπνα συστήματα διαχείρισης ενέργειας δεν αφορούν μόνο τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης, αλλά και τη βελτίωση της αλληλεπίδρασης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα HEMS είναι σε θέση να ανταλλάσσουν δεδομένα με τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας τη δυνατότητα δυναμικής τιμολόγησης και προγραμματισμού κατανάλωσης, έτσι

ώστε οι χρήστες να αποφεύγουν τις ώρες υψηλής τιμής και να εκμεταλλεύονται οικονομικότερα τα διαθέσιμα ενεργειακά φορτία (Pal & Kumar, 2020).

2.1.2 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν την Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας

Η εφαρμογή των HEMS στα σύγχρονα νοικοκυριά βασίζεται σε προηγμένες τεχνολογικές υποδομές, οι οποίες καθιστούν δυνατή την αυτοματοποιημένη διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βέλτιστη αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων (Siano, 2014).

2.1.2.1 Έξυπνοι Μετρητές και Αισθητήρες Ενέργειας

Οι έξυπνοι μετρητές (smart meters) και οι αισθητήρες IoT επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε σημείο του σπιτιού (Güngör et al., 2012). Μέσω αυτών των τεχνολογιών, το HEMS μπορεί να εντοπίζει σε ποιες ώρες η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη και να προτείνει εναλλακτικούς τρόπους χρήσης των συσκευών.

2.1.2.2 Αλγόριθμοι Πρόβλεψης Κατανάλωσης και Δυναμική Τιμολόγηση

Τα σύγχρονα HEMS ενσωματώνουν αλγόριθμους πρόβλεψης, οι οποίοι βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα, μετεωρολογικές προβλέψεις και πρότυπα κατανάλωσης.

Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να ρυθμίσουν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας στις ώρες που είναι οικονομικότερα αποδοτική, αποφεύγοντας τις ώρες υψηλής ζήτησης και αυξημένου κόστους.

2.1.2.3 Διαχείριση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Αποθήκευση

Τα HEMS επιτρέπουν την ενσωμάτωση της ηλιακής ή αιολικής ενέργειας, βελτιστοποιώντας τη χρήση τους ανάλογα με τη διαθεσιμότητα. Αν για παράδειγμα ηλιακή ενέργεια παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά η κατανάλωση είναι υψηλότερη το βράδυ, το σύστημα μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια σε μπαταρίες και να τη διανείμει όταν χρειάζεται (Yoldas κ.ά., 2017).

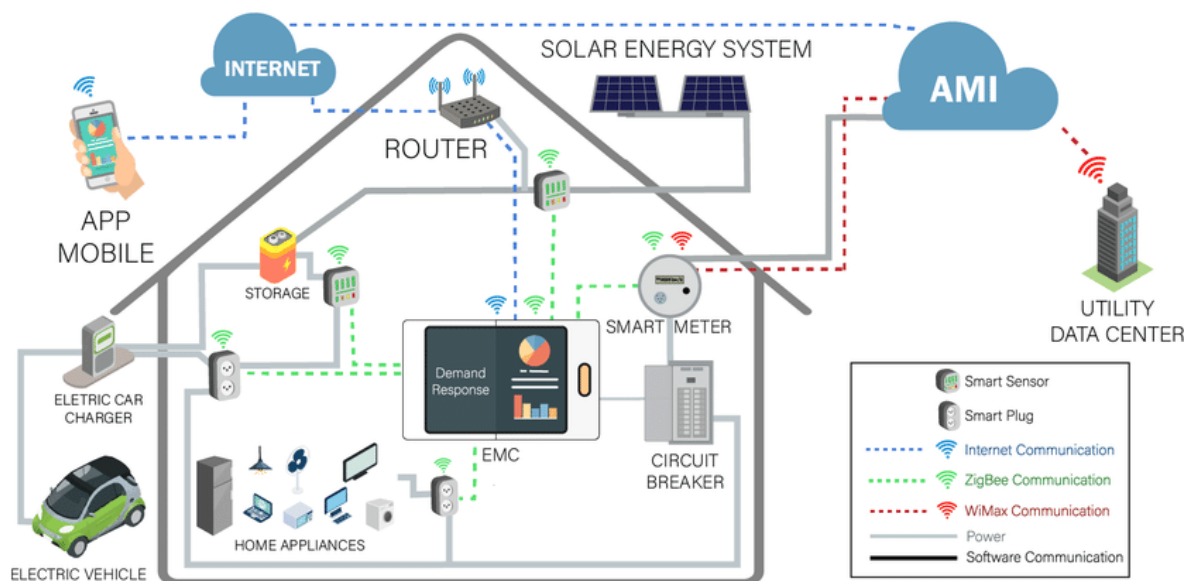
2.1.3 Οφέλη της Έξυπνης Διαχείρισης Ενέργειας μέσω HEMS

Η υιοθέτηση των HEMS οδηγεί σε πολλαπλά πλεονεκτήματα, τόσο για τον καταναλωτή όσο και για το ηλεκτρικό σύστημα στο σύνολό του (Rahman et al., 2016).

Η μείωση του ενεργειακού κόστους αποτελεί το κυριότερο όφελος, καθώς τα HEMS επιτρέπουν στους χρήστες να ρυθμίζουν τη χρήση των ηλεκτρικών τους συσκευών με βάση τις χρεώσεις ηλεκτρικού ρεύματος και τις περιόδους χαμηλού κόστους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση των λογαριασμών ρεύματος, ιδιαίτερα για κατοικίες που ενσωματώνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Pal & Kumar, 2020).

Επιπλέον, τα HEMS συμβάλλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, καθώς η χρήση δεδομένων και έξυπνων αλγορίθμων επιτρέπει τη βέλτιστη κατανομή φορτίων. Αυτό δεν βοηθά μόνο τον χρήστη να εξοικονομήσει χρήματα, αλλά μειώνει και την επιβάρυνση του ηλεκτρικού δικτύου, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για πρόσθετες μονάδες παραγωγής ενέργειας (Y. Li κ.ά., 2021).

Τέλος, η υιοθέτηση των HEMS συμβάλλει στη βιωσιμότητα, καθώς μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και προωθεί τη χρήση ανανεώσιμων πηγών. Με την εξάπλωση των HEMS, τα σύγχρονα νοικοκυριά μπορούν να γίνουν περισσότερο ενεργειακά αυτόνομα, μειώνοντας τις εκπομπές CO₂ και υποστηρίζοντας ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον (Mwasilu κ.ά., 2014)



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική ενός HEMS που απεικονίζει τη ροή ενέργειας και πληροφορίας μεταξύ πηγών, ελεγκτών, συσκευών και χρήστη

2.2 Διασύνδεση HEMS με Smart Home Συστήματα

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έξυπνων κατοικιών (Smart Homes) έχει δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης στα σύγχρονα νοικοκυριά. Τα Home Energy Management Systems (HEMS) δεν λειτουργούν πλέον ως αυτόνομα συστήματα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά ενσωματώνονται σε ευρύτερα οικοσυστήματα έξυπνων συσκευών, τα οποία περιλαμβάνουν αισθητήρες IoT, αυτοματισμούς, δυναμικά συστήματα τιμολόγησης ενέργειας και έξυπνα φορτία.

Η αλληλεπίδραση των HEMS με τα Smart Home Συστήματα προσφέρει δυνατότητες ελέγχου, αυτοματοποίησης και βελτιστοποίησης της χρήσης ενέργειας που δεν ήταν δυνατές στα συμβατικά νοικοκυριά. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να αναλύσει τους τρόπους με τους οποίους τα HEMS συνδέονται με έξυπνες συσκευές, πώς διαχειρίζονται την κατανάλωση ενέργειας και ποιες τεχνολογίες επιτρέπουν αυτή τη διασύνδεση.

2.2.1 Η σημασία της διασύνδεσης των HEMS με Smart Home Συστήματα

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ενεργειακών συστημάτων στις κατοικίες, σε συνδυασμό με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών, απαιτεί έναν πιο ευφυή και αυτοματοποιημένο τρόπο διαχείρισης της κατανάλωσης. Τα HEMS παρέχουν αυτήν τη δυνατότητα, αλλά η πραγματική τους αξία αναδεικνύεται όταν συνδυάζονται με ευφυή οικιακά συστήματα που επιτρέπουν:

- Ακριβή μέτρηση και παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας σε επίπεδο μεμονωμένης συσκευής.
- Αυτοματοποιημένη λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών, βάσει δυναμικών τιμολογίων και ενεργειακής διαθεσιμότητας.
- Διαχείριση έξυπνων φορτίων, προσαρμόζοντας τη χρήση τους σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με την κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Μείωση της ενεργειακής σπατάλης και βελτιστοποίηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μέσω της επικοινωνίας με συστήματα αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας (Pérez-Lombard κ.ά., 2022).

Στα παραδοσιακά οικιακά ενεργειακά συστήματα, η διαχείριση ενέργειας γινόταν στατικά, χωρίς δυνατότητα προσαρμογής. Σήμερα, η ευφυής διασύνδεση μεταξύ HEMS και

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Smart Home συσκευών επιτρέπει δυναμική προσαρμογή, η οποία προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Zhao κ.ά., 2021).

2.2.2 Τεχνολογίες που επιτρέπουν τη διασύνδεση των HEMS με Smart Home Συστήματα

Η επιτυχής ενσωμάτωση των HEMS σε ένα οικοσύστημα έξυπνων κατοικιών βασίζεται σε προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας, ανάλυσης δεδομένων και αυτοματισμού. Οι βασικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν:

Πρωτόκολλα Επικοινωνίας και Ανταλλαγής Δεδομένων

Τα HEMS πρέπει να επικοινωνούν με μια μεγάλη ποικιλία έξυπνων συσκευών, κάτι που απαιτεί προηγμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα που επιτρέπουν αυτή τη διασύνδεση είναι:

- Zigbee & Z-Wave: Ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα για επικοινωνία χαμηλής ισχύος μεταξύ έξυπνων οικιακών συσκευών.
- Wi-Fi & Bluetooth: Επιτρέπουν άμεση επικοινωνία μεταξύ HEMS και άλλων smart home συσκευών χωρίς την ανάγκη πρόσθετων hubs.
- Matter & Thread: Νέα πρωτόκολλα που εστιάζουν στη βελτιωμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών smart home, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή τους (Hossain κ.ά., 2022).

Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις απαιτήσεις ταχύτητας, εμβέλειας και κατανάλωσης ενέργειας της εφαρμογής.

Ενσωμάτωση IoT Συσκευών και Αισθητήρων Ενέργειας

Οι IoT αισθητήρες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασύνδεση των HEMS με τα smart home συστήματα, καθώς επιτρέπουν την καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την προσαρμογή της ενεργειακής χρήσης.

Οι πιο σημαντικές IoT συσκευές που ενσωματώνονται στα HEMS περιλαμβάνουν:

- Έξυπνοι θερμοστάτες (Google Nest, Ecobee, Honeywell), οι οποίοι προσαρμόζουν αυτόματα τη θερμοκρασία για βέλτιστη απόδοση.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Έξυπνα φωτιστικά συστήματα (Philips Hue, LIFX) που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας μέσω αυτοματοποιημένων σεναρίων χρήσης.

- Έξυπνοι μετρητές κατανάλωσης ενέργειας, οι οποίοι παρέχουν αναλυτικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και βοηθούν στη βελτιστοποίηση της χρήσης των ηλεκτρικών φορτίων (J. Wang, Li, κ.ά., 2021).

Η διασύνδεση των HEMS με τις IoT συσκευές προσφέρει ενεργειακή ευελιξία, καθώς επιτρέπει αυτόματη διαχείριση της κατανάλωσης, μειώνοντας την ανάγκη για χειροκίνητες ρυθμίσεις από τον χρήστη.

2.2.3 Οφέλη της Διασύνδεσης HEMS με Smart Home Συστήματα

Η έξυπνη διαχείριση ενέργειας μέσω HEMS και Smart Home Συστημάτων έχει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- **Βελτίωση της Ενεργειακής Απόδοσης**

Η συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ των συσκευών και του HEMS βελτιστοποιεί τη χρήση ενέργειας και μειώνει τις απώλειες λόγω κακής διαχείρισης φορτίου.

- **Μείωση του Ενεργειακού Κόστους**

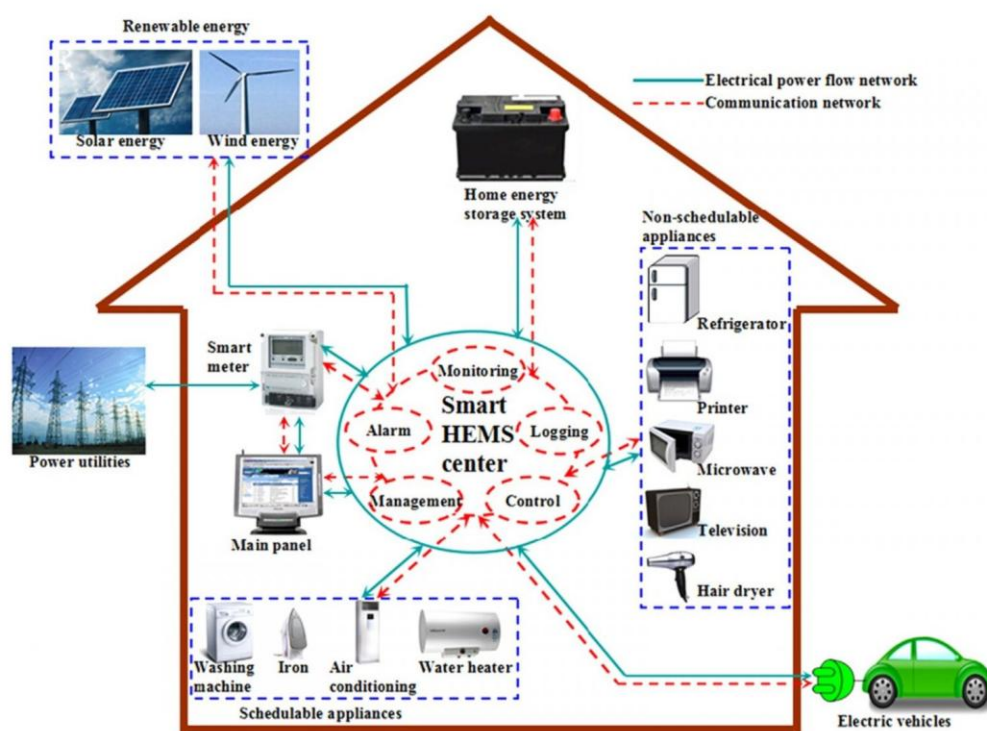
Η διασύνδεση επιτρέπει τη χρήση έξυπνων τιμολογίων, ώστε οι συσκευές να λειτουργούν όταν το ρεύμα είναι φθηνότερο, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση στους λογαριασμούς ενέργειας.

- **Αυξημένη Άνεση και Αυτοματοποίηση**

Τα HEMS επιτρέπουν την πλήρη αυτοματοποίηση της ενεργειακής χρήσης, προσφέροντας έξυπνες λειτουργίες που βελτιώνουν την καθημερινότητα των χρηστών.

- **Ενίσχυση της Βιωσιμότητας**

Τα HEMS συμβάλλουν στη βέλτιστη χρήση της ηλιακής ενέργειας, συνδέοντας τις ΑΠΕ με τις οικιακές ανάγκες μέσω έξυπνων αλγορίθμων (Klein κ.ά., 2020).



Arhitectura unui sistem de management al energiei dintr-o casă^[4]

Εικόνα 6: Ενσωμάτωση HEMS σε έξυπνο οικιακό σύστημα με διασύνδεση συσκευών, αποθήκευσης, ΑΠΕ και utility

2.3 Ενσωμάτωση και Αυτοματοποιημένη Προσαρμογή στα HEMS

Η ενσωμάτωση των Home Energy Management Systems (HEMS) με IoT συσκευές και αισθητήρες συνιστά ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα για τη μετάβαση σε πλήρως ευφυή ενεργειακά οικοσυστήματα. Η δυνατότητα συλλογής, ανάλυσης και αυτόματης προσαρμογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο καθιστά τα HEMS ικανά όχι μόνο να ελέγχουν την κατανάλωση, αλλά και να προβλέπουν, να βελτιστοποιούν και να αλληλεπιδρούν με το δίκτυο.

2.3.1 Ενσωμάτωση IoT Συσκευών και Αισθητήρων

Η ενσωμάτωση των Home Energy Management Systems (HEMS) με IoT συσκευές και αισθητήρες αποτελεί βασικό πυλώνα της εξέλιξης της έξυπνης ενεργειακής διαχείρισης. Το Internet of Things (IoT) δίνει στα HEMS τη δυνατότητα να συνδέουν σε πραγματικό χρόνο πολλαπλές οικιακές συσκευές, μετρητές και υποσυστήματα, επιτρέποντας τη δυναμική

προσαρμογή της κατανάλωσης βάσει ενεργειακών αναγκών, διαθεσιμότητας ΑΠΕ και δυναμικών τιμολογίων (Atlam & Wills, 2020).

Στην πράξη, τα IoT-enabled HEMS βασίζονται σε ένα δίκτυο αισθητήρων και μετρητών που συλλέγουν συνεχώς δεδομένα για κατανάλωση, θερμοκρασία, φωτισμό, παρουσία και περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτά τα δεδομένα τροφοδοτούν αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και big data analytics, οι οποίοι αναλύουν μοτίβα χρήσης και προσαρμόζουν αυτόματα τη λειτουργία των συσκευών. Έτσι, τα HEMS μετατρέπονται από παθητικά συστήματα παρακολούθησης σε ενεργά κέντρα βελτιστοποίησης της οικιακής ενέργειας (J. Wang, Li, κ.ά., 2021).

2.3.1.1 Τεχνική Υποδομή και Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική των HEMS μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερα επίπεδα:

- Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer): Αισθητήρες, μετρητές, θερμοστάτες και IoT συσκευές που συλλέγουν δεδομένα κατανάλωσης και περιβάλλοντος.
- Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer): Διασύνδεση μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων (Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, LoRaWAN) και routing για ασφαλή μετάδοση δεδομένων.
- Επίπεδο Επεξεργασίας (Processing Layer): Edge nodes και cloud πλατφόρμες που εκτελούν αλγορίθμους πρόβλεψης, ανάλυσης και βελτιστοποίησης.
- Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer): Έξυπνες εφαρμογές για οικιακή ενεργειακή διαχείριση, smart grids, e-mobility και έξυπνες πόλεις.



Εικόνα 7: : Συνολική αρχιτεκτονική IoT-enabled HEMS με τέσσερα επίπεδα: αισθητήρων, επικοινωνίας και επεξεργασίας/ελέγχου

2.3.1.2 Παραδείγματα Ενσωμάτωσης IoT σε HEMS

Ο **Google Nest Thermostat** χρησιμοποιεί AI για να αναλύει συνήθειες χρηστών και να ρυθμίζει αυτόματα τα setpoints θέρμανσης/ψύξης, μειώνοντας την κατανάλωση έως 20% (Google, 2023).

Τα **Philips Hue Smart Lights** ενσωματώνονται σε HEMS και εφαρμόζουν adaptive lighting, επιτυγχάνοντας έως 80% μείωση κατανάλωσης σε σχέση με τον παραδοσιακό φωτισμό.

Το **Sense Energy Monitor** παρέχει granular ανάλυση κατανάλωσης ανά συσκευή, επιτρέποντας στα HEMS να εντοπίζουν ενεργοβόρες συσκευές και να ειδοποιούν τον χρήστη.

Οι **Samsung SmartThings** επιτρέπουν απομακρυσμένο έλεγχο και προγραμματισμό συσκευών, ενώ με AI-αλγορίθμους προσαρμόζουν αυτόματα την κατανάλωση βάσει δυναμικών τιμών.

2.3.1.3 Ενσωμάτωση με SAP και Επιχειρησιακά Συστήματα

Πέρα από το οικιακό επίπεδο, τα δεδομένα από IoT-enabled HEMS μπορούν να ενσωματωθούν σε επιχειρησιακές πλατφόρμες όπως η **SAP Leonardo IoT** και το **SAP Energy Data Management**. Μέσω API connectors, οι πλατφόρμες αυτές συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόζουν predictive analytics και τα συνδέουν με **SAP for Utilities**. Έτσι, οι πάροχοι ενέργειας αποκτούν ολοκληρωμένη εικόνα για την κατανάλωση, μπορούν να προσφέρουν δυναμικά τιμολόγια, να συμμετέχουν σε demand response και να σχεδιάσουν καλύτερα στρατηγικές δικτύου (SAP SE, 2022).

Η σύνδεση SAP–HEMS επιτρέπει επίσης την **αυτόνομη προσαρμογή σε μικροδίκτυα**. Για παράδειγμα, δεδομένα από έναν στόλο οικιακών HEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για frequency response σε περιφερειακό επίπεδο, μειώνοντας την ανάγκη για εφεδρικές μονάδες παραγωγής. Αυτή η λειτουργία συνιστά κρίσιμο βήμα προς τη δημιουργία έξυπνων κοινοτήτων και αποκεντρωμένων ενεργειακών αγορών.

2.3.2 Αυτοματοποιημένη Προσαρμογή μέσω AI/IoT στα HEMS

2.3.2.1 Ο Ρόλος της Αυτοματοποιημένης Προσαρμογής στα HEMS

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

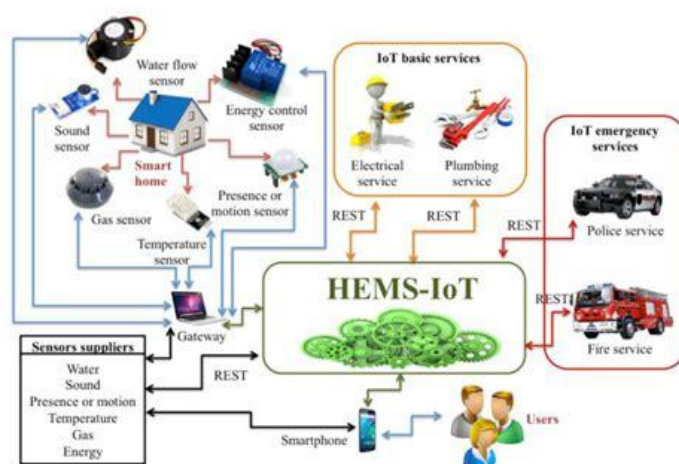
Μπιμπίκας Αθανάσιος

Η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ και η αστάθεια που αυτές εισάγουν στα δίκτυα καθιστούν την αυτοματοποιημένη προσαρμογή ζωτικής σημασίας για τα HEMS. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σχήματα όπου ο χρήστης όριζε χειροκίνητα τη λειτουργία των συσκευών, τα σύγχρονα HEMS αξιοποιούν αλγορίθμους πρόβλεψης φορτίου και real-time optimization ώστε να λαμβάνουν αυτόνομες αποφάσεις.

Οι βασικές λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- **Forecast-driven load shifting:** προγραμματισμός λειτουργίας ενεργοβόρων συσκευών (π.χ. πλυντήριο, EV charging) με βάση τις προβλέψεις κατανάλωσης και παραγωγής ΑΠΕ (E. Mocanu κ.ά., 2018).
- **Dynamic tariff response:** αυτόματη προσαρμογή χρήσης ανάλογα με τις τιμές Time-of-Use (TOU) ή real-time tariffs, μειώνοντας το κόστος έως 25% (J. Wang, Li, κ.ά., 2021)
- **Integration με ηλεκτρικά οχήματα (V2G/V2H):** τα HEMS αποφασίζουν πότε το EV θα φορτίσει ή θα εκφορτίσει ενέργεια πίσω στο δίκτυο, συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση του grid (Y. Liu, Wang, κ.ά., 2021).
- **Predictive comfort control:** έξυπνοι θερμοστάτες και HVAC συστήματα συνδυάζουν δεδομένα παρουσίας και πρόβλεψης καιρού, ώστε να ισορροπούν την άνεση με την εξοικονόμηση (K. Zhou κ.ά., 2020b).

Σε αυτό το πλαίσιο, η αυτοματοποίηση δεν αφορά μόνο την οικιακή άνεση αλλά και την ενεργειακή ευελιξία που παρέχουν τα HEMS στο συνολικό ηλεκτρικό οικοσύστημα.



Εικόνα 8: Διάγραμμα λήψης αποφάσεων σε HEMS βασισμένο σε AI/IoT — από τη συλλογή δεδομένων έως την πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση και την αλληλεπίδραση με το δίκτυο

2.3.2.2 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν την Αυτοματοποιημένη Προσαρμογή

Η υλοποίηση της αυτοματοποιημένης προσαρμογής απαιτεί την ενορχήστρωση πολλών τεχνολογικών υποδομών.

Big Data Analytics & Machine Learning

Η συνεχή συλλογή δεδομένων από έξυπνους μετρητές, IoT αισθητήρες και smart appliances τροφοδοτεί ML αλγόριθμους (ANN, LSTM, Random Forest) που προβλέπουν τη ζήτηση και βελτιστοποιούν τη χρήση φορτίων (X. Zhang κ.ά., 2022).

Edge Computing vs. Cloud Platforms

Η ανάλυση σε επίπεδο edge μειώνει την καθυστέρηση λήψης αποφάσεων (π.χ. EV charging control), ενώ οι cloud πλατφόρμες παρέχουν μακροπρόθεσμη ανάλυση και integration με utility operators (Kakran & Chanana, 2018).

Dynamic Pricing APIs και Demand Response

Τα HEMS συνδέονται με APIs παρόχων για να αντλούν δεδομένα τιμών σε πραγματικό χρόνο. Έτσι ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν φορτία ανάλογα με τις τιμές ενέργειας και τη διαθεσιμότητα ΑΠΕ.

Integration με SAP Energy & IoT Platforms

Λύσεις όπως το SAP Energy Data Management και το SAP Leonardo IoT υποστηρίζουν την επεξεργασία μετρητικών δεδομένων, τη δημιουργία digital twins και την προσομοίωση ενεργειακών σεναρίων. Μέσω αυτών, τα HEMS μπορούν να ενσωματώνονται σε επιχειρησιακά συστήματα utilities και smart grid έργα, συνδέοντας το οικιακό επίπεδο με την εταιρική ενεργειακή διαχείριση (SAP, 2022, σελ. 202).

Cybersecurity & Data Privacy

Η διασύνδεση IoT–HEMS απαιτεί ισχυρή προστασία δεδομένων (TLS, GDPR compliance, anomaly detection μέσω AI). Οι κυβερνοεπιθέσεις σε έξυπνα μετρητικά συστήματα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λάθος αποφάσεις ή παραβίαση

προσωπικών δεδομένων, κάτι που καθιστά την κυβερνοασφάλεια αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού.

Παράδειγμα:

Ένα HEMS που συνδυάζει LSTM αλγόριθμους με SAP IoT integration μπορεί να προβλέψει πότε θα αυξηθεί η ζήτηση, να μεταθέσει τη φόρτιση EV σε ώρες χαμηλού κόστους και να παρέχει αναφορές κατανάλωσης στο utility provider, επιτυγχάνοντας μείωση κόστους έως 30% και καλύτερη απορρόφηση ΑΠΕ (D. Mocanu κ.ά., 2018).

2.3.3 Πρότυπα Διαλειτουργικότητας (Interoperability Standards)

Η διαλειτουργικότητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη ανάπτυξη και υιοθέτηση των Home Energy Management Systems (HEMS). Τα περισσότερα οικιακά περιβάλλοντα ενσωματώνουν συσκευές από διαφορετικούς κατασκευαστές, οι οποίες λειτουργούν με ετερογενή πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως Zigbee, Z-Wave, KNX και Wi-Fi. Η έλλειψη ενιαίου πλαισίου οδηγεί σε κατακερματισμό της αγοράς και δυσχεραίνει τη δημιουργία ενός πραγματικά ολοκληρωμένου οικοσυστήματος HEMS, περιορίζοντας την επεκτασιμότητα και τη δυνατότητα συνεργασίας με άλλα ενεργειακά ή οικιακά συστήματα (Palensky κ.ά., 2021).

Στο πλαίσιο αυτό, η βιομηχανία έχει στραφεί στην ανάπτυξη ανοικτών προτύπων και ενοποιημένων πρωτοκόλλων που διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ συσκευών διαφορετικής προέλευσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το **Matter**, ένα νέο πρότυπο που αναπτύχθηκε από τη συμμαχία Connectivity Standards Alliance (CSA), με τη συμμετοχή κορυφαίων εταιρειών όπως Google, Amazon, Apple και Samsung. Το Matter αξιοποιεί IP-based επικοινωνία (IPv6, Thread) και στοχεύει να προσφέρει ένα ενιαίο οικοσύστημα όπου συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών μπορούν να συνεργάζονται απρόσκοπτα μέσω HEMS πλατφορμών (Alliance (CSA), 2022).

Η υιοθέτηση του Matter αναμένεται να επιταχύνει σημαντικά τη διάδοση των HEMS σε καταναλωτικό επίπεδο, καθώς μειώνει την πολυπλοκότητα εγκατάστασης, εξαλείφει προβλήματα ασυμβατότητας και ενισχύει την εμπιστοσύνη των χρηστών. Για τους κατασκευαστές, το Matter προσφέρει μια κοινή βάση ανάπτυξης που μειώνει το κόστος ενσωμάτωσης, ενώ για τα HEMS δημιουργεί τις συνθήκες για πλήρη αξιοποίηση προηγμένων

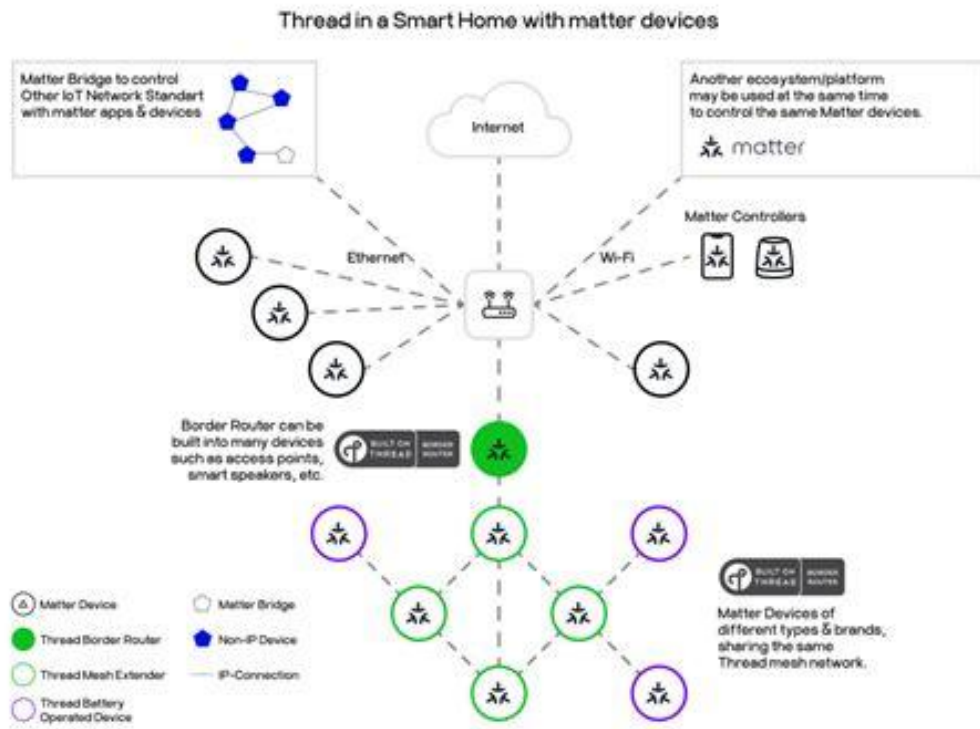
λειτουργιών, όπως αυτοματοποιημένη προσαρμογή φορτίων, demand response και ενσωμάτωση με έξυπνα δίκτυα.

Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση και οργανισμοί όπως η CEN-CENELEC έχουν προτείνει πλαίσια τυποποίησης που αποσκοπούν στη διασφάλιση της συμβατότητας μεταξύ ενεργειακών συστημάτων και IoT συσκευών, εναρμονίζοντας τα HEMS με τις ευρύτερες απαιτήσεις της ενεργειακής αγοράς (CEN-CENELEC, 2021). Παράλληλα, πρωτοβουλίες όπως το OpenADR (Open Automated Demand Response) προωθούν διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ HEMS και παρόχων ενέργειας, επιτρέποντας πιο αποδοτική συμμετοχή σε προγράμματα ευελιξίας.

Συνολικά, τα πρότυπα διαλειτουργικότητας αποτελούν το θεμέλιο για την εξέλιξη των HEMS από μεμονωμένες λύσεις οικιακής ενεργειακής διαχείρισης σε ολοκληρωμένα συστήματα που μπορούν να συνεργαστούν απρόσκοπτα με το δίκτυο, τις ανανεώσιμες πηγές και άλλες έξυπνες υποδομές. Η σταδιακή υιοθέτησή τους καθιστά τα HEMS όχι μόνο πιο φιλικά προς τον χρήστη αλλά και πιο κρίσιμα για τη μετάβαση σε ένα αποκεντρωμένο, βιώσιμο ενεργειακό οικοσύστημα.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 9: Το πρότυπο Matter της Connectivity Standards Alliance που επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών στο ίδιο smart home οικοσύστημα

2.3.4 Κυβερνοασφάλεια και Προστασία Δεδομένων στα HEMS

Η αυξανόμενη εξάρτηση των Home Energy Management Systems (HEMS) από IoT συσκευές, cloud πλατφόρμες και αλγόριθμους Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) καθιστά την κυβερνοασφάλεια και την προστασία δεδομένων θεμελιώδεις προϋποθέσεις για την αξιοπιστία και την αποδοτική λειτουργία τους. Καθώς τα HEMS συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, αποκτούν πρόσβαση σε ευαίσθητες πληροφορίες που μπορούν να αποκαλύψουν πρότυπα ζωής, συνήθειες και παρουσία των χρηστών στο σπίτι (Ghosh κ.ά., 2019).

Κύριες Απειλές και Τρωτά Σημεία

- Παραβίαση Ιδιωτικότητας (Privacy Breach): Τα δεδομένα κατανάλωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για profiling χρηστών, όπως πότε βρίσκονται στο σπίτι ή πότε φορτίζουν το ηλεκτρικό τους όχημα.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Επιθέσεις σε IoT συσκευές: Πολλές έξυπνες συσκευές (π.χ. έξυπνοι θερμοστάτες, φορτιστές EV) έχουν περιορισμένους μηχανισμούς ασφαλείας, καθιστώντας τα HEMS ευάλωτα σε επιθέσεις τύπου botnet (π.χ. Mirai).
- Man-in-the-Middle (MITM) επιθέσεις: Αφορούν την υποκλοπή ή αλλοίωση δεδομένων κατά τη μετάδοση μεταξύ HEMS ↔ cloud ↔ smart grid.
- Ransomware & επιθέσεις σε υποδομή: Σενάρια όπου οι επιτιθέμενοι αποκτούν πρόσβαση στο HEMS και μπλοκάρουν βασικές λειτουργίες, απαιτώντας λύτρα για την αποκατάσταση.

Τεχνολογικές Λύσεις και Προσεγγίσεις

- Κρυπτογράφηση Δεδομένων (TLS/SSL, AES-256): Όλα τα δεδομένα που διακινούνται μεταξύ HEMS και cloud πρέπει να κρυπτογραφούνται.
- Edge Computing & Federated Learning: Ανάλυση δεδομένων τοπικά στο HEMS, περιορίζοντας την αποστολή ευαίσθητων δεδομένων στο cloud.
- Blockchain για ασφάλεια συναλλαγών: Εφαρμογή σε P2P ενεργειακές κοινότητες ώστε να εξασφαλίζεται ακεραιότητα στις συναλλαγές ενέργειας (Pal & Kumar, 2020).
- Ασφαλής αυθεντικοποίηση (Multi-Factor Authentication, PKI): Ενισχυμένος έλεγχος πρόσβασης σε πλατφόρμες HEMS.
- GDPR & ISO 27001 compliance: Σε ευρωπαϊκό πλαίσιο, τα HEMS πρέπει να συμμορφώνονται με κανονισμούς όπως GDPR και διεθνή πρότυπα ασφαλείας.

Ερευνητικές και Πρακτικές Εφαρμογές

Οι Liang et al. (2021) προτείνουν μοντέλα ανίχνευσης εισβολών βασισμένα σε Deep Learning, τα οποία αναγνωρίζουν ανωμαλίες στη ροή δεδομένων κατανάλωσης.

Έργα όπως το Horizon 2020 RESOLVD έδειξαν πώς η ενσωμάτωση edge security modules βελτιώνει την ανθεκτικότητα των HEMS σε κυβερνοεπιθέσεις.

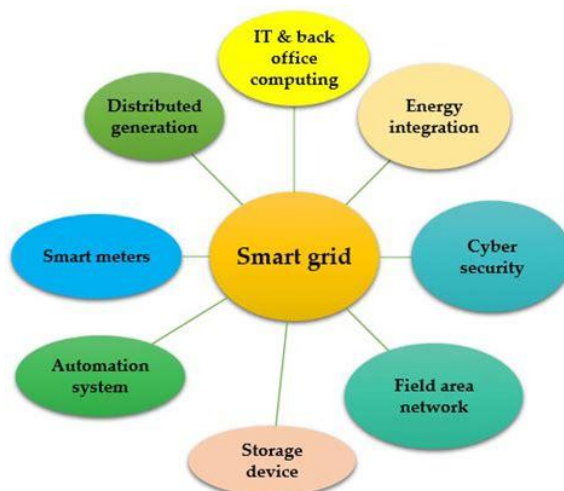
Οι Papadopoulos et al. (2022) τονίζουν ότι η υιοθέτηση Zero-Trust Architecture στα HEMS μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο παραβιάσεων.

Η ασφάλεια των HEMS δεν μπορεί να θεωρηθεί δευτερεύον ζήτημα, καθώς η παραβίαση δεδομένων μπορεί να έχει όχι μόνο τεχνολογικές, αλλά και κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Τα μελλοντικά HEMS πρέπει να σχεδιάζονται με αρχές Security by Design, ενσωματώνοντας τεχνολογίες edge AI, blockchain και μηχανισμούς ιδιωτικότητας, ώστε να

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

διασφαλιστεί η εμπιστοσύνη των καταναλωτών και η ασφαλής ένταξή τους στο ευρύτερο ενεργειακό οικοσύστημα.



Εικόνα 10: Κύρια συστατικά ενός Smart Grid – ενσωμάτωση μετρητών, αποθήκευσης, αυτοματισμού, κατακεντρωμένης παραγωγής και κυβερνοασφάλειας, που επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία των HEMS

Η ολοκληρωμένη λειτουργία των Home Energy Management Systems (HEMS) δεν περιορίζεται στο οικιακό επίπεδο, αλλά επεκτείνεται μέσω της διασύνδεσης με πλατφόρμες επιχειρησιακού επιπέδου όπως τα Energy Management Systems (EMS), τα Advanced Distribution Management Systems (ADMS) και εταιρικές λύσεις όπως το SAP Energy Data Management (EDM). Αυτή η διασύνδεση επιτρέπει τη βελτιστοποίηση όχι μόνο της κατανάλωσης στο επίπεδο του νοικοκυριού, αλλά και του συντονισμού με επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, διαχειριστές δικτύου (DSOs/TSOs) και εμπορικούς παρόχους ενέργειας (D. Mocanu κ.ά., 2018).

Λειτουργίες και Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Διασύνδεση με EMS/ADMS: Τα HEMS μετατρέπονται σε "αισθητήρες άκρου" (edge sensors) που μεταδίδουν δεδομένα φορτίου και ευελιξίας σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται από τα ADMS για τη βελτιστοποίηση της κατανομής ενέργειας σε χαμηλή και μέση τάση.

Σύνδεση με SAP EDM: Η πλατφόρμα SAP Energy Data Management επιτρέπει την κεντρική συλλογή και ανάλυση δεδομένων κατανάλωσης, ενοποιώντας πληροφορίες από

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

HEMS, μετρητές και συστήματα παραγωγής. Η ενσωμάτωση αυτή υποστηρίζει δυναμική τιμολόγηση, forecasting φορτίων και συμμόρφωση με ρυθμιστικά πλαίσια (SAP, 2022).

Αλληλεπίδραση με Smart Grids: Μέσω APIs (π.χ. OpenADR, IEC 61850), τα HEMS μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα με τα συστήματα των διαχειριστών δικτύου, επιτρέποντας Demand Response (DR) και Virtual Power Plant (VPP) συμμετοχή.

Παραδείγματα Εφαρμογών

Στην Ολλανδία, έργα όπως το InterFlex έδειξαν πώς η ενσωμάτωση HEMS με EMS και πλατφόρμες SAP μπορεί να μειώσει αιχμές κατανάλωσης κατά 20% μέσω real-time load shifting (ElaadNL, 2020)

Στη Γερμανία, τα HEMS που συνεργάζονται με SAP IS-U/EDM χρησιμοποιούνται για billing integration και ενεργειακές κοινότητες, επιτρέποντας peer-to-peer συναλλαγές με διαφανή λογιστική καταγραφή.

Στην Ιαπωνία, η ενσωμάτωση HEMS με το πλαίσιο ECHONET Lite και εταιρικά EMS συστήματα επέτρεψε την ανάπτυξη VPPs μεγάλης κλίμακας, όπου οικιακές μονάδες αποθήκευσης συνεισέφεραν σε frequency balancing.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

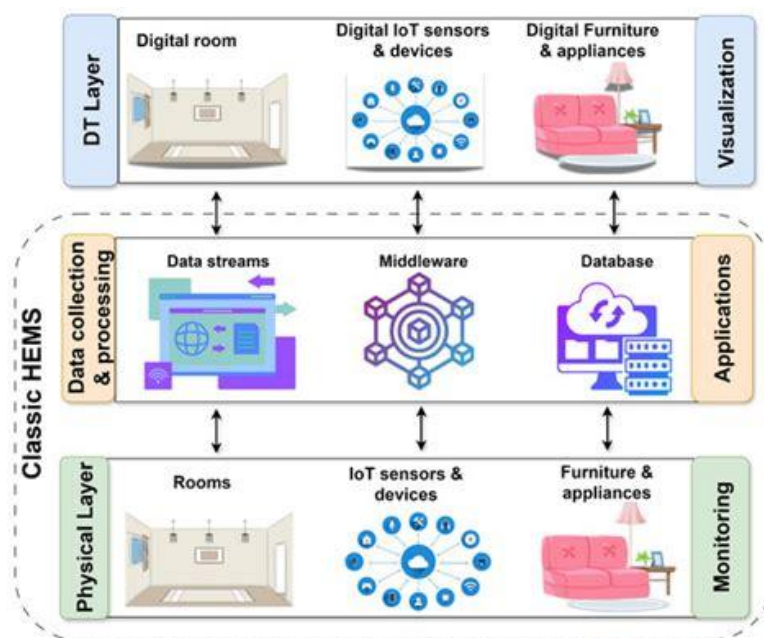
Τεχνικές Προκλήσεις

Διαλειτουργικότητα: Η ενοποίηση HEMS ↔ EMS ↔ SAP απαιτεί συμβατότητα σε επίπεδο APIs, πρωτοκόλλων (IEC 61850, CIM) και data models.

Κυβερνοασφάλεια: Η ροή δεδομένων μεταξύ οικιακών συστημάτων και επιχειρησιακών πλατφορμών δημιουργεί νέες επιφάνειες επίθεσης. Απαιτούνται end-to-end security frameworks.

Κλιμάκωση: Η διαχείριση χιλιάδων HEMS ως ενεργειακοί κόμβοι δημιουργεί ανάγκη για cloud-native υποδομές και distributed analytics (edge + cloud).

Η ενσωμάτωση των HEMS με πλατφόρμες επιχειρησιακού επιπέδου (π.χ. SAP EDM, EMS, Smart Grids) αναβαθμίζει τον ρόλο τους από «οικιακούς ρυθμιστές» σε ενεργούς παρόχους ευελιξίας και δεδομένων στο ενεργειακό οικοσύστημα. Αυτή η εξέλιξη αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μαζική εφαρμογή των VPPs, τη δυναμική τιμολόγηση και την ενεργή συμμετοχή των prosumers στην αγορά ενέργειας.



Εικόνα 11: Ενσωμάτωση HEMS με πλατφόρμες επιχειρησιακού επιπέδου (EMS, ADMS, SAP EDM) και σύνδεση με Smart Grids και VPPs

2.4 Διασύνδεση HEMS με το Ηλεκτρικό Δίκτυο (Grid Connection)

2.4.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Η διασύνδεση των Home Energy Management Systems (HEMS) με το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της ενεργειακής μετάβασης προς αποκεντρωμένα και ευφυή συστήματα παραγωγής και κατανάλωσης (Palensky et al., 2021). Σε αντίθεση με το παραδοσιακό ενεργειακό μοντέλο, όπου η ροή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν μονοκατευθυντική – από τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής προς τους τελικούς καταναλωτές – το σύγχρονο πλαίσιο των έξυπνων δικτύων (smart grids) απαιτεί δίκτυα με αμφίδρομες ροές (bidirectional flows) (Vojdani, 2008).

Στο νέο αυτό περιβάλλον, τα νοικοκυριά και οι επιχειρήσεις δεν αποτελούν πλέον παθητικούς καταναλωτές, αλλά ενεργούς συμμετέχοντες που μπορούν να παράγουν, να αποθηκεύουν και να διαθέτουν ενέργεια στο δίκτυο (International Energy Agency (IEA), 2021).

Ο ρόλος των HEMS είναι καθοριστικός, καθώς λειτουργούν ως ο ενδιάμεσος μηχανισμός που διασφαλίζει την ομαλή και βέλτιστη αλληλεπίδραση μεταξύ οικιακών ενεργειακών συστημάτων και του κεντρικού δικτύου. Μέσα από εξελιγμένους αλγόριθμους πρόβλεψης, βελτιστοποίησης και τεχνητής νοημοσύνης, τα HEMS είναι σε θέση να αποφασίζουν πότε είναι προτιμότερο να καταναλώνεται η ενέργεια, πότε να αποθηκεύεται σε μπαταρίες και πότε να διοχετεύεται πίσω στο δίκτυο για εμπορική ή κοινωνική αξιοποίηση (J. Wang, Li, κ.ά., 2021).

Επιπλέον, η διασύνδεση με το δίκτυο καθιστά εφικτά νέα μοντέλα συμμετοχής, όπως η ενεργός εμπλοκή των καταναλωτών (active consumer participation) μέσω μηχανισμών demand response και net metering, τα οποία εφαρμόζονται ήδη σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες (European Commission, 2019). Με αυτόν τον τρόπο, τα HEMS μετατρέπονται από «οικιακούς διαχειριστές κατανάλωσης» σε κρίσιμους κόμβους του ενεργειακού οικοσυστήματος, ικανούς να ενισχύσουν τη σταθερότητα, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα του ηλεκτρικού δικτύου (Caramizaru & Uihlein, 2020).

2.4.2 Κρίσιμες Έννοιες

Η διασύνδεση των HEMS με το ηλεκτρικό δίκτυο δεν μπορεί να κατανοηθεί πλήρως χωρίς την ανάλυση ορισμένων θεμελιωδών εννοιών που διαμορφώνουν το σύγχρονο ενεργειακό τοπίο (Palensky κ.ά., 2021).

Οι έννοιες αυτές αποτυπώνουν τη μετάβαση από ένα κεντρικά ελεγχόμενο, μονοκατευθυντικό ενεργειακό μοντέλο, σε ένα δυναμικό και αποκεντρωμένο πλαίσιο, όπου ο ρόλος του τελικού χρήστη αλλάζει ριζικά.

Prosumers

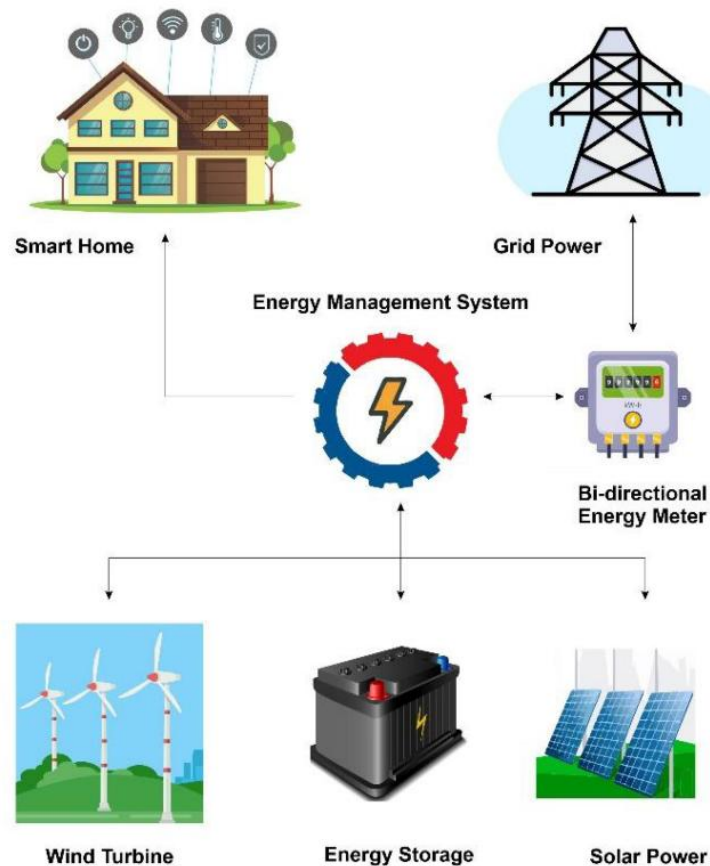
Ο όρος prosumer (producer + consumer) περιγράφει τον καταναλωτή που δεν περιορίζεται μόνο στη χρήση ενέργειας, αλλά ταυτόχρονα την παράγει, κυρίως μέσω μικρής κλίμακας ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης.

Οι prosumers βρίσκονται στο επίκεντρο της ενεργειακής μετάβασης, καθώς ενισχύουν την αποκέντρωση της παραγωγής και μειώνουν την εξάρτηση από κεντρικούς σταθμούς.

Τα HEMS διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διαχείριση της διπλής αυτής ιδιότητας, ελέγχοντας σε πραγματικό χρόνο την κατανάλωση και την παραγωγή, εξισορροπώντας τις ανάγκες του νοικοκυριού και τις απαιτήσεις του δικτύου. Έτσι, οι prosumers μπορούν να βελτιστοποιούν την ιδιοκατανάλωση, να συμμετέχουν σε μηχανισμούς αποθήκευσης και να διαθέτουν την πλεονάζουσα ενέργεια είτε στην αγορά είτε σε γειτονικά νοικοκυριά (Parag & Sovacool, 2016).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 12: Ροές ενέργειας Prosumer μέσω HEMS

Σύνδεση κατοικίας με ΑΠΕ, αποθήκευση και δίκτυο

Παράδειγμα:

Στη Γερμανία, το πρόγραμμα **Energieavantgarde Anhalt** έχει αναδείξει τον ρόλο των prosumers στη δημιουργία τοπικών ενεργειακών αγορών. Στην Ελλάδα, μέσω του θεσμού του «εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού», οι prosumers μπορούν να συμψηφίζουν την παραγωγή τους με καταναλώσεις σε διαφορετικά σημεία, με τα HEMS να καθίστανται κρίσιμο εργαλείο παρακολούθησης και βελτιστοποίησης αυτών των ροών (Hellenic Ministry of Energy, 2021).

Net Metering

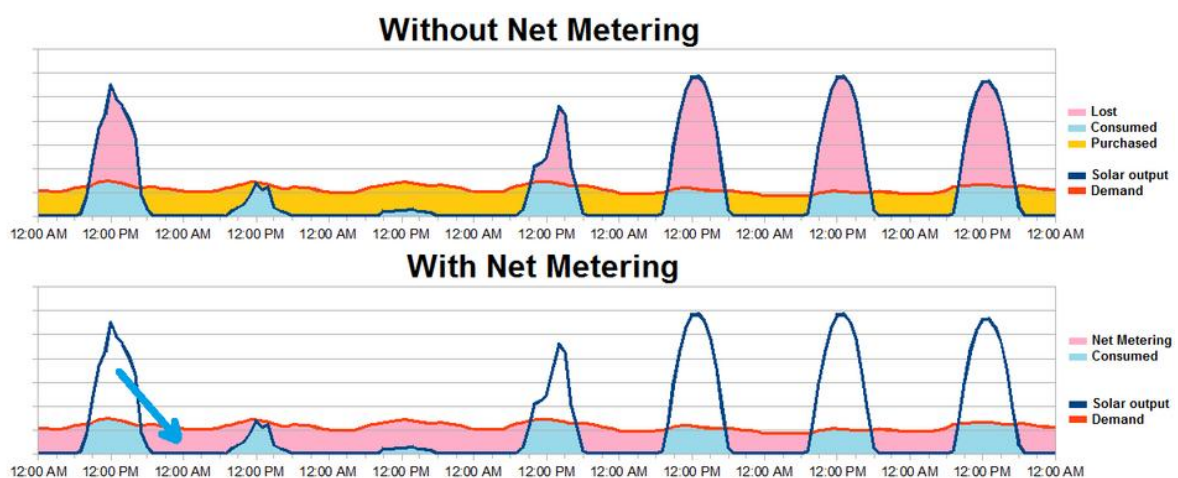
Το net metering αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες πολιτικές προώθησης της αυτοπαραγωγής. Μέσω του συμψηφισμού της ενέργειας, επιτρέπει στους μικροπαραγωγούς

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

να αξιοποιούν πλήρως την επένδυσή τους σε ΑΠΕ (European Commission, 2019). Τα HEMS εμπλουτίζουν τον μηχανισμό αυτό:

- Συνυπολογίζουν δεδομένα καιρού για την πρόβλεψη παραγωγής,
- Προσαρμόζουν την κατανάλωση βάσει του κόστους αγοράς ενέργειας,
- Υποστηρίζουν στρατηγικές *load shifting*, όπως η μεταφορά κατανάλωσης σε ώρες υψηλής ηλιοφάνειας (J. Wang, Li, κ.ά., 2021).

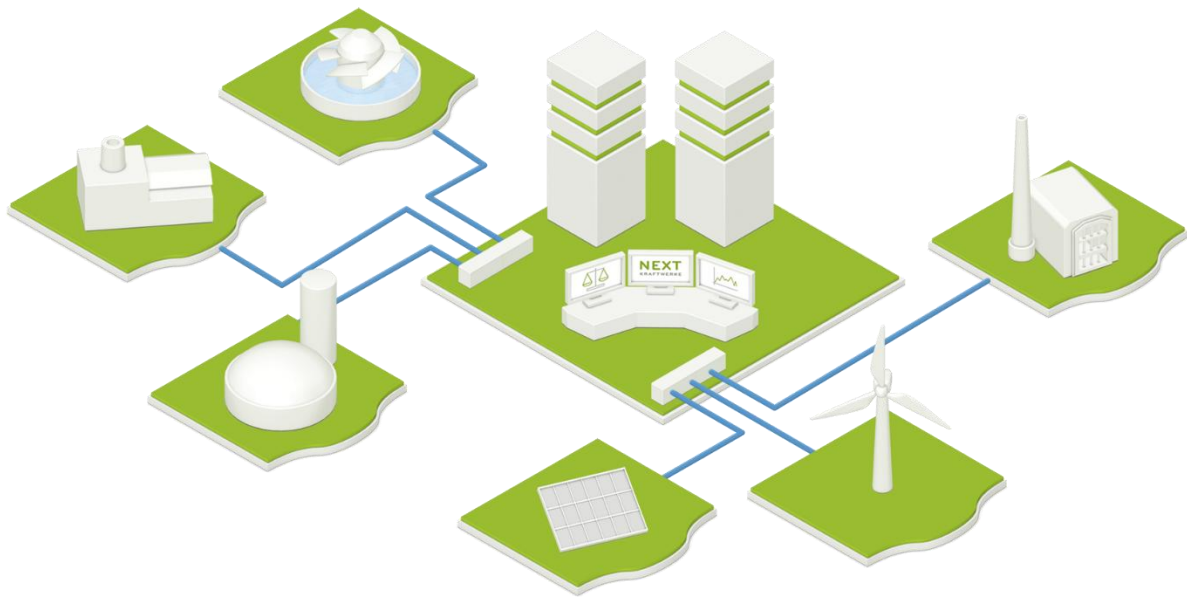


Εικόνα 13: Απεικόνιση του μηχανισμού συμψηφισμού (net metering)

Παράδειγμα: Στην Ιταλία εφαρμόζεται το σύστημα Scambio sul Posto, που έχει οδηγήσει χιλιάδες νοικοκυριά σε επενδύσεις ΑΠΕ (IEA, 2020). Στην Ελλάδα, το net metering έχει συμβάλει στην εκρηκτική ανάπτυξη μικρών φωτοβολταϊκών, με τα HEMS να καθιστούν τον συμψηφισμό πιο αποδοτικό και αυτοματοποιημένο.

Virtual Power Plants (VPPs)

Τα Virtual Power Plants (VPPs) αποτελούν μια από τις πιο καινοτόμες μορφές οργάνωσης της αποκεντρωμένης παραγωγής. Μέσω ψηφιακών πλατφορμών, οι διασκορπισμένες μονάδες ΑΠΕ, αποθήκευσης και ευέλικτων φορτίων συντονίζονται ώστε να λειτουργούν ως ενιαία οντότητα (Kremers, Vieira, κ.ά., 2020).



Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση Εικονικού Σταθμού Παραγωγής (Virtual Power Plant)

Παράδειγμα: Στη Γερμανία, το Next Kraftwerke συνδέει πάνω από 10.000 αποκεντρωμένες μονάδες (φωτοβολταϊκά, αιολικά, βιομάζα, μπαταρίες) σε ένα από τα μεγαλύτερα VPPs στην Ευρώπη.

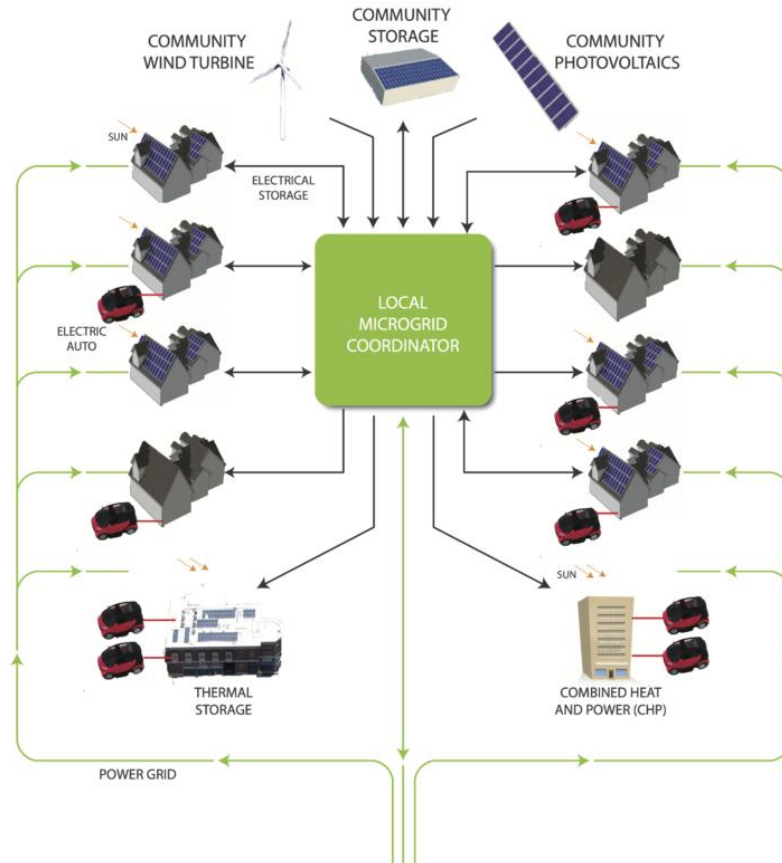
Στην Ολλανδία, το έργο PowerMatching City απέδειξε πως τα VPPs μπορούν να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση σε επίπεδο γειτονιάς, με τα HEMS να ρυθμίζουν συσκευές, ηλεκτρικά οχήματα και αποθήκευση, ενισχύοντας τη συνολική σταθερότητα.

Energy Communities

Οι ενεργειακές κοινότητες συνιστούν μια κοινωνικο-οικονομική και τεχνολογική καινοτομία, θεσμοθετημένη στην ΕΕ με την οδηγία RED II .

Αποτελούν συλλογικά σχήματα πολιτών, δήμων ή μικρών επιχειρήσεων που συνεργάζονται για την παραγωγή, κατανάλωση, αποθήκευση και ανταλλαγή ενέργειας (Caramizaru & Uihlein, 2020).

MICROGRID



Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση ενεργειακής κοινότητας – διασύνδεση κατοικιών με HEMS, αποθήκευση και ΑΠΕ μέσω μικροδικτύου

Παράδειγμα: Στην Ελλάδα, ενεργειακές κοινότητες στην Κρήτη συνδυάζουν φωτοβολταϊκά, αποθήκευση και HEMS για την αντιμετώπιση ενεργειακής φτώχειας.

Στην Ισπανία, η Som Energia αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα συνεργατικά εγχειρήματα ΑΠΕ στην Ευρώπη, με τα HEMS να επιτρέπουν peer-to-peer συναλλαγές και δίκαιο επιμερισμό ενέργειας.

2.4.3 Σενάρια Εφαρμογής (Ελλάδα – Ευρώπη)

Η μετάβαση προς ένα αποκεντρωμένο, έξυπνο και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα δεν μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς συγκεκριμένες εφαρμογές που αποδεικνύουν στην πράξη τον ρόλο των HEMS. Στο ευρωπαϊκό περιβάλλον, η σύζευξη μεταξύ τεχνολογικών λύσεων και ρυθμιστικών παρεμβάσεων δημιουργεί ένα μωσαϊκό σεναρίων, όπου τα HEMS λειτουργούν ως βασικοί επιταχυντές της ενεργειακής μετάβασης (Cruz-De-Jesús κ.ά., 2024; Taromboli κ.ά., 2025a).

Ελλάδα: Συμψηφισμός, Αποθήκευση και Ενεργειακές Κοινότητες

Στην Ελλάδα, το νομικό πλαίσιο του net metering αποτέλεσε το εφαλτήριο για την υιοθέτηση φωτοβολταϊκών σε οικιακό και μικρομεσαίο επίπεδο. Ο ρόλος των HEMS εδώ είναι πολυδιάστατος: ανάλυση προφίλ κατανάλωσης, αυτοματοποιημένος έλεγχος φορτίων και διασύνδεση με μπαταρίες για αύξηση του ποσοστού ιδιοκατανάλωσης (Parreño-Rodríguez κ.ά., 2023a).

Σημαντική είναι και η συμβολή των ενεργειακών κοινοτήτων. Σε περιοχές με ασθενές δίκτυο, τα HEMS καθίστανται εργαλεία για κατανομή παραγόμενης ενέργειας με δίκαιους αλγορίθμους, peer-to-peer ανταλλαγή και ενίσχυση της ανθεκτικότητας μέσω μικροδικτύων (Taromboli κ.ά., 2025a).

Γερμανία: Virtual Power Plants και Έξυπνα Δίκτυα

Η Γερμανία πρωτοπορεί με τα Virtual Power Plants (VPPs), που αποτελούν συνδυασμό χιλιάδων μικροπαραγωγών, αποθηκευτικών μονάδων και ευέλικτων φορτίων. Η συμβολή των HEMS εδώ είναι κομβική: διαχείριση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, συμμετοχή σε αγορές εξισορρόπησης και συγχρονισμός με αλγορίθμους AI (Marinescu κ.ά., 2021).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Next Kraftwerke, το οποίο επιτυγχάνει ισχύ συγκρίσιμη με μεγάλες θερμικές μονάδες, αποδεικνύοντας ότι οι HEMS-ενεργοποιημένοι prosumers μπορούν να λειτουργούν ως εικονικοί σταθμοί παραγωγής (Next Kraftwerke GmbH, χ.χ.).

Ολλανδία: PowerMatching City και Ενεργειακές Γειτονιές

Το ολλανδικό έργο PowerMatching City είναι το πρώτο που απέδειξε την πρακτική αξία των HEMS σε ενεργειακές γειτονιές. Στο πιλοτικό αυτό μικροδίκτυο, τα HEMS κάθε κατοικίας προγραμματίζουν φορτία, επέτρεπαν V2H λειτουργίες και συντόνιζαν παραγωγή και αποθήκευση με στόχο τη μέγιστη τοπική αξιοποίηση ενέργειας (Bliek κ.ά., 2010).

Αποτέλεσμα ήταν μείωση των αιχμών ζήτησης και βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου, επιβεβαιώνοντας ότι τα HEMS μπορούν να αποτελέσουν τη «γέφυρα» ανάμεσα σε μικροδίκτυα και το κεντρικό grid.

Ισπανία: Κοινωνική Καινοτομία μέσω HEMS

Η Som Energia στην Ισπανία δείχνει πώς οι HEMS δεν είναι μόνο τεχνολογικές λύσεις, αλλά και μέσα κοινωνικής ενδυνάμωσης. Εφαρμόζονται για peer-to-peer συναλλαγές ενέργειας, συλλογικό έλεγχο αποθήκευσης και αύξηση της διαφάνειας μέσω blockchain (Gallego-Castillo κ.ά., 2020).

Το μοντέλο αυτό δίνει έμφαση στην ενεργειακή δημοκρατία, αποδεικνύοντας ότι τα HEMS μπορούν να λειτουργούν ως καταλύτες κοινωνικής συνοχής.

Συγκριτική Αποτίμηση και Σύνδεση με το Θεωρητικό Πλαίσιο

Συνδυάζοντας τα παραπάνω: η Ελλάδα δείχνει τον ρόλο των HEMS σε net metering και ενεργειακές κοινότητες, η Γερμανία επιβεβαιώνει τη σημασία τους στα VPPs, η Ολλανδία αποδεικνύει τη λειτουργία τους σε ενεργειακές γειτονιές, ενώ η Ισπανία αναδεικνύει την κοινωνική διάσταση μέσω συνεταιριστικών σχημάτων.

Η διαφοροποίηση αυτή αποδεικνύει ότι η επιτυχία των HEMS εξαρτάται όχι μόνο από την τεχνολογία, αλλά και από το ρυθμιστικό πλαίσιο και την κοινωνική συμμετοχή (Parreño-Rodríguez κ.ά., 2023b; Taromboli κ.ά., 2025b).

2.4.4 Μελλοντικές Τάσεις Διασύνδεσης HEMS–Grid

Η διασύνδεση των Home Energy Management Systems (HEMS) με το ηλεκτρικό δίκτυο βρίσκεται σε φάση ραγδαίας εξέλιξης, καθώς η ενεργειακή μετάβαση απαιτεί ολοένα και πιο έξυπνες, αποκεντρωμένες και προσαρμοστικές λύσεις. Οι μελλοντικές τάσεις επικεντρώνονται σε τέσσερις βασικούς άξονες: τεχνολογική καινοτομία, ευρωπαϊκή

ρυθμιστική στρατηγική, ενσωμάτωση νέων ενεργειακών φορέων και κοινωνικο-οικονομικές προεκτάσεις (Parreño-Rodríguez κ.ά., 2023b; Taromboli κ.ά., 2025b).

Vehicle-to-Grid (V2G) και Vehicle-to-Home (V2H)

Η ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) δημιουργεί νέες δυνατότητες για τα HEMS. Τα EVs, εκτός από καταναλωτές, μπορούν να λειτουργούν ως φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας:

- Vehicle-to-Grid (V2G): τα EVs τροφοδοτούν το δίκτυο με ενέργεια σε περιόδους αιχμής, μειώνοντας την ανάγκη για κεντρική εφεδρεία.
- Vehicle-to-Home (V2H): τα EVs μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες ενός νοικοκυριού σε περιπτώσεις διακοπής ή υψηλών τιμών.

Τα HEMS θα αποτελούν τον κόμβο που θα αποφασίζει σε πραγματικό χρόνο πότε το όχημα θα φορτίζει, πότε θα τροφοδοτεί το σπίτι και πότε θα συμμετέχει σε μηχανισμούς αγοράς ενέργειας (Parreño-Rodríguez κ.ά., 2023b)

Τεχνητή Νοημοσύνη και Προβλεπτικοί Αλγόριθμοι

Οι εξελίξεις στην τεχνητή νοημοσύνη (AI) και στη μηχανική μάθηση επιτρέπουν στα HEMS να μετατραπούν σε προβλεπτικά και αυτοματοποιημένα συστήματα. Η χρήση big data (καιρικά δεδομένα, ιστορικά προφίλ κατανάλωσης, τιμές αγοράς) θα ενισχύσει:

- Βελτιστοποίηση κατανομής φορτίου σε πραγματικό χρόνο.
- Δυναμική συμμετοχή σε αγορές ενέργειας με αυτόματη ανταπόκριση σε τιμές.
- Μάθηση συμπεριφοράς χρηστών ώστε τα HEMS να λειτουργούν εξατομικευμένα.

Η μετάβαση από συστήματα «rule-based» σε ευφυή συστήματα πρόβλεψης αναμένεται να αυξήσει την αποδοτικότητα και να μειώσει το ενεργειακό κόστος για τους καταναλωτές (Marinescu κ.ά., 2021)

Blockchain και Peer-to-Peer Ενεργειακό Εμπόριο

Μια από τις πιο καινοτόμες τάσεις είναι η αξιοποίηση του blockchain για αποκεντρωμένες ενεργειακές συναλλαγές. Μέσω peer-to-peer (P2P) πλατφορμών, οι prosumers θα μπορούν να πουλούν και να αγοράζουν ενέργεια άμεσα, χωρίς τη διαμεσολάβηση κεντρικών φορέων.

Τα HEMS θα συνδέονται με αυτές τις πλατφόρμες για:

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Αυτόματη καταγραφή και εκκαθάριση συναλλαγών.
- Διαφάνεια και ασφάλεια στη διαχείριση ενέργειας.
- Ενίσχυση ενεργειακών κοινοτήτων με τοπικές αγορές.

Η χρήση έξυπνων συμβολαίων (smart contracts) θα επιτρέψει την αυτόματη εφαρμογή κανόνων διαμοιρασμού ενέργειας (Cruz-De-Jesús κ.ά., 2024)

Ευρωπαϊκή Στρατηγική για Smart Grids και HEMS

Η ΕΕ, μέσω της Οδηγίας για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (RED II) και της στρατηγικής για την Ψηφιακή Ενεργειακή Ένωση, ενισχύει τη διεύθυνση έξυπνων δικτύων.

Οι HEMS αναγνωρίζονται ως κομβικά εργαλεία για:

- Ευρωπαϊκά προγράμματα πιλοτικών μικροδικτύων (Horizon Europe, Smart Grids Task Force).
- Διεύθυνση ΑΠΕ > 50% στο ενεργειακό μείγμα χωρίς απώλεια αξιοπιστίας.
- Δημιουργία ενεργειακών κοινοτήτων με διασυνοριακή διάσταση.

Η πολιτική αυτή προσανατολίζει τα HEMS όχι μόνο ως τεχνολογικά συστήματα αλλά και ως εργαλεία ενεργειακής δημοκρατίας και ενεργού συμμετοχής των πολιτών (Taromboli κ.ά., 2025b)

Συνολική Προοπτική

Οι μελλοντικές τάσεις δείχνουν ότι τα HEMS θα εξελιχθούν από «οικιακούς διαχειριστές ενέργειας» σε ψηφιακούς ενεργειακούς κόμβους που θα συνδέουν νοικοκυριά, κοινότητες και δίκτυα σε ένα ενιαίο οικοσύστημα. Ο συνδυασμός V2G, AI, blockchain και ευρωπαϊκών στρατηγικών θα καθορίσει την επιτυχία της μετάβασης σε βιώσιμα και αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα.

2.5 Ενεργειακή Απόδοση και Οικονομική Βιωσιμότητα

Η ενεργειακή απόδοση και η οικονομική βιωσιμότητα των Home Energy Management Systems (HEMS) αποτελούν δύο από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών στα σύγχρονα νοικοκυριά (J. Wang, Zhou, κ.ά., 2021)

Τα HEMS δεν είναι απλώς εργαλεία διαχείρισης ενέργειας· αποτελούν ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα βελτιστοποίησης κατανάλωσης, το οποίο επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή φορτίου, την έξυπνη εκμετάλλευση της ανανεώσιμης ενέργειας και τη μείωση των δαπανών ηλεκτρικής ενέργειας (Y. Zhou κ.ά., 2020)

Η οικονομική βιωσιμότητα των HEMS εξαρτάται από την απόσβεση της επένδυσης, τα οικονομικά κίνητρα που προσφέρονται από κράτη και οργανισμούς και τη γενικότερη συμβολή τους στη μείωση του ενεργειακού κόστους. Με την αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και τις διακυμάνσεις στις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος, η χρήση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων γίνεται ολοένα και πιο σημαντική για την οικονομία των νοικοκυριών και τη βιωσιμότητα του ενεργειακού δικτύου.

Σε αυτή την ενότητα, θα εξεταστούν οι τεχνικές και στρατηγικές που εφαρμόζουν τα HEMS για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, οι μέθοδοι μείωσης του κόστους ενέργειας, καθώς και τα οικονομικά κίνητρα που διευκολύνουν την υιοθέτησή τους.

2.5.1 Δυνατότητες Μείωσης Ενεργειακού Κόστους μέσω HEMS

Η μείωση του ενεργειακού κόστους μέσω των HEMS επιτυγχάνεται με συνδυασμό τεχνολογικών και στρατηγικών μεθόδων. Αντί να βασίζονται αποκλειστικά στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα HEMS συνδυάζουν πολλαπλές τεχνικές εξοικονόμησης, οι οποίες περιλαμβάνουν βελτιστοποίηση κατανάλωσης, αυτοματοποίηση φορτίου, δυναμική τιμολόγηση και διαχείριση αποθήκευσης ενέργειας.

2.5.1.1 Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Κατανάλωσης Ενέργειας

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των HEMS είναι η ικανότητά τους να αναλύουν σε βάθος τη συμπεριφορά κατανάλωσης ενέργειας σε ένα νοικοκυριό. Μέσω έξυπνων αισθητήρων και μετρητών, τα HEMS παρέχουν αναλυτικά δεδομένα κατανάλωσης για κάθε ηλεκτρική συσκευή, επιτρέποντας τον εντοπισμό ενεργοβόρων συσκευών και περιττών απωλειών.

Η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης περιλαμβάνει:

- Προσαρμογή της χρήσης των ηλεκτρικών συσκευών με βάση τις ώρες χαμηλής τιμολόγησης.

- Αυτόματη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση συσκευών βάσει πραγματικής ανάγκης και προτύπων κατανάλωσης.
- Ανίχνευση ενεργειακών απωλειών και προτάσεις αντικατάστασης παλαιών ή αναποτελεσματικών συσκευών.

Παράδειγμα:

Ένα HEMS που παρακολουθεί ένα σπίτι μπορεί να αναγνωρίσει ότι ο θερμοσίφωνας καταναλώνει υπερβολική ενέργεια λόγω συνεχούς λειτουργίας. Το σύστημα μπορεί να προτείνει είτε τη χρήση έξυπνης χρονοπρογραμματισμένης λειτουργίας, είτε την αντικατάστασή του με ένα ενεργειακά αποδοτικότερο μοντέλο.

2.5.1.2 Διαχείριση Δυναμικής Τιμολόγησης και Αυτοματοποιημένος Προγραμματισμός Συσκευών

Οι περισσότεροι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόζουν δυναμικά τιμολόγια, στα οποία η τιμή του ρεύματος μεταβάλλεται ανάλογα με τη ζήτηση και την ώρα της ημέρας. Τα HEMS μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτά τα τιμολόγια, βελτιστοποιώντας τη χρήση ηλεκτρικών φορτίων στις περιόδους που το κόστος είναι χαμηλότερο.

Παράδειγμα:

Ένα HEMS μπορεί να προγραμματίσει αυτόματα τη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος μεταξύ 12:00 π.μ. - 6:00 π.μ., όταν οι χρεώσεις είναι χαμηλότερες, μειώνοντας το κόστος φόρτισης έως και 40% (Centrica plc, 2022b).

2.5.1.3 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Διαχείριση Αποθήκευσης

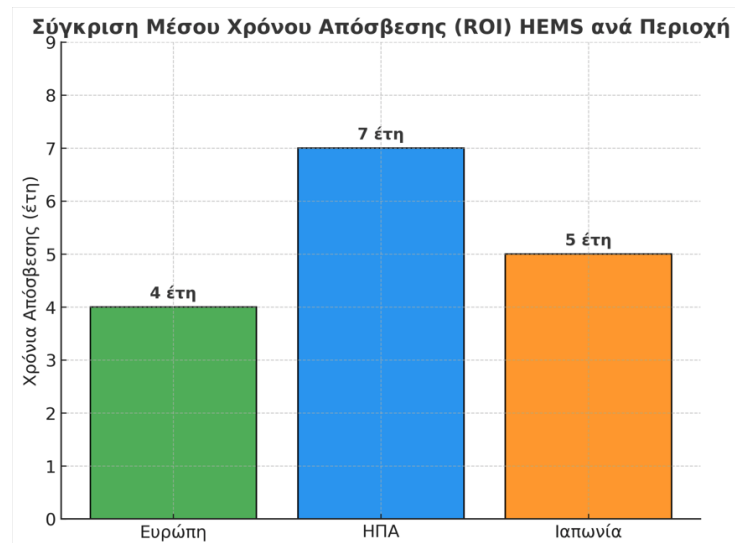
Η χρήση ηλιακής ενέργειας ή άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση κόστους, ιδιαίτερα σε νοικοκυριά που έχουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Kakran, Chanana, κ.ά., 2021).

Παράδειγμα:

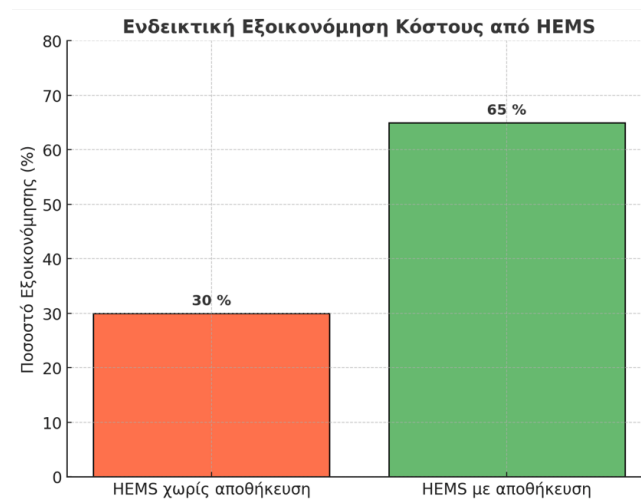
Σε ένα σπίτι με ηλιακούς συλλέκτες και σύστημα αποθήκευσης Tesla Powerwall, το HEMS μπορεί να ρυθμίζει πότε να χρησιμοποιήσει αποθηκευμένη ενέργεια και πότε να τροφοδοτήσει το δίκτυο, μειώνοντας το κόστος ενέργειας κατά 50–70% (Tesla Inc., 2023).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 16: Σύγκριση μέσου χρόνου απόσβεσης (ROI) HEMS ανά περιοχή – προσαρμογή από Kakran & Chanana (2021)



Εικόνα 17: Ενδεικτική εξοικονόμηση κόστους από HEMS με και χωρίς αποθήκευση – προσαρμογή από Tesla (2023)

2.5.2 Παροχές και Κίνητρα για τους Καταναλωτές

Η υιοθέτηση των HEMS μπορεί να επιταχυνθεί μέσω οικονομικών κινήτρων, όπως κρατικές επιδοτήσεις, προγράμματα ενεργειακής αναβάθμισης και φορολογικές εκπτώσεις.

Κρατικές Επιδόσεις και Προγράμματα Στήριξης

Παράδειγμα:

- Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, προγράμματα όπως το Horizon 2020 χρηματοδοτούν έργα έξυπνης ενεργειακής διαχείρισης (European Commission, 2020a).
- Στις ΗΠΑ, επιδοτήσεις προσφέρονται μέσω του Energy Star Home Upgrade για εγκατάσταση HEMS (U.S. Department of Energy (DOE), 2021, σελ. 202).

Επιστροφή Επένδυσης (ROI) και Οικονομική Βιωσιμότητα

Η επένδυση σε ένα HEMS μπορεί να αποδώσει οικονομικά μέσα σε 3–7 χρόνια, μειώνοντας τα λειτουργικά έξοδα του νοικοκυριού (Q. Liu κ.ά., 2022).

Παράδειγμα:

Ένα σπίτι που επενδύει σε έξυπνα ενεργειακά συστήματα και φωτοβολταϊκά μπορεί να εξοικονομήσει έως 800 € ετησίως, επιτυγχάνοντας πλήρη απόσβεση της επένδυσης σε 5–6 χρόνια (Y. Zhou κ.ά., 2020).

Κεφάλαιο 3: Ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης και Προηγμένων Αλγορίθμων στα HEMS

Η εμπορική διάσταση των Home Energy Management Systems (HEMS) αποτελεί τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στη θεωρητική έρευνα και στην πραγματική εφαρμογή τους στα νοικοκυριά και στις επιχειρήσεις. Ενώ τα προηγούμενα κεφάλαια ανέδειξαν την τεχνολογική βάση των HEMS – από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας έως τη διασύνδεσή τους με το ηλεκτρικό δίκτυο – στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεκριμένες λύσεις της αγοράς που έχουν ήδη αναπτυχθεί και διαδοθεί διεθνώς.

Οι λύσεις αυτές διαφοροποιούνται ως προς:

Την τεχνολογική τους προσέγγιση (AI-driven, IoT-enabled, cloud-based), το επιχειρηματικό τους μοντέλο (αυτονομία χρήστη, συνεργασία με παρόχους ενέργειας, συμμετοχή σε ενεργειακές κοινότητες), και την ενσωμάτωσή τους σε έξυπνα δίκτυα και αποκεντρωμένα ενεργειακά οικοσυστήματα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν πλατφόρμες όπως το Tiko, που δίνει έμφαση στη συλλογική διαχείριση ενέργειας, το Bosch Smart Home, που συνδέει HEMS με οικιακό αυτοματισμό, ή το Sonnen, που προωθεί ενεργειακές κοινότητες μέσω λύσεων αποθήκευσης.

Η ανάλυση αυτών των εμπορικών λύσεων δεν περιορίζεται σε περιγραφικό επίπεδο· στοχεύει στη συγκριτική αξιολόγηση πλεονεκτημάτων, περιορισμών και μελλοντικών προοπτικών. Με αυτόν τον τρόπο, η επισκόπηση αποκτά χαρακτήρα State-of-the-Art (SoTA), αναδεικνύοντας την κατεύθυνση που παίρνει η αγορά και τη σύνδεσή της με την ακαδημαϊκή και τεχνολογική πρόοδο στον τομέα των HEMS.

3.1 Επισκόπηση της Χρήσης της Τεχνητής Νοημοσύνης στα HEMS

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI) έχει αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα σύγχρονα νοικοκυριά. Τα Home Energy Management Systems (HEMS) εξελίσσονται πέρα από τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου και πλέον βασίζονται σε έξυπνους αλγόριθμους, μηχανική μάθηση και μεγάλα δεδομένα, προκειμένου να λαμβάνουν αυτόνομες αποφάσεις και να προσαρμόζουν δυναμικά τη λειτουργία τους (Vázquez-Canteli & Nagy, 2019).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

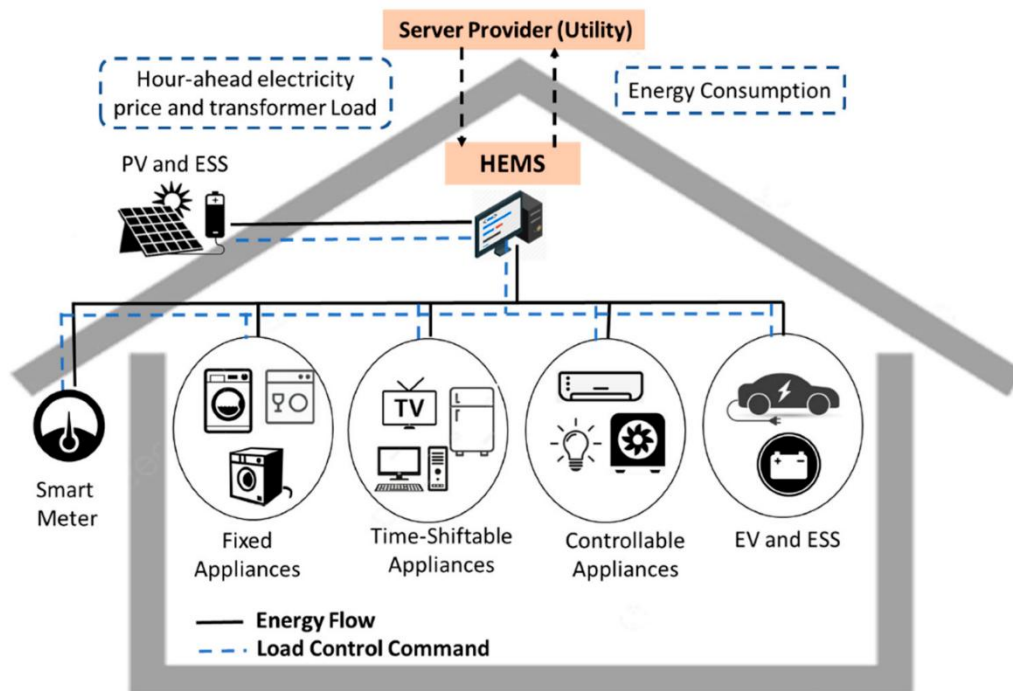
Στα συμβατικά ενεργειακά συστήματα, οι χρήστες καθόριζαν χειροκίνητα τον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ανάγκες τους και την ωριαία χρέωση του ρεύματος. Ωστόσο, η ΑΙ επιτρέπει ευφυή ενεργειακή διαχείριση, με συστήματα που μπορούν να:

- Αναλύουν και προβλέπουν την κατανάλωση ενέργειας, βασισμένα σε ιστορικά δεδομένα και εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες και η δυναμική τιμολόγηση του ρεύματος (Khosravi κ.ά., 2021)
- Ανιχνεύουν αναποτελεσματικές πρακτικές χρήσης, όπως συσκευές που λειτουργούν χωρίς λόγο ή καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από το κανονικό.
- Προσαρμόζουν τη λειτουργία ηλεκτρικών φορτίων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τη βέλτιστη χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή αποθηκευμένη ενέργεια από μπαταρίες (H. Li κ.ά., 2022)
- Αλληλεπιδρούν με το ηλεκτρικό δίκτυο, ανταποκρινόμενα στη ζήτηση και την προσφορά ενέργειας, συμμετέχοντας ακόμα και σε συστήματα Vehicle-to-Grid (V2G) (Marinescu κ.ά., 2021).

Η χρήση ΑΙ στα HEMS επιτρέπει την ανάπτυξη ευφών ενεργειακών οικοσυστημάτων, στα οποία η κατανάλωση δεν ελέγχεται απλά από τους χρήστες, αλλά βελτιστοποιείται αυτόνομα με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους και τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης (Cruz-De-Jesús κ.ά., 2024).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 18: Χρήση τεχνητής νοημοσύνης σε HEMS – συλλογή δεδομένων, ανάλυση με αλγορίθμους και αυτόνομη βελτιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας

3.1.1 Πώς η Τεχνητή Νοημοσύνη Αλλάζει τη Διαχείριση Ενέργειας

Η ενσωμάτωση της AI στα HEMS βασίζεται σε τρεις βασικές λειτουργίες: ανάλυση δεδομένων, πρόβλεψη ενεργειακής ζήτησης και αυτόνομη διαχείριση φορτίων.

Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων και Μοτίβα Κατανάλωσης

Τα σύγχρονα HEMS είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες IoT, έξυπνους μετρητές και λογισμικά ανάλυσης δεδομένων, που καταγράφουν και επεξεργάζονται συνεχώς πληροφορίες για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η AI μπορεί να αναλύσει αυτά τα δεδομένα και να εντοπίσει επαναλαμβανόμενα μοτίβα χρήσης (Palensky & Dietrich, 2011) όπως:

- Ποιες ώρες της ημέρας καταναλώνεται η περισσότερη ενέργεια.
- Ποιες συσκευές ευθύνονται για τη μεγαλύτερη κατανάλωση.
- Πώς η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η τιμή του ρεύματος.

Παράδειγμα:

Ένα σύστημα ΑΙ μπορεί να διαπιστώσει ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι αυξημένη κάθε βράδυ από 7:00 μ.μ. έως 10:00 μ.μ., λόγω της ταυτόχρονης λειτουργίας πολλών συσκευών (π.χ. τηλεόραση, ηλεκτρική κουζίνα, φωτισμός). Το HEMS μπορεί να προτείνει λύσεις εξοικονόμησης, όπως η μετατόπιση της λειτουργίας ορισμένων φορτίων σε ώρες χαμηλότερης ζήτησης (Stojkoska & Trivodaliev, 2017).

Πρόβλεψη Ενεργειακής Ζήτησης και Προσαρμογή Κατανάλωσης

Η ΑΙ μπορεί να προβλέψει τη μελλοντική ενεργειακή ζήτηση, βασισμένη σε ιστορικά δεδομένα, εξωτερικές συνθήκες και μοτίβα χρήσης (Vázquez-Canteli & Nagy, 2019). Αυτό επιτρέπει στα HEMS να προγραμματίζουν πότε θα χρησιμοποιήσουν ενέργεια από το δίκτυο, πότε θα αντλήσουν από τις μπαταρίες και πότε θα αξιοποιήσουν ανανεώσιμες πηγές.

Παράδειγμα:

Ένα σύστημα ΑΙ μπορεί να προβλέψει ότι η επόμενη εβδομάδα θα έχει αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Έτσι, το HEMS μπορεί να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες τις ημέρες που υπάρχει φθηνή ενέργεια, να προσαρμόσει τη θέρμανση ώστε να λειτουργεί αποδοτικά και να προγραμματίσει τη λειτουργία συσκευών σε ώρες που οι χρεώσεις είναι χαμηλότερες (Paterakis κ.ά., 2017).

Αυτόνομη Διαχείριση Φορτίων και Βελτιστοποίηση Κατανάλωσης

Ένα σύστημα ΑΙ μπορεί να προβλέψει ότι η επόμενη εβδομάδα θα έχει αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Έτσι, το HEMS μπορεί να φορτίσει πλήρως τις μπαταρίες τις ημέρες που υπάρχει φθηνή ενέργεια, να προσαρμόσει τη θέρμανση ώστε να λειτουργεί αποδοτικά και να προγραμματίσει τη λειτουργία συσκευών σε ώρες που οι χρεώσεις είναι χαμηλότερες (Paterakis κ.ά., 2017).

Παράδειγμα:

Ένα έξυπνο HEMS μπορεί να διαπιστώσει ότι η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος θα αυξηθεί σημαντικά το βράδυ. Αντί να αντλήσει ενέργεια από το δίκτυο, μπορεί να ενεργοποιήσει τη λειτουργία αποθήκευσης και να χρησιμοποιήσει την αποθηκευμένη ενέργεια από μπαταρίες, να καθυστερήσει τη φόρτιση συσκευών που δεν χρειάζονται άμεση

χρήση (π.χ. ηλεκτρικό όχημα) και να στείλει ειδοποίηση στον χρήστη, προτείνοντας μείωση της κατανάλωσης σε συγκεκριμένες ώρες (H. Li κ.ά., 2022).

3.1.2 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις της Χρήσης AI στα HEMS

Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI) στα Home Energy Management Systems (HEMS) ανοίγει νέους δρόμους για αποδοτικότερη, πιο ευέλικτη και βιώσιμη ενεργειακή διαχείριση. Παράλληλα, όμως, δημιουργεί και μια σειρά προκλήσεων που απαιτούν προσεκτική αντιμετώπιση.

Πλεονεκτήματα

Μείωση κόστους: Οι αλγόριθμοι AI εντοπίζουν ευκαιρίες για μετατόπιση φορτίων (load shifting) και αξιοποίηση δυναμικών τιμολογίων, επιτρέποντας σημαντική εξοικονόμηση στο ενεργειακό κόστος (Vázquez-Canteli & Nagy, 2019).

Ενεργειακή αυτονομία: Μέσω συνδυασμού με αποθήκευση και ΑΠΕ, τα AI-driven HEMS μειώνουν την εξάρτηση από το δίκτυο, ενισχύοντας την ενεργειακή αυτάρκεια των νοικοκυριών (H. Li κ.ά., 2022).

Πρόβλεψη και προσαρμογή: Η AI μετατρέπει τη διαχείριση από αντιδραστική σε προληπτική, προβλέποντας τη ζήτηση και ρυθμίζοντας ανάλογα τη λειτουργία των συσκευών, κάτι που βελτιώνει την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα (Khosravi κ.ά., 2021).

Σταθερότητα δικτύου: Προηγμένοι αλγόριθμοι βελτιώνουν την ενσωμάτωση ΑΠΕ, εξισορροπώντας προσφορά και ζήτηση, και συμβάλλουν στη συνολική σταθερότητα του ηλεκτρικού συστήματος (Cruz-De-Jesús κ.ά., 2024).

Προκλήσεις

Ποιότητα δεδομένων: Η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων εξαρτάται από την ακρίβεια και πληρότητα των δεδομένων. Ανακριβείς ή ελλιπείς μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένες αποφάσεις (Palensky & Dietrich, 2011).

Ιδιωτικότητα και ασφάλεια: Η λεπτομερής παρακολούθηση κατανάλωσης αποκαλύπτει καθημερινές συνήθειες, γεγονός που εγείρει σοβαρά ζητήματα ιδιωτικότητας και απαιτεί ισχυρές δικλείδες ασφάλειας (Stojkoska & Trivodaliev, 2017).

Κόστος υλοποίησης: Αν και η τεχνολογική πρόοδος μειώνει σταδιακά τις τιμές, το αρχικό κόστος εγκατάστασης παραμένει υψηλό, περιορίζοντας την ταχεία διάδοση των AI-based HEMS, ιδιαίτερα σε αναδυόμενες αγορές (Taromboli κ.ά., 2025b).

3.2 Προηγμένοι Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης στη Διαχείριση Ενέργειας

Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning - ML) αποτελεί έναν από τους πιο καινοτόμους τομείς της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI), με σημαντική εφαρμογή στη διαχείριση ενέργειας. Τα Home Energy Management Systems (HEMS) χρησιμοποιούν αλγόριθμους ML για να αναλύσουν προηγούμενα δεδομένα κατανάλωσης, να αναγνωρίσουν πρότυπα χρήσης και να βελτιστοποιήσουν τη διαχείριση φορτίων.



Εικόνα 19: Κύκλος ζωής μηχανικής μάθησης για βελτιστοποίηση HEMS.

Η εφαρμογή των προηγμένων αλγορίθμων ML στα HEMS επιτρέπει:

- Την ανίχνευση ενεργειακών προτύπων και την ταξινόμηση των χρηστών με βάση τη συμπεριφορά τους, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους όπως k-means clustering και support vector machines.
- Τη δυναμική προσαρμογή της κατανάλωσης, με στόχο τη μείωση του ενεργειακού κόστους, μέσω τεχνικών reinforcement learning που βελτιώνουν τις στρατηγικές διαχείρισης σε πραγματικό χρόνο.
- Την πρόβλεψη μελλοντικών ενεργειακών αναγκών με neural networks και time series forecasting models, ώστε το HEMS να λαμβάνει αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα και όχι σε στατικούς κανόνες.
- Τη βελτίωση της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με χρήση regression models και deep learning architectures για τη διαχείριση των αστάθειας παραγωγής από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες (Khosravi κ.ά., 2021).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Ερευνητικά έργα στην Ευρώπη, όπως το Horizon 2020 InterFlex, έχουν αξιοποιήσει ML για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης σε έξυπνα δίκτυα, ενώ εμπορικές εφαρμογές, όπως το Sonnen στη Γερμανία, χρησιμοποιούν ML για την αυτοματοποίηση αποθήκευσης και την πρόβλεψη κατανάλωσης σε ενεργειακές κοινότητες. Αντίστοιχα, στην Ιαπωνία, τα HEMS συνδυάζονται με ML-driven πλατφόρμες πρόβλεψης για V2G σενάρια μεγάλης κλίμακας.

Αυτή η ενότητα αναλύει τους κύριους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση ενέργειας στα HEMS, παρουσιάζοντας τόσο ερευνητικές προσεγγίσεις όσο και εμπορικές εφαρμογές, ώστε να αναδειχθεί η πορεία από τη θεωρία στην πράξη.

Πίνακας 6 - Ενδεικτικοί αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και οι εφαρμογές τους στη διαχείριση ενέργειας μέσω HEMS. (Προσαρμογή από Zhou et al., 2020; Khosravi et al., 2021).

Αλγόριθμος ML	Εφαρμογή στα HEMS	Στόχος
K-means Clustering	Ομαδοποίηση προτύπων κατανάλωσης ανά χρήστη/συσσκευή	Εντοπισμός προφίλ κατανάλωσης, κατηγοριοποίηση συμπεριφορών
Support Vector Machines (SVM)	Ανίχνευση αναποτελεσματικών πρακτικών	Βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας
Neural Networks (NNs)	Πρόβλεψη μελλοντικής κατανάλωσης & παραγωγής ΑΠΕ	Βελτιστοποίηση προγραμματισμού φορτίων
Random Forests	Ανάλυση μεγάλων δεδομένων από IoT αισθητήρες	Μείωση σφαλμάτων πρόβλεψης, ανθεκτικότητα
Reinforcement Learning (RL)	Αυτόνομη διαχείριση φορτίων και στρατηγικές εξοικονόμησης	Ελαχιστοποίηση κόστους, μέγιστη αποδοτικότητα

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Αλγόριθμος ML	Εφαρμογή στα HEMS	Στόχος
Deep Learning Architectures (CNN, LSTM)	Πρόβλεψη αστάθειας παραγωγής ΑΠΕ	Ενίσχυση σταθερότητας δικτύου, βελτίωση αποθήκευσης

Η ανάλυση των αλγορίθμων ML και των εφαρμογών τους στα HEMS δείχνει ότι η αξιοποίηση τους δεν είναι ενιαία, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με τον στόχο και το πλαίσιο χρήσης. Κάθε αλγόριθμος προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα· για παράδειγμα, τα Neural Networks υπερέχουν στην πρόβλεψη χρονοσειρών, ενώ οι αλγόριθμοι Clustering είναι καταλληλότεροι για την αναγνώριση προτύπων κατανάλωσης.

Για να κατανοηθεί καλύτερα το πώς οι μέθοδοι αυτές οργανώνονται συστηματικά, στο επόμενο υποκεφάλαιο οι αλγόριθμοι ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: επιβλεπόμενη μάθηση, μη-επιβλεπόμενη μάθηση και ενισχυτική μάθηση. Η διάκριση αυτή επιτρέπει μια πιο σαφή κατανόηση του ρόλου κάθε τεχνικής και των ερευνητικών εφαρμογών της στη βελτιστοποίηση των HEMS.

3.3 Κατηγορίες Αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης για HEMS

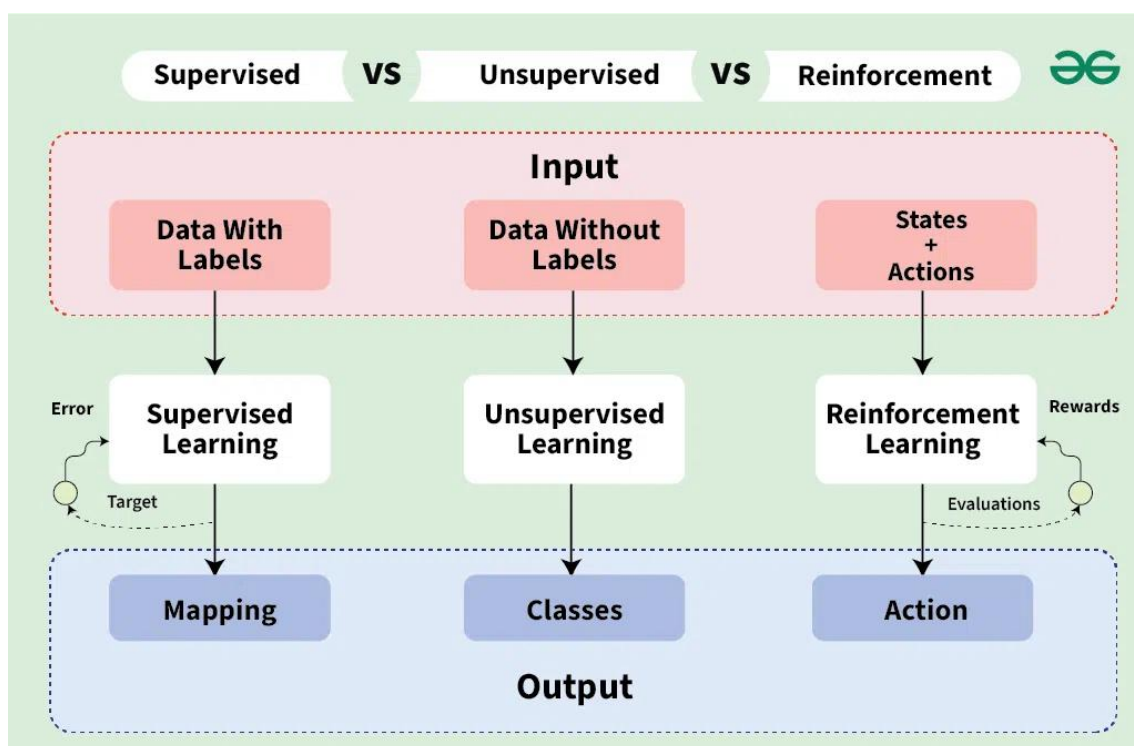
Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning, ML) αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες στην εξέλιξη των Home Energy Management Systems (HEMS), καθώς επιτρέπει την πρόβλεψη κατανάλωσης, την ανίχνευση προτύπων χρήσης και την αυτόνομη λήψη αποφάσεων. Οι προσεγγίσεις που εφαρμόζονται διακρίνονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες: επιβλεπόμενη μάθηση, μη-επιβλεπόμενη μάθηση και ενισχυτική μάθηση (J. Wang, Zhou, κ.ά., 2021).

Η **επιβλεπόμενη μάθηση (supervised learning)** αξιοποιεί ιστορικά δεδομένα για την πρόβλεψη μελλοντικής κατανάλωσης και την αναγνώριση προτύπων. Τεχνικές όπως η παλινδρόμηση, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και τα ensemble μοντέλα (Random Forest, Gradient Boosting) έχουν εφαρμοστεί με υψηλά επίπεδα ακρίβειας. Ενδεικτικά, οι Zhou et al. (2020) ανέπτυξαν δίκτυο LSTM που βελτίωσε την πρόβλεψη ζήτησης κατά 18%, ενώ οι Wang et al. (2021) πέτυχαν 92% ακρίβεια στην ταξινόμηση μοτίβων κατανάλωσης. Στην πράξη, ένα ANN-driven HEMS μπορεί να προβλέπει αιχμές κατανάλωσης και να προσαρμόζει αυτόματα τη λειτουργία των συσκευών, μειώνοντας το φορτίο σε κρίσιμες ώρες (Khosravi κ.ά., 2021).

Η μη-επιβλεπόμενη μάθηση (**unsupervised learning**) στοχεύει στην ανίχνευση άγνωστων προτύπων κατανάλωσης χωρίς προκαθορισμένες κατηγορίες. Μέθοδοι clustering όπως K-Means ή DBSCAN, καθώς και τεχνικές μείωσης διαστασιμότητας (π.χ. PCA), χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση νοικοκυριών και φορτίων, αποκαλύπτοντας διαφορετικά προφίλ χρήσης. Οι Zhang et al. (2022) ταξινόμησαν νοικοκυριά σε ενεργειακά προφίλ, βελτιώνοντας κατά 25% τις στρατηγικές κατανάλωσης, ενώ οι Tao et al. (2020) αξιοποίησαν deep autoencoders για την ανίχνευση ανωμαλιών και την ταυτοποίηση ενεργοβόρων συσκευών. Έτσι, τα HEMS μπορούν να παρέχουν εξατομικευμένες προτάσεις εξοικονόμησης ανάλογα με τις συνήθειες κάθε χρήστη.

Η ενισχυτική μάθηση (**reinforcement learning – RL**) προσφέρει στα HEMS τη δυνατότητα να μαθαίνουν μέσω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, βελτιστοποιώντας στρατηγικές χρήσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Προσεγγίσεις όπως τα Deep Q-Networks (DQN) και οι μέθοδοι policy gradient έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτικές. Οι Mocanu et al. (2018) έδειξαν ότι η Deep RL μπορεί να μειώσει το ενεργειακό κόστος έως και 30% μέσω βελτιστοποιημένης χρήσης αποθήκευσης, ενώ οι Liu et al. (2021) ανέπτυξαν multi-agent RL μοντέλο που επέτρεψε τη συνεργατική διαχείριση πολλών HEMS, βελτιώνοντας τη σταθερότητα του δικτύου. Ένα DQN-driven HEMS, για παράδειγμα, μπορεί να αποφασίζει πότε να φορτίσει ή να εκφορτίσει μπαταρίες και πότε να καταναλώσει ενέργεια από το δίκτυο, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα.

Συνολικά, η επιβλεπόμενη μάθηση συμβάλλει στην ακριβή πρόβλεψη της κατανάλωσης, η μη-επιβλεπόμενη στην ανάδειξη κρυφών προτύπων και η ενισχυτική στην αυτόνομη λήψη αποφάσεων. Ο συνδυασμός τους δημιουργεί ένα ισχυρό και ολοκληρωμένο πλαίσιο βελτιστοποίησης, το οποίο αποτελεί την αιχμή τόσο της ακαδημαϊκής έρευνας όσο και των εμπορικών εφαρμογών HEMS (J. Wang, Zhou, κ.ά., 2021).



Εικόνα 20: Βασικές κατηγορίες μηχανικής μάθησης – επιβλεπόμενη, μη-επιβλεπόμενη και ενισχυτική μάθηση – με ενδεικτικές εφαρμογές στα HEMS

3.4 Προγνωστικά Μοντέλα και Αυτόνομη Διαχείριση Φορτίων

Η αποτελεσματικότητα των Home Energy Management Systems (HEMS) βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη δυνατότητά τους να προβλέπουν τη μελλοντική κατανάλωση ενέργειας και να προσαρμόζουν αυτόνομα τα ηλεκτρικά φορτία. Τα **προγνωστικά μοντέλα** (predictive models) αξιοποιούνται για την εκτίμηση της ζήτησης σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες, ενώ η **αυτόνομη διαχείριση φορτίων** στηρίζεται σε αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, οι οποίοι επιτρέπουν την άμεση λήψη αποφάσεων και την προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο (J. Wang, Zhou, κ.ά., 2021).

Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών παρέχει μια σειρά από κρίσιμα οφέλη:

- **Εξοικονόμηση κόστους**, μέσω της αποφυγής αιχμών ζήτησης και της μετατόπισης φορτίων σε περιόδους χαμηλής τιμολόγησης.
- **Αύξηση ενεργειακής απόδοσης**, με την προσαρμογή της χρήσης ενέργειας στις πραγματικές ανάγκες του νοικοκυριού.

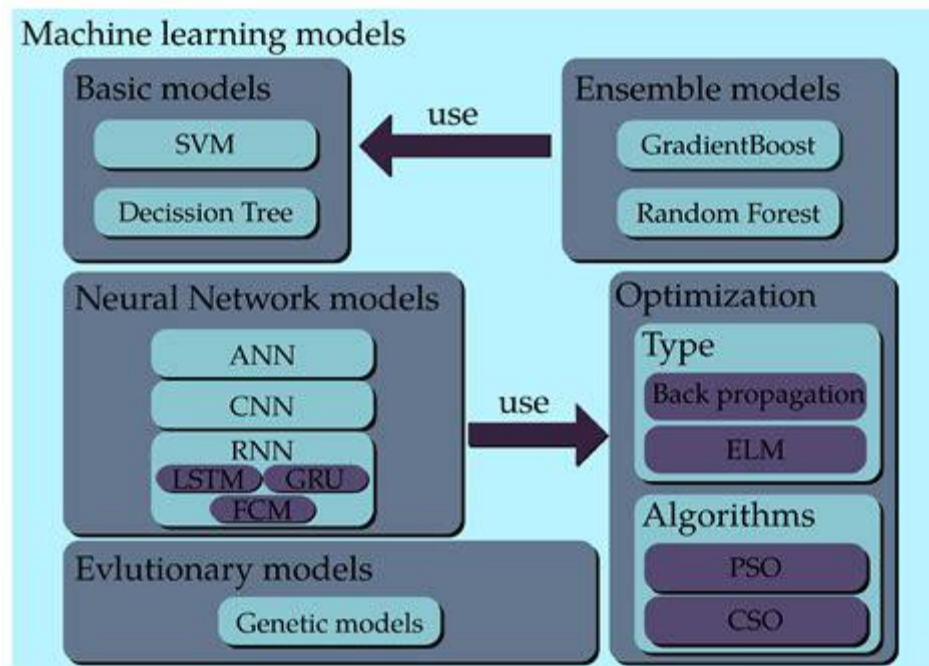
- **Βέλτιστη αξιοποίηση των ΑΠΕ**, καθώς τα HEMS μπορούν να συντονίσουν την αποθήκευση και κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.
- **Βελτίωση Demand Response (DR)**, μέσω της αμφίδρομης επικοινωνίας με τα έξυπνα δίκτυα, που επιτρέπει δυναμική προσαρμογή κατανάλωσης στις συνθήκες του συστήματος.

Η έρευνα στον τομέα αυτό έχει αναδείξει μια πληθώρα τεχνικών. Από τη μία πλευρά, τα μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης βασισμένα σε στατιστικές και μηχανική μάθηση —όπως η παλινδρόμηση, τα νευρωνικά δίκτυα και τα μοντέλα LSTM— παρέχουν αυξημένη ακρίβεια σε βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Από την άλλη, τα μοντέλα αυτόνομης διαχείρισης φορτίων αξιοποιούν αλγόριθμους ενισχυτικής μάθησης και βελτιστοποίησης, ώστε να κατανέμουν τα φορτία σε πραγματικό χρόνο με βάση τιμές, ζήτηση και παραγωγή από ΑΠΕ.

Συνεπώς, τα προγνωστικά μοντέλα και τα AI-driven σχήματα διαχείρισης φορτίων συνιστούν θεμέλιο λίθο για την ανάπτυξη ευφύων και ενεργειακά αποδοτικών HEMS, τα οποία ενισχύουν τόσο την αυτονομία των καταναλωτών όσο και τη σταθερότητα του δικτύου. Η ενότητα που ακολουθεί εξετάζει τις βασικές τεχνικές, τα υποκείμενα μοντέλα και τις ερευνητικές εφαρμογές που διαμορφώνουν το τρέχον state of the art.

3.4.1 Προγνωστικά Μοντέλα για τη Διαχείριση Ενέργειας στα HEMS

Η πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοτική λειτουργία των HEMS, καθώς επιτρέπει τη στρατηγική διαχείριση φορτίων, την αποφυγή υπερκατανάλωσης και τη βελτίωση της αξιοποίησης της αποθηκευμένης ενέργειας. Τα προγνωστικά μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σε **στατιστικές μεθόδους, μηχανική μάθηση και υβριδικές προσεγγίσεις**.



Εικόνα 21: Σχηματική απεικόνιση της χρήσης προγνωστικών μοντέλων μηχανικής μάθησης για την ανάλυση κατανάλωσης και τη βελτιστοποίηση φορτίων σε HEMS

Στατιστικά Μοντέλα Πρόβλεψης

Τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης και εφαρμόζουν μαθηματικές μεθόδους ανάλυσης χρονοσειρών για να προβλέψουν τη μελλοντική χρήση ενέργειας. Βασικές μέθοδοι είναι η γραμμική παλινδρόμηση, τα μοντέλα ARIMA/SARIMA και η μέθοδος Monte Carlo. Ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει ότι τέτοια μοντέλα μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια πρόβλεψης έως και 85%, ενώ πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις (SARIMA) μειώνουν την αβεβαιότητα κατά 20% σε σχέση με τις κλασικές τεχνικές (H. Li κ.ά., 2022; J. Wang, Zhou, κ.ά., 2021).

Μοντέλα Μηχανικής Μάθησης

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης έχουν ξεπεράσει τις παραδοσιακές στατιστικές μεθόδους, προσφέροντας υψηλότερη ακρίβεια και δυναμική προσαρμογή φορτίων. Τεχνικές όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα (ANN), τα Gradient Boosting Trees (XGBoost, LightGBM) και τα Long Short-Term Memory (LSTM) Networks έχουν δείξει βελτιώσεις έως 25% στην ακρίβεια σε σχέση με τα κλασικά μοντέλα.

Επιπλέον, μεθοδολογίες που συνδυάζουν Deep Learning και Reinforcement Learning έχουν μειώσει το ενεργειακό κόστος έως και 30% μέσω πιο αποδοτικής διαχείρισης φορτίων (D. Mocanu κ.ά., 2018).

Παράδειγμα:

Ένα HEMS βασισμένο σε XGBoost μπορεί να προβλέπει με ακρίβεια πάνω από 90% τις περιόδους αιχμής και να προγραμματίζει αυτόματα τη φόρτιση συσκευών σε ώρες χαμηλού κόστους, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

3.4.2 Αυτόνομη Διαχείριση Φορτίων μέσω AI-driven HEMS

Η αυτόνομη διαχείριση φορτίων επιτρέπει στα HEMS να παίρνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, βασισμένες σε δεδομένα κατανάλωσης και προβλέψεις. Οι βασικές λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- **Διαχείριση μπαταριών**, όπου το σύστημα αποφασίζει πότε να φορτίσει και να αποφορτίσει.
- **Ανίχνευση ενεργειακής σπατάλης**, με αναγνώριση συσκευών που καταναλώνουν περιττή ενέργεια.
- **Συνεργασία με έξυπνα δίκτυα (Smart Grids)**, ώστε τα HEMS να μειώνουν ή να αυξάνουν φορτία δυναμικά ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου.

Ερευνητικά έργα έχουν δείξει ότι τέτοιες προσεγγίσεις μπορούν να μειώσουν τις αιχμές ζήτησης κατά 15% (Y. Liu, Wang, κ.ά., 2021), ενώ η εφαρμογή Deep Q-Networks στη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων έχει μειώσει το κόστος έως και 25% (L. Wang κ.ά., 2022).

Τα προγνωστικά μοντέλα και η αυτόνομη διαχείριση φορτίων λειτουργούν συμπληρωματικά. Η ακριβής πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας επιτρέπει τη βέλτιστη προετοιμασία, ενώ η αυτόνομη διαχείριση φορτίων διασφαλίζει την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα σε πραγματικό χρόνο.

3.5 Σύγχρονες Εφαρμογές AI στα HEMS

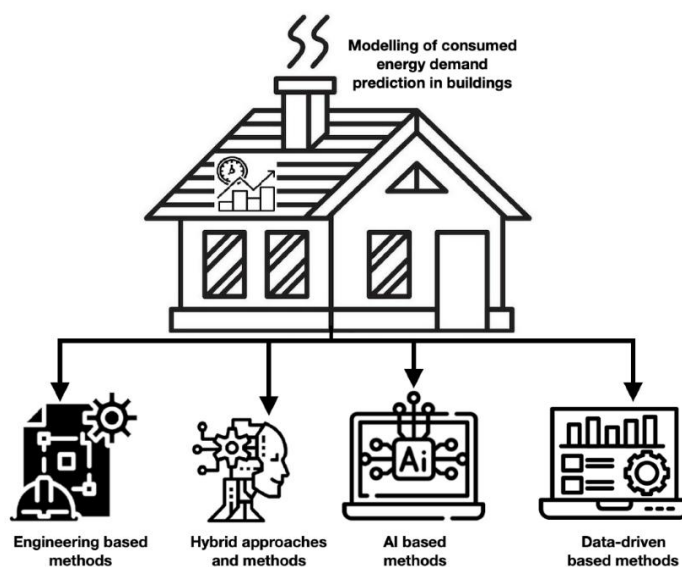
Η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) έχει διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης στα Home Energy Management Systems (HEMS), επιτρέποντας αυτόνομη ανάλυση, πρόβλεψη και προσαρμογή της κατανάλωσης. Οι σύγχρονες εφαρμογές AI στα HEMS βασίζονται σε αλγόριθμους μηχανικής μάθησης (ML), νευρωνικά δίκτυα και

ενισχυτική μάθηση, οι οποίοι επιτρέπουν στα συστήματα να αναγνωρίζουν ενεργειακά μοτίβα, να ανιχνεύουν ανωμαλίες, να μειώνουν τις απώλειες και να βελτιστοποιούν τη χρήση των ηλεκτρικών φορτίων (L. Wang κ.ά., 2022).

Η ενσωμάτωση των AI-driven HEMS σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχει επιτρέψει προηγμένες στρατηγικές διαχείρισης φορτίων, με έμφαση στη δυναμική τιμολόγηση, την έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και τη μέγιστη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (K. Zhou κ.ά., 2020a).

3.5.1 Εφαρμογή AI στην Ανάλυση Ενεργειακής Κατανάλωσης και Πρόβλεψη Ζήτησης

Η ικανότητα της AI να αναλύει μεγάλα δεδομένα (Big Data) και να εξάγει μοτίβα χρήσης έχει μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο τα HEMS διαχειρίζονται την κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 22: Μοντέλο πρόβλεψης ενεργειακής ζήτησης σε κτίριο – συνδυασμός υβριδικών, AI-based και data driven μεθόδων

Μέσω προγνωστικών μοντέλων και νευρωνικών δικτύων, η AI μπορεί να αναγνωρίσει μοτίβα χρήσης και να προβλέψει τη μελλοντική ενεργειακή ζήτηση.

Βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι χρονοσειρές (time-series forecasting), τα LSTM (Long Short-Term Memory) νευρωνικά δίκτυα και τα Gradient Boosting Trees (XGBoost, LightGBM). Έρευνες έχουν δείξει ότι τα LSTM μπορούν να αυξήσουν την

ακρίβεια πρόβλεψης κατά 25% σε σχέση με παραδοσιακά μοντέλα, ενώ ML-based HEMS έχουν καταφέρει μείωση του συνολικού κόστους έως 30% μέσω load forecasting (Y. Wang κ.ά., 2021; K. Zhou κ.ά., 2020a).

Παράδειγμα:

Ένα AI-driven HEMS που χρησιμοποιεί Gradient Boosting Trees μπορεί να αναλύσει την ενεργειακή κατανάλωση ενός νοικοκυριού και να προβλέψει πότε θα υπάρξουν αιχμές ζήτησης, μετατοπίζοντας τη χρήση ενέργειας σε πιο οικονομικές περιόδους.

3.5.2 Χρήση AI για την Ανίχνευση Ανωμαλιών και Σφαλμάτων στο Δίκτυο

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των σύγχρονων ηλεκτρικών δικτύων είναι οι ενεργειακές απώλειες, η αναποτελεσματική χρήση ενέργειας και οι δυσλειτουργίες που οδηγούν σε αυξημένο κόστος. Η AI μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανίχνευση και τον εντοπισμό ενεργειακών σφαλμάτων, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση των HEMS.

Τεχνικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν Autoencoders για ανίχνευση ανωμαλιών, Random Forest Classifiers για αναγνώριση ενεργειακής σπατάλης και Deep Reinforcement Learning (DRL) για προσαρμοστική παρακολούθηση. Ερευνητικά έργα έχουν δείξει ότι τέτοιες προσεγγίσεις φτάνουν σε ακρίβεια 90% στον εντοπισμό σφαλμάτων, ενώ μπορούν να μειώσουν ενεργειακές απώλειες κατά 15% σε μεγάλα δίκτυα (Y. Liu κ.ά., 2022; Tao κ.ά., 2021).

Παράδειγμα:

Ένα HEMS με AI-driven anomaly detection μπορεί να αναγνωρίσει συσκευές που καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από το φυσιολογικό, ειδοποιώντας τον χρήστη για πιθανές δυσλειτουργίες ή προτείνοντας εναλλακτικές λύσεις εξοικονόμησης.

3.5.3 Εφαρμογές AI σε Εμπορικά Συστήματα HEMS

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στα εμπορικά Home Energy Management Systems (HEMS) έχει ήδη βρει πρακτική εφαρμογή σε προϊόντα και πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται διεθνώς. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά

παραδείγματα που δείχνουν πώς οι θεωρητικές αρχές της AI μεταφράζονται σε πραγματικές λύσεις.

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) στα εμπορικά Home Energy Management Systems (HEMS) έχει οδηγήσει σε ώριμες λύσεις που εφαρμόζονται ήδη στην αγορά και δείχνουν πώς οι θεωρητικές αρχές μετασχηματίζονται σε πρακτική καινοτομία. Τα παραδείγματα που ακολουθούν καταδεικνύουν διαφορετικά τεχνολογικά μοντέλα χρήσης της AI, από τον έλεγχο HVAC έως τη βελτιστοποίηση αποθήκευσης και τη διαχείριση μικροδικτύων.

Google Nest



Εικόνα 23: Ο θερμοστάτης Google Nest με AI-driven διαχείριση HVAC

Το Google Nest Thermostat αποτελεί ένα από τα πλέον αναγνωρίσιμα και ευρέως διαδεδομένα προϊόντα οικιακής ενεργειακής διαχείρισης με χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Η λειτουργία του βασίζεται σε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, οι οποίοι επεξεργάζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να κατανοούν και να προσαρμόζονται στις καθημερινές συνήθειες των χρηστών. Με τον τρόπο αυτό, το Nest δεν περιορίζεται σε έναν κλασικό θερμοστάτη με προκαθορισμένα χρονοπρογράμματα, αλλά εξελίσσεται σε ένα δυναμικό σύστημα βελτιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας.

Σε τεχνικό επίπεδο, το Nest ενσωματώνει αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και παρουσίας, οι οποίοι σε συνδυασμό με δεδομένα που λαμβάνονται από το cloud, δημιουργούν προσαρμοστικά προφίλ κατανάλωσης. Η συνεχής ανατροφοδότηση (feedback) μεταξύ αισθητήρων και αλγορίθμων deep learning επιτρέπει την πρόβλεψη μελλοντικών αναγκών θέρμανσης και ψύξης με υψηλή ακρίβεια.

Οι βασικές λειτουργίες AI περιλαμβάνουν:

- **Deep Learning forecasting για θέρμανση/ψύξη**, όπου το σύστημα μπορεί να προβλέψει πότε απαιτείται αύξηση ή μείωση θερμοκρασίας, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να επηρεάζεται η άνεση των χρηστών.
- **Demand Response (Rush Hour Rewards)**, με το οποίο ο θερμοστάτης συνεργάζεται με τον πάροχο ενέργειας, μειώνοντας τη λειτουργία HVAC σε ώρες αιχμής και συμβάλλοντας στη σταθερότητα του δικτύου.
- **Nest Renew / Energy Shift**, μια λειτουργία που μετατοπίζει αυτόματα τη χρήση HVAC σε χρονικές περιόδους με χαμηλότερο ενεργειακό κόστος ή μεγαλύτερη συμμετοχή ΑΠΕ στο μίγμα παραγωγής, ενισχύοντας έτσι τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Πέρα από την τεχνική διάσταση, το Nest έχει μετρήσιμη συνεισφορά στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Μελέτες δείχνουν ότι μπορεί να εξοικονομήσει έως και 12% στη θέρμανση και 15% στην ψύξη, ποσοστά που μεταφράζονται σε σημαντική μείωση κόστους για τους χρήστες αλλά και σε χαμηλότερες εκπομπές CO₂ σε συστημικό επίπεδο.

Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση καθιστά το Google Nest όχι μόνο έναν «έξυπνο θερμοστάτη», αλλά έναν ενεργό κόμβο διαχείρισης HVAC στο πλαίσιο των Home Energy Management Systems, προάγοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ τελικού χρήστη, οικιακού περιβάλλοντος και ηλεκτρικού δικτύου. (Nest Labs, Inc., 2015).

Tesla Powerwall



Εικόνα 24: Το Tesla Powerwall ως έξυπνο σύστημα αποθήκευσης με AI-driven battery optimization

Το Tesla Powerwall αποτελεί μία από τις πλέον προηγμένες λύσεις οικιακής αποθήκευσης ενέργειας με ενσωματωμένες λειτουργίες τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης. Η μονάδα βασίζεται σε τεχνολογία μπαταριών λιθίου-ιόντων, ενσωματωμένο Battery Management System (BMS) και inverter, προσφέροντας χωρητικότητα ~13,5 kWh και συνεχή ισχύ έως 11,5 kW AC, με δυνατότητα κλιμάκωσης μέσω παράλληλης σύνδεσης πολλαπλών μονάδων (Tesla, Inc., χ.χ.).

Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, το Powerwall υποστηρίζει DC coupling με φωτοβολταϊκά έως 20 kW, μειώνοντας τις απώλειες μετατροπής, ενώ μέσω του Powerwall Gateway και αυτόματου διακόπτη μεταγωγής (ATS) παρέχει δυνατότητα νησιδοποίησης σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος. Η ενσωματωμένη μετρητική διάταξη και οι αισθητήρες ρευμάτων επιτρέπουν ακριβή εκτίμηση της κατανάλωσης και του State of Charge (SoC) σε πραγματικό χρόνο (Tesla, n.d.-b).

Οι κύριες λειτουργίες AI περιλαμβάνουν:

- **Time-Based Control** (energy arbitrage), όπου η φόρτιση γίνεται σε ώρες χαμηλού κόστους και η εκφόρτιση σε ώρες αιχμής, βασισμένη σε προβλέψεις κατανάλωσης και τιμών.
- **AI-driven battery optimization**, όπου αλγόριθμοι πρόβλεψης και μοντέλα μηχανικής μάθησης εκτιμούν το SoC και το State of Health (SoH), μεγιστοποιώντας τον κύκλο ζωής της μπαταρίας μέσω degradation-aware στρατηγικών.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- **Virtual Power Plant (VPP) integration**, όπου χιλιάδες Powerwalls συνδέονται μέσω cloud σε έναν εικονικό σταθμό παραγωγής, παρέχοντας υπηρεσίες ευελιξίας στο δίκτυο και δημιουργώντας πρόσθετα έσοδα για τους χρήστες (Y. Liu, Wang, κ.ά., 2021).

Μελέτες έχουν δείξει ότι η συμμετοχή του Powerwall σε σενάρια Time-of-Use τιμολόγησης μπορεί να μειώσει το ενεργειακό κόστος έως και 40%, ενώ σε σενάρια VPP η συνολική συνεισφορά του στη σταθερότητα του δικτύου είναι συγκρίσιμη με μικρές μονάδες παραγωγής (D. Mocanu κ.ά., 2018; Tesla, χ.χ.).

Συνεπώς, το Powerwall δεν αποτελεί απλώς μια μπαταρία, αλλά έναν ευφυή ενεργειακό κόμβο στο πλαίσιο των HEMS, με ρόλο τόσο στην οικιακή αυτονομία όσο και στη συστημική ευστάθεια.

Schneider Electric EcoStruxure



Εικόνα 25: Η πλατφόρμα Schneider EcoStruxure Microgrid Advisor με AI-driven load balancing

Η πλατφόρμα Schneider Electric EcoStruxure αντιπροσωπεύει μια ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση ενέργειας, επεκτείνοντας τη λειτουργικότητά της από το επίπεδο της οικίας έως κτιριακά συγκροτήματα και μικροδίκτυα. Η αρχιτεκτονική της στηρίζεται σε ένα πολυεπίπεδο οικοσύστημα που ενσωματώνει IoT αισθητήρες, cloud-based analytics και αλγορίθμους

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

AI/ML, προσφέροντας κεντρική εποπτεία και βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο (Schneider Electric, χ.χ.-a).

Στον πυρήνα της βρίσκεται το EcoStruxure Microgrid Advisor, το οποίο αξιοποιεί αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής. Το σύστημα λαμβάνει υπόψη καιρικές συνθήκες, δυναμικές τιμές αγοράς ενέργειας και δεδομένα ιστορικής κατανάλωσης, παρέχοντας εξατομικευμένα σενάρια βελτιστοποίησης. Σε πραγματικές εφαρμογές, έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να επιτύχει σημαντική εξομάλυνση φορτίων και καλύτερη ενσωμάτωση ΑΠΕ.

Μια άλλη κρίσιμη λειτουργία είναι το AI-driven load balancing, όπου η πλατφόρμα ανακατανέμει δυναμικά τα φορτία ώστε να μειώνεται το συνολικό ενεργειακό κόστος και να αποφεύγονται αιχμές ζήτησης (Schneider Electric, n.d.-c). Σε περιβάλλοντα με έντονα μεταβλητή κατανάλωση, η λειτουργία αυτή μειώνει τη χρήση εφεδρικών πηγών ενέργειας και βελτιώνει τη σταθερότητα του δικτύου.

Η πλατφόρμα ενσωματώνει επίσης Fault Detection & Diagnostics (FDD), αξιοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης και ανάλυσης ανωμαλιών για να εντοπίζει δυσλειτουργίες σε HVAC, φωτισμό και άλλα υποσυστήματα. Η αυτόματη διάγνωση συνοδεύεται από προτάσεις διορθωτικών ενεργειών, μειώνοντας έτσι τα κόστη συντήρησης και βελτιώνοντας την αξιοπιστία των εγκαταστάσεων.

Στο οικιακό περιβάλλον, το Schneider Energy Monitor (πρώην Wiser) συνδέεται με τον ηλεκτρικό πίνακα, παρακολουθώντας την κατανάλωση σε επίπεδο κυκλώματος. Μέσω τεχνικών NILM (Non-Intrusive Load Monitoring), αναγνωρίζει ενεργοβόρες συσκευές χωρίς την ανάγκη ξεχωριστών αισθητήρων, προσφέροντας στο χρήστη ειδοποιήσεις και στρατηγικές εξοικονόμησης (Schneider Electric, χ.χ.-b).

Σε κλίμακα μικροδικτύου, η πλατφόρμα EcoStruxure έχει υλοποιηθεί σε εμπορικά και πανεπιστημιακά κτίρια, όπου μετρήθηκαν μειώσεις κόστους έως 20%, μέσω συνδυασμού βελτιστοποίησης φορτίων, πρόβλεψης παραγωγής/κατανάλωσης και ανίχνευσης ανωμαλιών (Schneider Electric, χ.χ.-c). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το EcoStruxure δεν αποτελεί απλώς μια λύση παρακολούθησης, αλλά ένα AI-enhanced ενεργειακό hub, ικανό να συνδυάζει λειτουργίες demand response, αυτονομίας μικροδικτύου και ενεργειακής αποδοτικότητας σε ένα ενιαίο πλαίσιο.

3.6 Σύγχρονες Εμπορικές Πλατφόρμες HEMS και Τάσεις Αγοράς

Η ταχεία ανάπτυξη των Home Energy Management Systems (HEMS) δεν περιορίζεται πλέον στο θεωρητικό και ερευνητικό πεδίο, αλλά έχει επεκταθεί δυναμικά στην αγορά με εμπορικές πλατφόρμες που υιοθετούν προηγμένες τεχνολογίες, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και η αποθήκευση ενέργειας. Οι πλατφόρμες αυτές συνιστούν ένα κρίσιμο πεδίο State-of-the-Art (SoTA) ανάλυσης, καθώς αποτυπώνουν πώς οι θεωρητικές και τεχνολογικές καινοτομίες υλοποιούνται σε πραγματικές εφαρμογές για οικιακούς χρήστες και ενεργειακές κοινότητες.

Οι εμπορικές λύσεις HEMS διαφέρουν σημαντικά ως προς την εστίαση και τη λειτουργικότητά τους: ορισμένες επικεντρώνονται στον έλεγχο και την αυτοματοποίηση της κατανάλωσης (π.χ. συστήματα smart home), άλλες στη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και στην ενεργή συμμετοχή σε εικονικούς σταθμούς παραγωγής (Virtual Power Plants – VPPs), ενώ αρκετές συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες, δημιουργώντας ολοκληρωμένα οικοσυστήματα διαχείρισης ενέργειας. Η εμπορική διάσταση των HEMS δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική πρόοδο, αλλά και στρατηγικό μοχλό για την ενεργειακή μετάβαση, καθώς φέρνει τους τελικούς χρήστες στο κέντρο της αγοράς ενέργειας, μετατρέποντάς τους σε ενεργούς «prosumers».

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αναλύονται χαρακτηριστικές εμπορικές πλατφόρμες HEMS, όπως οι Tiko, Bosch Smart Home, Hive, Sonnen και SolarEdge. Η συγκριτική μελέτη τους επιτρέπει την αποτίμηση των τεχνολογικών τους χαρακτηριστικών, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους, αναδεικνύοντας παράλληλα τις κυρίαρχες τάσεις και προκλήσεις που χαρακτηρίζουν την τρέχουσα αγορά.

3.6.1 Tiko

Η πλατφόρμα Tiko αποτελεί μία από τις πιο καινοτόμες ευρωπαϊκές λύσεις στον τομέα της οικιακής και κοινοτικής διαχείρισης ενέργειας, με ισχυρή παρουσία στην Ελβετία, τη Γαλλία και τη Γερμανία. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει ολοκληρωμένη διαχείριση φορτίου, ενσωμάτωση ΑΠΕ και συμμετοχή σε εικονικούς σταθμούς παραγωγής (VPPs), μέσω ευέλικτης αρχιτεκτονικής βασισμένης σε IoT και Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) (Tiko Energy Solutions, 2024).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Σε τεχνικό επίπεδο, η πλατφόρμα χρησιμοποιεί έξυπνες συσκευές IoT που συνδέονται με οικιακά φορτία, όπως θερμαντικά σώματα, αντλίες θερμότητας και μπαταρίες. Μέσω αλγορίθμων Machine Learning (ML), τα HEMS που βασίζονται στο Tiko είναι σε θέση να αναλύουν δεδομένα κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, να προβλέπουν ενεργειακές ανάγκες και να προσαρμόζουν αυτόματα τη λειτουργία συσκευών. Επιπλέον, το Tiko υποστηρίζει load shifting με στόχο τη μετατόπιση της κατανάλωσης σε ώρες χαμηλής τιμολόγησης, καθώς και demand response σε συνεργασία με παρόχους ενέργειας (Swisscom Energy Solutions, 2023).

Ένα από τα πιο ισχυρά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας είναι η δυνατότητα συμμετοχής σε VPPs, όπου χιλιάδες οικιακά συστήματα συντονίζονται ώστε να λειτουργούν ως ενιαία μονάδα ευελιξίας, παρέχοντας υπηρεσίες εξισορρόπησης στο δίκτυο. Η επικοινωνία βασίζεται σε ασφαλή cloud αρχιτεκτονική, με χρήση MQTT για την ανταλλαγή δεδομένων και RESTful APIs για ενσωμάτωση με τρίτες εφαρμογές. Παράλληλα, η εταιρεία επενδύει σε edge computing, ώστε η ανάλυση και η λήψη αποφάσεων να εκτελούνται κοντά στη συσκευή, μειώνοντας την εξάρτηση από το cloud και το latency (Swisscom Energy Solutions, 2023).

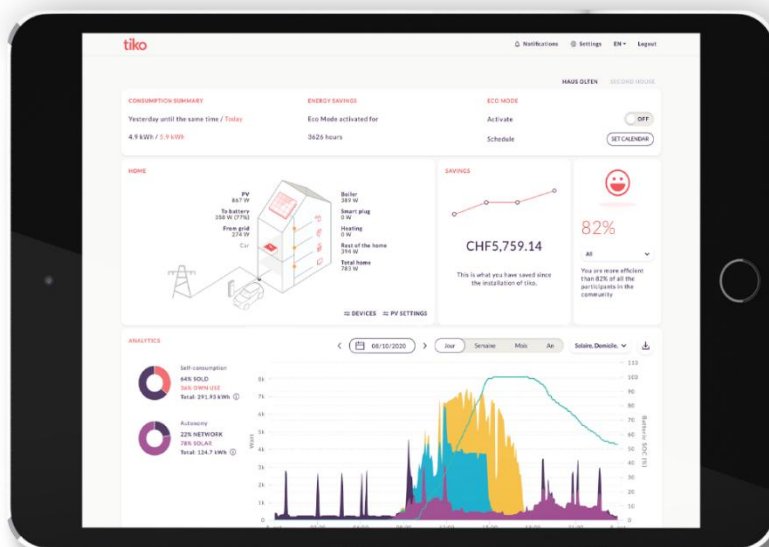
Η πλατφόρμα έχει δοκιμαστεί σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Στην Ελβετία, η Swisscom Energy Solutions συνεργάζεται με το Tiko για την παροχή υπηρεσιών ευελιξίας σε νοικοκυριά, ενώ στη Γαλλία και τη Γερμανία, μεγάλοι πάροχοι ενέργειας έχουν ενσωματώσει την πλατφόρμα σε προγράμματα demand response. Σύμφωνα με ανεξάρτητες μελέτες, η χρήση του Tiko μπορεί να μειώσει την αιχμιακή ζήτηση κατά 25% και να προσφέρει έως 15% εξοικονόμηση κόστους για τα νοικοκυριά (Schmutzler κ.ά., 2021).

Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και ορισμένες προκλήσεις. Η εξάρτηση από ισχυρή δικτυακή υποδομή μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή σε αγορές με χαμηλή ψηφιακή ωριμότητα, ενώ η ενσωμάτωση με διαφορετικούς κατασκευαστές συσκευών απαιτεί συνεχή τυποποίηση και επεκτασιμότητα των APIs.

Συνολικά, το Tiko αναδεικνύεται ως μια πρωτοποριακή ευρωπαϊκή λύση HEMS, που συνδυάζει τεχνολογική καινοτομία, εμπορική ωριμότητα και δυνατότητα ευρείας εφαρμογής, τόσο σε οικιακό επίπεδο όσο και στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 26: Το περιβάλλον διαχείρισης της πλατφόρμας Tiko για οικιακούς χρήστες

3.6.2 Bosch Smart Home

Το Bosch Smart Home αποτελεί μία από τις πιο ολοκληρωμένες εμπορικές πλατφόρμες οικιακής ενεργειακής διαχείρισης και αυτοματισμού στην Ευρώπη, συνδυάζοντας στοιχεία HEMS, BEMS και IoT συστημάτων σε ένα ενοποιημένο οικοσύστημα. Η λύση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στον έλεγχο της κατανάλωσης, αλλά προσφέρει δυνατότητες αυτοματισμού, ανάλυσης δεδομένων, ενσωμάτωσης ΑΠΕ και σύνδεσης με έξυπνα δίκτυα.

Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας βασίζεται στον Smart Home Controller, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος για τη διασύνδεση όλων των έξυπνων συσκευών. Ο ελεγκτής υποστηρίζει ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως Zigbee, Z-Wave, Thread και Wi-Fi, εξασφαλίζοντας διαλειτουργικότητα με προϊόντα τρίτων (Bosch Smart Home GmbH, 2024a). Παράλληλα, η πλατφόρμα χρησιμοποιεί edge computing για την εκτέλεση κρίσιμων λειτουργιών σε τοπικό επίπεδο, μειώνοντας την εξάρτηση από το cloud και επιτυγχάνοντας χαμηλότερο latency.

Στο cloud επίπεδο, η Bosch IoT Suite παρέχει λειτουργίες big data analytics και AI-driven πρόβλεψης κατανάλωσης, επιτρέποντας την ανάλυση ιστορικών δεδομένων, την αναγνώριση προτύπων χρήσης και την προσαρμογή της λειτουργίας συσκευών. Μέσω τεχνικών

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Machine Learning (ML), το σύστημα μπορεί να προβλέψει τη ζήτηση ενέργειας και να ενεργοποιήσει μηχανισμούς load shifting σε ώρες χαμηλού κόστους (Bosch.IO GmbH, 2023).

Οι βασικές λειτουργίες ενεργειακής διαχείρισης περιλαμβάνουν:

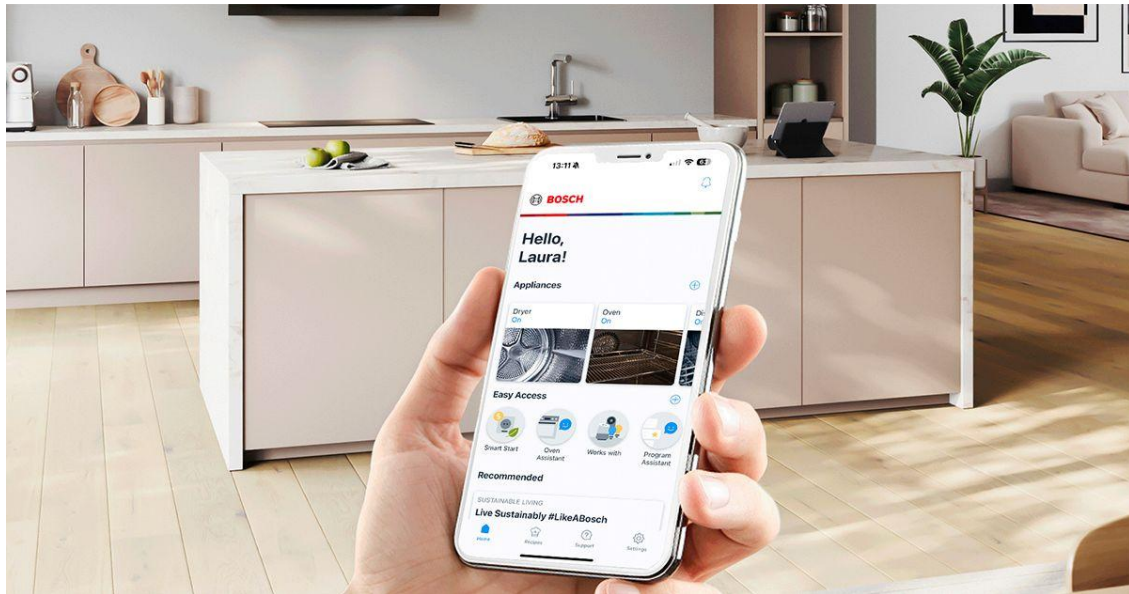
- Έξυπνη ρύθμιση θέρμανσης με αυτόματη προσαρμογή θερμοκρασίας βάσει συμπεριφοράς χρηστών και εξωτερικών συνθηκών.
- Διαχείριση φορτίων (load balancing) σε πραγματικό χρόνο με στόχο την αποφυγή αιχμών ζήτησης.
- Σύνδεση με φωτοβολταϊκά και συστήματα αποθήκευσης, όπου το HEMS αποφασίζει δυναμικά αν θα αποθηκεύσει ή θα καταναλώσει την παραγόμενη ενέργεια.
- Ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) μέσω Vehicle-to-Home (V2H), με πιλοτικά έργα που διερευνούν την αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην κυβερνοασφάλεια. Η πλατφόρμα εφαρμόζει end-to-end κρυπτογράφηση και μηχανισμούς multi-factor authentication, ενώ συμμορφώνεται με τον Γενικό Κανονισμό Προστασίας Δεδομένων (GDPR) της ΕΕ, γεγονός που ενισχύει την εμπιστοσύνη των χρηστών (Bosch Smart Home GmbH, 2024b).

Σε επίπεδο εφαρμογών σε έξυπνες πόλεις, η Bosch έχει συμμετάσχει στο ευρωπαϊκό έργο REPLICATE (Horizon 2020), όπου η πλατφόρμα Smart Home ενσωματώθηκε σε μικροδίκτυα κατοικιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση της πλατφόρμας οδήγησε σε 20% μείωση της συνολικής κατανάλωσης και βελτιστοποίησε τη χρήση ΑΠΕ σε αστικό επίπεδο (European Commission, 2021).

Επιπλέον, σε συνεργασία με δήμους στη Γερμανία, το Bosch Smart Home χρησιμοποιήθηκε σε πιλοτικά σενάρια demand response, αποδεικνύοντας ότι τα οικιακά HEMS μπορούν να αποτελέσουν κρίσιμους κόμβους στα smart grids.

Συνολικά, το Bosch Smart Home ξεχωρίζει ως μια πλατφόρμα που συνδυάζει τεχνολογική πληρότητα, εμπορική ωριμότητα και διαλειτουργικότητα, καλύπτοντας όχι μόνο οικιακές ανάγκες αλλά και εφαρμογές σε επίπεδο κοινότητας και έξυπνης πόλης. Με τη χρήση AI, IoT και cloud analytics, η λύση αυτή δεν περιορίζεται στη μείωση του κόστους, αλλά αναβαθμίζει τον ρόλο των νοικοκυριών σε ενεργούς συμμετέχοντες της ενεργειακής μετάβασης.



Εικόνα 27: Το οικοσύστημα Bosch Smart Home και οι βασικές του λειτουργίες

3.6.3 Hive (Centrica Hive Active Heating)

Το Hive αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες εμπορικές λύσεις έξυπνης οικιακής διαχείρισης ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο, αναπτυγμένο από τη Centrica (British Gas). Η πλατφόρμα εστιάζει στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, την ευέλικτη διαχείριση θέρμανσης/ψύξης και τη διασύνδεση με ΑΠΕ και ηλεκτρικά οχήματα (EVs), λειτουργώντας ως πλήρες HEMS σε συνδυασμό με υπηρεσίες έξυπνου οικιακού αυτοματισμού (British Gas / Centrica Hive Limited, 2023).

Η αρχιτεκτονική του Hive περιλαμβάνει έναν κεντρικό θερμοστάτη που συνδέεται με το boiler ή το HVAC σύστημα και επικοινωνεί με άλλες συσκευές μέσω Zigbee και Wi-Fi. Το σύστημα υποστηρίζεται από cloud πλατφόρμα που εκτελεί AI-driven αναλύσεις για την πρόβλεψη ενεργειακών αναγκών, βασιζόμενες σε δεδομένα καιρού, ιστορικής κατανάλωσης και προτιμήσεων χρήστη (Centrica plc, 2022a).

Οι κύριες λειτουργίες που σχετίζονται με τη διαχείριση ενέργειας περιλαμβάνουν:

- **Smart Heating & Cooling Control**, όπου αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης προσαρμόζουν αυτόματα τα setpoints θερμοκρασίας με βάση το προφίλ χρήστη.
- **Scheduling & Zoning**, που επιτρέπει την ανεξάρτητη ρύθμιση θερμοκρασίας σε διαφορετικά δωμάτια, μειώνοντας την κατανάλωση έως και 15%.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- **Integration με φωτοβολταϊκά και EV charging**, μέσω συνεργασιών της Centrica με προμηθευτές ανανεώσιμης ενέργειας.
- **Demand Response συμμετοχή**, με προγράμματα όπου τα Hive-enabled νοικοκυριά μπορούν να προσαρμόζουν τη ζήτηση τους σε περιόδους αιχμής (Ofgem, 2023).

Ένα από τα βασικά στοιχεία διαφοροποίησης του Hive είναι η δυνατότητα σύνδεσης με την πλατφόρμα Hive EV Charging, η οποία συντονίζει τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων με βάση τις ώρες χαμηλής τιμολόγησης, επιτρέποντας εξοικονόμηση έως και 30% στο κόστος φόρτισης. Παράλληλα, το Hive συνεργάζεται με το δίκτυο Octopus Energy Agile Tariff, υποστηρίζοντας real-time προσαρμογή φορτίων (Centrica plc, 2022a).

Στο επίπεδο κυβερνοασφάλειας, η πλατφόρμα εφαρμόζει TLS encryption, ασφαλή αποθήκευση δεδομένων και συμμόρφωση με τον κανονισμό GDPR, διασφαλίζοντας την προστασία προσωπικών δεδομένων των χρηστών.

Η πλατφόρμα έχει χρησιμοποιηθεί σε πιλοτικά έργα smart grid στο Ηνωμένο Βασίλειο, όπου νοικοκυριά με Hive συμμετείχαν σε μηχανισμούς frequency response και demand flexibility. Σύμφωνα με έρευνα της Ofgem, η χρήση Hive σε συνδυασμό με δυναμικά τιμολόγια οδήγησε σε μείωση αιχμιακής ζήτησης κατά 10–15%, ενώ ταυτόχρονα βελτίωσε την απορρόφηση παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ (Ofgem, 2023).

Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν προκλήσεις, όπως η περιορισμένη υποστήριξη σε ορισμένες αγορές εκτός Ηνωμένου Βασιλείου, καθώς και η ανάγκη για καλύτερη διαλειτουργικότητα με third-party συσκευές. Ωστόσο, η στρατηγική της Centrica για ενσωμάτωση του Hive σε ενεργειακές κοινότητες και η προοπτική συμμετοχής του σε VPPs δείχνουν ότι η πλατφόρμα εξελίσσεται από ένα απλό smart thermostat σε ένα πλήρες HEMS οικοσύστημα.



Εικόνα 28: Ο θερμοστάτης Hive Active Heating και η εφαρμογή κινητού

3.6.4 Sonnen (SonnenBatterie)

Η Sonnen GmbH, με έδρα τη Γερμανία, έχει αναδειχθεί ως μία από τις κορυφαίες εταιρείες στον τομέα των οικιακών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και των κοινοτήτων ανανεώσιμης ενέργειας, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα HEMS που συνδυάζει μπαταρίες, λογισμικό διαχείρισης και peer-to-peer ενεργειακές συναλλαγές. Το βασικό προϊόν της εταιρείας είναι το SonnenBatterie, ένα σύστημα αποθήκευσης βασισμένο σε μπαταρίες λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LiFePO₄), που διακρίνεται για την υψηλή ασφάλεια, μακροζωία και δυνατότητες διασύνδεσης με ΑΠΕ (Sonnen GmbH, 2023a).

Σε τεχνικό επίπεδο, η SonnenBatterie συνδυάζει:

- Αποθήκευση ενέργειας με δυνατότητα κλιμάκωσης από 5 kWh έως 15 kWh για οικιακές εφαρμογές.
- Ενσωματωμένο inverter που υποστηρίζει αμφίδρομη ροή ενέργειας (bidirectional flows).
- AI-driven Battery Management System (BMS), το οποίο βελτιστοποιεί τη φόρτιση/εκφόρτιση με βάση την πρόβλεψη ζήτησης, τα δυναμικά τιμολόγια και την παραγωγή ΑΠΕ.
- Δυνατότητες Virtual Power Plant (VPP), όπου χιλιάδες μονάδες SonnenBatterie μπορούν να συντονιστούν για την παροχή υπηρεσιών στο δίκτυο, όπως frequency response και peak shaving (Kremers, Eicker, κ.ά., 2020).

Η εταιρεία έχει επίσης αναπτύξει την πλατφόρμα SonnenCommunity, ένα εικονικό δίκτυο που επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται την πλεονάζουσα ενέργεια τους με άλλους καταναλωτές. Αυτή η προσέγγιση peer-to-peer (P2P) trading υλοποιείται μέσω cloud συστήματος και αλγορίθμων βελτιστοποίησης, μετατρέποντας τους καταναλωτές σε prosumers και ενισχύοντας το όραμα μιας αποκεντρωμένης ενεργειακής αγοράς (Sonnen GmbH, 2023b).

Οι λειτουργίες της Sonnen συνδέονται στενά με τα έξυπνα δίκτυα:

- Διαχείριση αιχμών ζήτησης (peak shaving) με αποφόρτιση των μπαταριών σε ώρες αιχμής.
- Frequency regulation με μικρο-ενέργειες από χιλιάδες αποκεντρωμένους σταθμούς.
- Demand response σε συνεργασία με διαχειριστές δικτύου (DSOs και TSOs) στη Γερμανία και την Ιταλία.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Ενσωμάτωση με ηλεκτρικά οχήματα (EVs), όπου το Sonnen Charger επιτρέπει αμφίδρομη φόρτιση μέσω Vehicle-to-Home (V2H).

Ερευνητικά έργα έχουν δείξει ότι η χρήση των SonnenBatterie σε κοινότητες μειώνει τη συνολική κατανάλωση δικτύου κατά 20–25% και βελτιώνει την τοπική απορρόφηση ΑΠΕ έως 40% (Kremers et al., 2020). Σε πιλοτικά έργα VPP στη Γερμανία, η Sonnen σε συνεργασία με τη TenneT αξιοποίησε χιλιάδες οικιακές μπαταρίες για frequency balancing, αποδεικνύοντας ότι οι διασυνδεδεμένες μονάδες αποθήκευσης μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες αντίστοιχες μεγάλων σταθμών παραγωγής.

Η Sonnen δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην κυκλική οικονομία ενέργειας. Μέσω του προγράμματος SonnenFlat, οι χρήστες που συμμετέχουν στο δίκτυο ανταλλάσσουν ενέργεια χωρίς επιπλέον κόστος, καταβάλλοντας μόνο μια πάγια συνδρομή. Αυτό το μοντέλο αλλάζει ριζικά τον τρόπο τιμολόγησης και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας στους χρήστες ενεργειακή αυτονομία και προβλέψιμο κόστος (Sonnen GmbH, 2023b).

Ωστόσο, η πλατφόρμα δεν στερείται προκλήσεων. Η υψηλή αρχική επένδυση παραμένει εμπόδιο για μαζική υιοθέτηση, ενώ η διαλειτουργικότητα με third-party συσκευές απαιτεί συνεχή εξέλιξη. Παρά ταύτα, η στρατηγική εξάπλωσης της Sonnen στις ΗΠΑ, την Αυστραλία και την Ιαπωνία δείχνει ότι το επιχειρηματικό της μοντέλο μπορεί να κλιμακωθεί διεθνώς.

Συνολικά, η Sonnen δεν προσφέρει απλώς ένα HEMS, αλλά ένα οικοσύστημα ενεργειακής ανεξαρτησίας που συνδυάζει τεχνολογία αποθήκευσης, αλγορίθμους AI, peer-to-peer συναλλαγές και VPPs. Με αυτόν τον τρόπο, συμβάλλει ενεργά στη μετάβαση σε αποκεντρωμένα, βιώσιμα ενεργειακά συστήματα και αποτελεί σημείο αναφοράς για τις εμπορικές λύσεις HEMS διεθνώς.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος



Εικόνα 29: Το σύστημα SonnenBatterie



Εικόνα 30: Η πλατφόρμα SonnenCommunity

3.6.5 SolarEdge

Η SolarEdge Technologies, με έδρα το Ισραήλ, είναι διεθνώς αναγνωρισμένη για τις λύσεις διαχείρισης φωτοβολταϊκών και ενέργειας, παρέχοντας τεχνολογίες που επεκτείνονται από inverters και power optimizers μέχρι ολοκληρωμένα HEMS και συστήματα αποθήκευσης. Η στρατηγική της εταιρείας επικεντρώνεται στη μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, στην έξυπνη αποθήκευση και στην ενοποίηση οικιακών φορτίων, δημιουργώντας μια πλήρη πλατφόρμα Home Energy Management (SolarEdge Technologies Ltd., 2023).

Η αρχιτεκτονική της λύσης SolarEdge περιλαμβάνει:

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Power Optimizers που συνδέονται με κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ και εξασφαλίζουν βελτιστοποίηση απόδοσης σε επίπεδο module.
- SolarEdge Inverter που μετατρέπει το DC σε AC και επικοινωνεί με τον Home Hub Inverter, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.
- SolarEdge Energy Bank (μπαταρία 10–20 kWh), σχεδιασμένη για οικιακή αποθήκευση με υψηλή απόδοση round-trip >94%.
- SolarEdge Home App, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί, να προγραμματίζει και να βελτιστοποιεί τη χρήση ενέργειας μέσω cloud analytics και AI.

Η πλατφόρμα εφαρμόζει Machine Learning (ML) για πρόβλεψη παραγωγής/κατανάλωσης και αλγορίθμους βελτιστοποίησης φορτίου. Ενδεικτικά, το HEMS μπορεί να αποφασίσει αν θα φορτίσει μια μπαταρία, αν θα προγραμματίσει EV charging ή αν θα τροφοδοτήσει το δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τιμές ενέργειας και καιρικές συνθήκες (Kakran, Kumar, κ.ά., 2021).

Οι βασικές λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- **Smart EV Charging:** Ο φορτιστής SolarEdge EV Charger ενσωματώνεται με το HEMS και μπορεί να φορτίζει το όχημα με ηλιακή ενέργεια ή σε ώρες χαμηλής τιμολόγησης.
- **Backup Power:** Σε συνδυασμό με το Energy Bank και τον Home Hub Inverter, παρέχεται αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σε κρίσιμα φορτία σε περίπτωση διακοπής.
- **Load Control:** Η πλατφόρμα ελέγχει ενεργοβόρες συσκευές (π.χ. θερμοσίφωνες, αντλίες θερμότητας) με στόχο το load shifting.
- **Grid Services Integration:** Υποστήριξη για συμμετοχή σε demand response και VPPs, με APIs που επιτρέπουν συνεργασία με DSOs και τρίτες εφαρμογές (Kakran et al., 2021).

Η SolarEdge έχει δώσει ιδιαίτερη έμφαση στην κυβερνοασφάλεια, ενσωματώνοντας TLS encryption, πιστοποίηση ISO 27001 και δυνατότητες απομακρυσμένων ενημερώσεων firmware. Επίσης, η πλατφόρμα συμμορφώνεται με τους κανονισμούς GDPR και NIS2 για προστασία δεδομένων στην EE.

Η τεχνολογία SolarEdge έχει δοκιμαστεί σε μεγάλα έργα έξυπνων πόλεων και μικροδικτύων. Στην Ιταλία, σε συνεργασία με την Enel X, οι οικιακοί πελάτες με SolarEdge συμμετείχαν σε

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

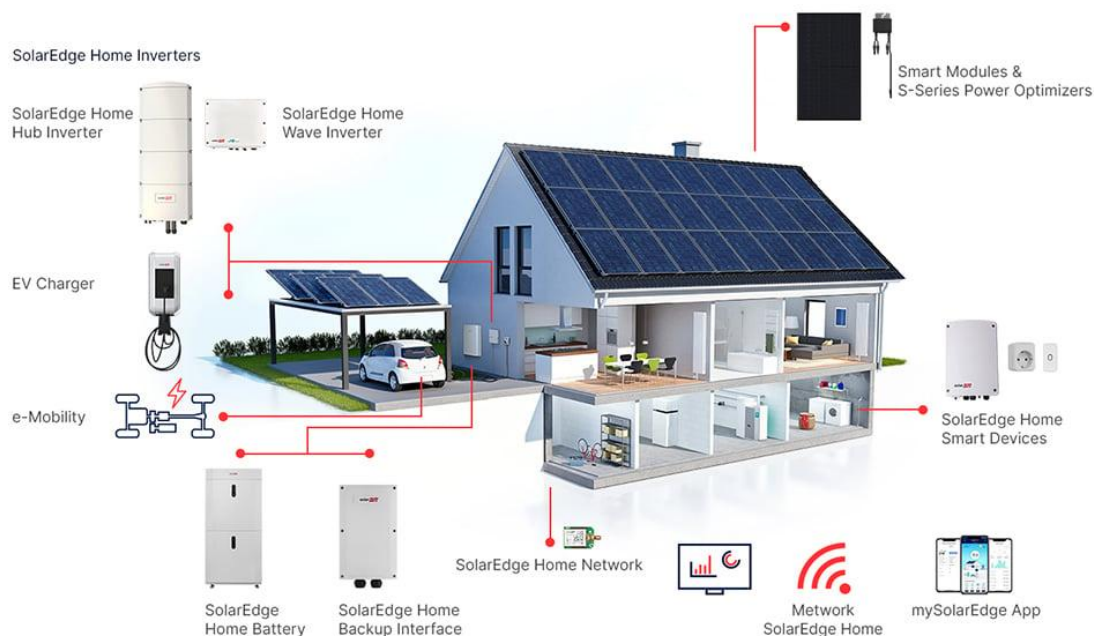
Μπιμπίκας Αθανάσιος

πιλοτικά προγράμματα demand flexibility, μειώνοντας τις αιχμές ζήτησης κατά 18% (Enel X S.r.l., 2022). Στις ΗΠΑ, η πλατφόρμα έχει υιοθετηθεί σε κοινότητες net-zero energy, όπου η χρήση των Energy Bank και EV Chargers μείωσε την εξάρτηση από το δίκτυο κατά 40% (U.S. Department of Energy, 2021).

Συγκριτικά με άλλες εμπορικές λύσεις HEMS, η SolarEdge διακρίνεται για τη βαθιά εξειδίκευση στη διαχείριση ηλιακής ενέργειας. Ενώ πλατφόρμες όπως το Hive ή το Nest εστιάζουν κυρίως στη θέρμανση/ψύξη, η SolarEdge έχει κατασκευαστεί γύρω από τη μεγιστοποίηση της ηλιακής παραγωγής και της αποθήκευσης, ενσωματώνοντας πλήρη οικοσύστημα hardware και software.

Η πρόκληση παραμένει το υψηλό κόστος επένδυσης και η ανάγκη για εξειδικευμένους εγκαταστάτες, ωστόσο η ταχεία ανάπτυξη αγορών όπως οι ΗΠΑ και η Ευρώπη δείχνει ότι το επιχειρηματικό μοντέλο της SolarEdge είναι βιώσιμο και επεκτάσιμο.

Συνολικά, η SolarEdge προσφέρει μία από τις πιο ώριμες και ολοκληρωμένες εμπορικές λύσεις HEMS διεθνώς, συνδυάζοντας AI-driven βελτιστοποίηση, αποθήκευση, EV integration και grid services. Η πλατφόρμα της συνδέει τον οικιακό χώρο με το δίκτυο, καθιστώντας τα νοικοκυριά ενεργούς συμμετέχοντες της ενεργειακής μετάβασης.



Εικόνα 31: Το οικοσύστημα SolarEdge Home με PV, αποθήκευση, EV charging και load management

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Πίνακας 7

Λύση	Κύριες Δυνατότητες	Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Tiko	Οικιακή διαχείριση φορτίων, Demand Response, VPP συμμετοχή	IoT συσκευές, ML αλγόριθμοι, MQTT/REST APIs, Edge computing	Υψηλή εξοικονόμηση κόστους (~15%), μείωση αιχμών 25%, εμπορικά ώριμη λύση	Εξάρτηση από καλή δικτυακή υποδομή, ανάγκη τυποποίησης APIs
Bosch Smart Home	Ολοκληρωμένο HEMS + Smart Home αυτοματισμοί	Smart Home Controller, Zigbee/Z-Wave/Thread, Bosch IoT Suite, ML prediction	Διαλειτουργικότητα, GDPR συμμόρφωση, συμμετοχή σε smart city έργα	Υψηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης, περιορισμένη διεθνής παρουσία
Hive (British Gas)	Smart heating/cooling, EV charging, Demand Response	Zigbee/Wi-Fi, AI forecasting, Hive EV Charger, συνεργασία με Agile Tariff	Ενσωμάτωση με EVs, ισχυρή θέση στο HB, έως 30% εξοικονόμηση στη φόρτιση	Περιορισμένη υποστήριξη εκτός HB, ανάγκη για βελτίωση διαλειτουργικότητας
Sonnen	Αποθήκευση ενέργειας, VPPs, P2P ενεργειακές κοινότητες	SonnenBatterie (5–15 kWh), LiFePO4, AI-driven BMS, V2H υποστήριξη	Υψηλή αξιοπιστία, ενεργειακή αυτονομία, συμμετοχή σε TenneT VPPs	Υψηλό κόστος, ανάγκη εξειδικευμένων εγκαταστατών
SolarEdge	PV optimization, Smart EV charging, HEMS + Grid services	Power optimizers, Inverter, Energy Bank (10–20 kWh), ML load optimization	Εξειδίκευση στη διαχείριση ηλιακής ενέργειας, >94% round-trip efficiency, ευρεία διεθνής εφαρμογή	Υψηλό αρχικό κόστος, εξάρτηση από certified installers

Η συγκριτική ανάλυση των εμπορικών λύσεων HEMS δείχνει ότι κάθε πλατφόρμα ακολουθεί διαφορετική στρατηγική και εστιάζει σε διακριτά τεχνολογικά πλεονεκτήματα. Το Tiko

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

ξεχωρίζει για την ενσωμάτωση σε VPPs και την παροχή υπηρεσιών ευελιξίας σε επίπεδο δικτύου, ενώ το Bosch Smart Home υιοθετεί μια πιο ολιστική προσέγγιση, συνδυάζοντας HEMS με ευρύτερο smart home οικοσύστημα.

Το Hive επικεντρώνεται κυρίως στη διαχείριση θέρμανσης και στη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, προσφέροντας ισχυρή τοπική εφαρμογή στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η Sonnen αναδεικνύεται ως ηγετική δύναμη στην αποθήκευση ενέργειας και στη δημιουργία ενεργειακών κοινοτήτων, με ιδιαίτερη έμφαση σε peer-to-peer συναλλαγές.

Τέλος, η SolarEdge διαφοροποιείται χάρη στην εξειδίκευσή της στη βελτιστοποίηση της ηλιακής παραγωγής και την ολοκληρωμένη ενσωμάτωση PV, αποθήκευσης και EV charging. Συνολικά, οι λύσεις αυτές αντιπροσωπεύουν το τρέχον state-of-the-art στην αγορά HEMS, αποδεικνύοντας ότι η εμπορική και τεχνολογική ωριμότητα συμβαδίζουν με τη σταδιακή μετάβαση προς ένα αποκεντρωμένο και ευφύες ενεργειακό οικοσύστημα.

Κεφάλαιο 4: HEMS και Έξυπνες Πόλεις / Case Studies

Η ανάπτυξη των Home Energy Management Systems (HEMS) εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο αστικού μετασχηματισμού, όπου οι πόλεις εξελίσσονται σε έξυπνες πόλεις (smart cities), αξιοποιώντας τεχνολογίες πληροφορικής, τηλεπικοινωνιών και ενεργειακής διαχείρισης. Στις έξυπνες πόλεις, τα HEMS δεν λειτουργούν απομονωμένα αλλά ως κρίσιμα υποσυστήματα που συνδέουν τον οικιακό τομέα με το ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο, τις υποδομές μεταφορών και τις αστικές ενεργειακές κοινότητες.

Η παραδοσιακή εικόνα της κατανάλωσης ενέργειας, όπου τα νοικοκυριά αποτελούσαν παθητικούς καταναλωτές, υποχωρεί μπροστά στο νέο μοντέλο των προηγμένων prosumers. Μέσα από τα HEMS, τα νοικοκυριά μετατρέπονται σε ενεργούς κόμβους, ικανούς να παράγουν ενέργεια μέσω ΑΠΕ, να την αποθηκεύουν, να την καταναλώνουν στρατηγικά και να την διοχετεύουν στο δίκτυο μέσω μηχανισμών demand response ή peer-to-peer συναλλαγών. Αυτή η μετάβαση επιτρέπει την αποκέντρωση της παραγωγής και δημιουργεί τις βάσεις για νέες μορφές αστικής ενεργειακής οικονομίας.

Σε τεχνικό επίπεδο, η ένταξη των HEMS στις έξυπνες πόλεις υλοποιείται μέσω μιας πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής:

- Στο επίπεδο κατοικίας, αισθητήρες IoT, έξυπνοι μετρητές και αλγόριθμοι AI παρακολουθούν και βελτιστοποιούν την κατανάλωση.
- Στο επίπεδο γειτονιάς, τα HEMS συνδέονται σε ενεργειακές κοινότητες και μικροδίκτυα, επιτρέποντας την ανταλλαγή ενέργειας και την τοπική αποθήκευση.
- Στο επίπεδο πόλης, οι διαχειριστές δικτύου (DSOs) και οι πάροχοι ενέργειας αξιοποιούν δεδομένα από χιλιάδες HEMS για τον συντονισμό προσφοράς-ζήτησης, τη σταθερότητα του συστήματος και την ενσωμάτωση υψηλών ποσοστών ΑΠΕ.

Η δυναμική αυτή δεν αφορά μόνο την ηλεκτρική ενέργεια αλλά και τη διαλειτουργικότητα με άλλες κρίσιμες υποδομές. Για παράδειγμα, η διασύνδεση των HEMS με υποδομές έξυπνων μεταφορών (π.χ. σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων) καθιστά εφικτή την αμφίδρομη ροή ενέργειας μέσω τεχνολογιών Vehicle-to-Grid (V2G) και Vehicle-to-Home (V2H). Αντίστοιχα, η σύνδεση με έξυπνα κτίρια και BEMS οδηγεί στη δημιουργία υβριδικών συστημάτων που καλύπτουν τόσο οικιακές όσο και εμπορικές ανάγκες, ενώ η ενσωμάτωση

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

σε smart grids και μικροδίκτυα ενισχύει την ανθεκτικότητα έναντι διακοπών ή αστάθειας του κεντρικού δικτύου.

Η διάσταση της κυβερνοασφάλειας είναι επίσης καθοριστική. Τα HEMS συλλέγουν μεγάλο όγκο δεδομένων κατανάλωσης, τα οποία μπορούν να αποκαλύψουν συμπεριφορές χρηστών. Στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, η προστασία αυτών των δεδομένων και η συμμόρφωση με κανονισμούς όπως ο GDPR αποτελούν κρίσιμους παράγοντες αποδοχής και εμπιστοσύνης.

Η πολιτική και ρυθμιστική διάσταση είναι εξίσου σημαντική. Η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της Οδηγίας RED II και του European Green Deal προωθεί την ενεργή συμμετοχή των πολιτών στην ενεργειακή αγορά, δίνοντας ώθηση σε μοντέλα όπως οι ενεργειακές κοινότητες και τα VPPs.

Έργα όπως το Horizon 2020 InterFlex και το Grid4EU έχουν αποδείξει ότι τα HEMS μπορούν να συμβάλουν καθοριστικά στην εξισορρόπηση του δικτύου και στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης σε αστικό επίπεδο.

Σε αυτό το πλαίσιο, η State-of-the-Art ανάλυση των HEMS μέσα στις έξυπνες πόλεις δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνολογία, αλλά επεκτείνεται και στη συστημική ενσωμάτωση: πώς δηλαδή τα HEMS μπορούν να λειτουργήσουν ως γέφυρα ανάμεσα στο νοικοκυριό, την κοινότητα και το αστικό δίκτυο.

Η αξιολόγηση εστιάζει σε τρία βασικά επίπεδα:

- **Τεχνολογικό:** εφαρμογή AI, IoT, blockchain και edge computing για ενεργειακή βελτιστοποίηση.
- **Οικονομικό:** μείωση κόστους, συμμετοχή σε αγορές ενέργειας, νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες.
- **Κοινωνικό/Περιβαλλοντικό:** ενεργειακή δικαιοσύνη, μείωση ενεργειακής φτώχειας, συμβολή στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Συνολικά, τα HEMS συνιστούν πλέον στρατηγικό πυλώνα των έξυπνων πόλεων, καθώς επιτρέπουν την αποκέντρωση, την ενεργειακή αυτονομία και τη συμμετοχή των πολιτών στη διαμόρφωση του ενεργειακού μέλλοντος. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται case studies από την Ευρώπη και την Ελλάδα, αναδεικνύοντας πώς οι τεχνολογίες HEMS

εφαρμόζονται στην πράξη, ποια είναι τα οφέλη τους και ποιες προκλήσεις παραμένουν ανοιχτές για το μέλλον.

4.1 Ευρωπαϊκά Case Studies

4.1.1 Άμστερνταμ – HEMS, Smart Grids και Urban Living Labs

Το Άμστερνταμ έχει καθιερωθεί ως ένα από τα πιο αξιοσημείωτα παραδείγματα πόλης που υλοποιεί ολιστική στρατηγική ενεργειακής μετάβασης, με στόχο την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Ο σχεδιασμός αυτός στηρίζεται σε πιλοτικά έργα μεγάλης κλίμακας, όπου τα Home Energy Management Systems (HEMS) αποτελούν κρίσιμο σύνδεσμο μεταξύ οικιακού τομέα, έξυπνων δικτύων (smart grids) και αστικών πολιτικών βιωσιμότητας.

Το έργο CITY-ZEN και οι πιλοτικές εφαρμογές HEMS

Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος CITY-ZEN (FP7), το Άμστερνταμ πραγματοποίησε εκτεταμένες αναβαθμίσεις σε περισσότερα από 100.000 m² κτιρίων, υλοποίησε δοκιμές smart grid σε επίπεδο γειτονιάς και ενσωμάτωσε αποθήκευση ενέργειας μέσω οικιακών και κοινοτικών μπαταριών. Τα HEMS που εγκαταστάθηκαν αξιοποιούσαν αλγορίθμους πρόβλεψης και βελτιστοποίησης για τη λήψη αυτόνομων αποφάσεων: πότε να καταναλώσουν, πότε να αποθηκεύσουν και πότε να διοχετεύσουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο.

Η λειτουργία αυτή κατέστησε δυνατή τη συμμετοχή των νοικοκυριών σε μηχανισμούς demand response και δυναμικής τιμολόγησης, μειώνοντας αιχμές φορτίου και ενισχύοντας την αποδοτικότητα του δικτύου (EUROCITIES, 2019).



Εικόνα 32: Smart-grid υποδομές στο Άμστερνταμ — ενδεικτική απεικόνιση της μετάβασης σε ευφυή δίκτυα.

Energy Atlas – Η πλατφόρμα δεδομένων της πόλης

Ένα ακόμη βασικό εργαλείο του Άμστερνταμ είναι το Energy Atlas, μια πλατφόρμα ανοικτών δεδομένων που χαρτογραφεί σε χωρικό επίπεδο την κατανάλωση, την παραγωγή και το δυναμικό ΑΠΕ. Το Energy Atlas επιτρέπει την ενσωμάτωση real-time δεδομένων στα HEMS για βέλτιστη λήψη αποφάσεων, την ανάλυση χωρικών προτύπων κατανάλωσης από τις δημοτικές αρχές και τη δημιουργία επιχειρηματικών μοντέλων peer-to-peer συναλλαγών ενέργειας (Amsterdam Smart City, χ.χ.; van Winden, 2017).

Τεχνική Αρχιτεκτονική – Από το σπίτι στο δίκτυο

Η τεχνική αρχιτεκτονική που εφαρμόστηκε στηρίζεται σε τρία επίπεδα:

- Οικιακό (HEMS): συλλογή δεδομένων από μετρητές, αισθητήρες IoT και έξυπνες συσκευές.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Γειτονιά/Μικροδίκτυο: συντονισμός πολλών HEMS για τοπική βελτιστοποίηση φορτίων.
- Διανομέας (DSO): τα HEMS στέλνουν δεδομένα κατανάλωσης/παραγωγής στον διαχειριστή, λαμβάνοντας εντολές τιμολόγησης ή ελέγχου.

Η αμφίδρομη αυτή ροή δεδομένων καθιστά τα HEMS ενεργούς κόμβους (prosumer hubs), επιτρέποντας τόσο την πρόβλεψη φορτίου όσο και την αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων.

Προηγμένες εφαρμογές: V2G και Blockchain P2P Trading

Πέρα από τις κλασικές λειτουργίες, το Άμστερνταμ υπήρξε πρωτοπόρο σε δύο τομείς:

- Vehicle-to-Grid (V2G): Η πόλη ενσωμάτωσε πιλοτικά EV chargers διασυνδεδεμένους με HEMS, ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να λειτουργούν ως μονάδες αποθήκευσης. Τα συστήματα μπορούσαν να προγραμματίζουν φόρτιση/εκφόρτιση με βάση προβλέψεις ΑΠΕ, τιμολόγηση και ανάγκες μετακίνησης. Τα πιλοτικά έδειξαν βελτίωση απορρόφησης ΑΠΕ έως 30% και παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης (ElaadNL, 2019).
- Peer-to-Peer (P2P) trading με blockchain: Στο πλαίσιο του PowerMatching City, τα HEMS χρησιμοποιήθηκαν ως agents που εκτελούσαν ενεργειακές συναλλαγές μεταξύ γειτόνων. Μέσω smart contracts σε blockchain ledger, καταγράφηκαν συναλλαγές με πλήρη διαφάνεια και ασφάλεια. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση κόστους για τα νοικοκυριά κατά 10–15% και αύξηση ιδιοκατανάλωσης (Tushar κ.ά., 2018).

Μετρήσιμα Αποτελέσματα (KPIs)

Σύμφωνα με τις αναφορές του CITY-ZEN και άλλων έργων:

- Μείωση κατανάλωσης θέρμανσης/ψύξης έως 80% σε ανακαινισμένα κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.
- Αύξηση ιδιοκατανάλωσης ΑΠΕ κατά 20% με συνδυασμό HEMS και μπαταριών.
- Μείωση αιχμών φορτίου έως 15% μέσω DR.
- Βελτίωση αποδοχής δυναμικής τιμολόγησης, με το 70% των νοικοκυριών να δηλώνει μεγαλύτερη κατανόηση και εμπιστοσύνη στη χρήση HEMS.

Ρυθμιστικό και επιχειρηματικό πλαίσιο

Για να στηρίξει την καινοτομία, ο δήμος δημιούργησε το Amsterdam Smart City, πλατφόρμα συνεργασίας δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Επέτρεψε τη λειτουργία aggregators, δοκίμασε sandbox projects για blockchain και V2G και έδωσε χώρο σε επιχειρηματικά μοντέλα που συνδυάζουν HEMS με υπηρεσίες αγοράς ευελιξίας. Το οικοσύστημα αυτό ενίσχυσε τη διαλειτουργικότητα και δημιούργησε νέες αγορές για τους πολίτες-παραγωγούς.

Συμπέρασμα

Το Άμστερνταμ δεν περιορίστηκε στην απλή εγκατάσταση HEMS αλλά τα ενσωμάτωσε σε ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα που περιλαμβάνει smart grids, V2G, blockchain και πλατφόρμες δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο, κατάφερε να μετατρέψει τα νοικοκυριά σε ενεργούς διαχειριστές ενέργειας, να αυξήσει την απορρόφηση ΑΠΕ και να μειώσει τις αιχμές ζήτησης.

Αποτελεί έτσι χαρακτηριστικό παράδειγμα πόλης που χρησιμοποιεί τα HEMS όχι μόνο ως τεχνικό εργαλείο, αλλά και ως καταλύτη ενεργειακής δημοκρατίας και αστικής ανθεκτικότητας.

4.1.2 Βαρκελώνη – HEMS, Ανακαινίσεις Κτιρίων και Ενεργειακές Κοινότητες

Η Βαρκελώνη έχει υιοθετήσει μια στρατηγική που συνδυάζει ανακαίνιση κτιρίων, τοπική παραγωγή ενέργειας και συμμετοχή πολιτών σε ενεργειακές κοινότητες. Η πόλη αξιοποιεί τα HEMS ως βασικό εργαλείο για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης, την αύξηση της αυτοπαραγωγής και τη μείωση της ενεργειακής φτώχειας.

Ανακαινίσεις κτιρίων με HEMS

Μέρος του σχεδίου Pla Clima επικεντρώνεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω ενεργειακών ανακαινίσεων. Στις παρεμβάσεις αυτές τα HEMS εγκαθίστανται εξ αρχής, ώστε οι ένοικοι να έχουν πλήρη εικόνα της κατανάλωσης και να μπορούν να προσαρμόζουν τη χρήση τους.

Οι λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- ανάλυση κατανάλωσης ανά συσκευή,
- ειδοποιήσεις για ενεργοβόρες συσκευές,
- προτάσεις βελτίωσης απόδοσης.

Η χρήση HEMS σε ανακαινίσεις έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε μείωση κατανάλωσης έως 20–25%, με σημαντική βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κατοίκων (BABLE Smart Cities, χ.χ.)

Ενεργειακές κοινότητες και peer-to-peer συναλλαγές

Η Βαρκελώνη έχει επενδύσει στη δημιουργία τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων, όπου εγκαθίστανται κοινόχρηστα φωτοβολταϊκά και συστήματα αποθήκευσης. Τα HEMS κάθε νοικοκυριού συνδέονται με την κοινοτική πλατφόρμα και:

- διαχειρίζονται την ιδιοκατανάλωση,
- καταγράφουν την κατανάλωση/παραγωγή σε πραγματικό χρόνο,
- διευκολύνουν peer-to-peer ενεργειακές συναλλαγές μεταξύ μελών της κοινότητας.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κοινότητα της Barceloneta, όπου τα HEMS επιτρέπουν τη δίκαιη κατανομή της παραγόμενης ενέργειας (~29,5 kWp εγκατάσταση, ~43,4 MWh ετήσια παραγωγή) και συμβάλλουν στη μείωση της ενεργειακής φτώχειας σε ευάλωτες ομάδες (Essència Barceloneta Cooperative, 2023).

Τεχνική αρχιτεκτονική HEMS-by-design

Η Βαρκελώνη εφαρμόζει προσέγγιση «HEMS-by-design», όπου οι τεχνολογίες ενσωματώνονται από το στάδιο της ανακαίνισης:

- έξυπνοι μετρητές και αισθητήρες IoT,
- αλγόριθμοι πρόβλεψης για κατανάλωση και παραγωγή,
- κανόνες load shifting (πλυντήρια, θερμοσίφωνες, αντλίες θερμότητας),
- ενεργοποίηση demand response σε ώρες αιχμής.

Η τεχνική αυτή προσέγγιση επιτρέπει τον τοπικό εξισορροπισμό (self-balancing) σε επίπεδο γειτονιάς, μειώνοντας τις ανάγκες για εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο.

Κοινωνικές και πολιτικές διαστάσεις

Η Βαρκελώνη αντιμετωπίζει έντονα το ζήτημα της ενεργειακής φτώχειας. Μέσω της χρήσης HEMS, οι κάτοικοι αποκτούν διαφάνεια και έλεγχο στην κατανάλωσή τους, ενώ οι τοπικές ενεργειακές κοινότητες ενισχύουν την κοινωνική συνοχή. Ο δήμος, με την πρωτοβουλία

Barcelona Energia, υποστηρίζει τη συμμετοχή πολιτών και μικρών επιχειρήσεων σε αυτά τα σχήματα, ενδυναμώνοντας την τοπική ενεργειακή δημοκρατία (Barcelona City Hall, χ.χ.).

Συμπέρασμα

Η Βαρκελώνη δείχνει πώς η ενσωμάτωση HEMS σε ανακαινίσεις κτιρίων και η ανάπτυξη ενεργειακών κοινοτήτων μπορεί να προσφέρει μετρήσιμα τεχνικά και κοινωνικά οφέλη. Η τεχνολογική αρχιτεκτονική HEMS-by-design και η συμμετοχή των πολιτών αποτελούν βασικά στοιχεία ενός πιο ανθεκτικού και δίκαιου αστικού ενεργειακού μοντέλου.

4.1.3 Γερμανία – Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής (VPPs) και HEMS

Η Γερμανία βρίσκεται στην αιχμή της ενεργειακής μετάβασης (Energiewende), με στόχο την πλήρη απανθρακοποίηση έως το 2045. Ένα από τα πιο καινοτόμα εργαλεία που εφαρμόζονται είναι οι Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής (Virtual Power Plants – VPPs), οι οποίοι επιτρέπουν τον συντονισμό χιλιάδων αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης. Στην καρδιά αυτών των VPP βρίσκονται τα HEMS, που λειτουργούν ως «agents» για τα οικιακά νοικοκυριά και τις μικρές επιχειρήσεις.

Η πλατφόρμα Next Kraftwerke

Η εταιρεία Next Kraftwerke, με έδρα την Κολωνία, διαχειρίζεται ένα από τα μεγαλύτερα VPPs στην Ευρώπη, γνωστό ως Next Pool. Το δίκτυο περιλαμβάνει περισσότερες από 10.000 αποκεντρωμένες μονάδες – φωτοβολταϊκά, αιολικά, βιομάζα, μπαταρίες, αλλά και οικιακούς πόρους συνδεδεμένους μέσω HEMS.

Η πλατφόρμα βασίζεται σε:

- συνεχή συλλογή δεδομένων από τα HEMS και τους μετρητές,
- αλγορίθμους πρόβλεψης για παραγωγή και κατανάλωση,
- εντολές dispatch που αποστέλλονται στα νοικοκυριά σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 34: Σχηματική αναπαράσταση Εικονικού Σταθμού Παραγωγής (VPP) — σύνδεση ΑΠΕ, αποθήκευσης και καταναλωτών μέσω πλατφόρμας aggregator.

Έτσι, κάθε HEMS γίνεται ένας «κόμβος ευελιξίας», ικανός να μειώσει ή να αυξήσει φορτία ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου (Next Kraftwerke GmbH, 2024).

Ρόλος των HEMS στα VPP

Τα HEMS σε αυτό το πλαίσιο δεν λειτουργούν απλώς για βελτιστοποίηση κατανάλωσης, αλλά συμμετέχουν ενεργά σε αγορές ενέργειας:

- Προβλέπουν την τοπική κατανάλωση και διαθέσιμη αποθήκευση.
- Υποβάλλουν προτάσεις ευελιξίας στον aggregator (Next Kraftwerke).
- Εκτελούν εντολές σε πραγματικό χρόνο, π.χ. ενεργοποίηση/απενεργοποίηση φορτίων, φόρτιση/εκφόρτιση μπαταριών.

Αυτό το «bottom-up» μοντέλο επιτρέπει τη συμμετοχή ακόμη και μικρών νοικοκυριών σε μηχανισμούς αγοράς ενέργειας που παραδοσιακά ήταν προσβάσιμοι μόνο σε μεγάλες μονάδες παραγωγής (Kieny κ.ά., 2019).

Ερευνητικά και πιλοτικά ευρήματα

- Το VPP της Next Kraftwerke έχει αποδείξει ότι μπορεί να παρέχει υπηρεσίες εξισορρόπησης (frequency regulation, secondary reserve) με αξιοπιστία αντίστοιχη μεγάλων συμβατικών μονάδων (Next Kraftwerke GmbH, 2024).

- Μελέτες έδειξαν ότι η συμμετοχή οικιακών μπαταριών μέσω HEMS σε VPP μπορεί να αυξήσει την τοπική απορρόφηση ΑΠΕ κατά 20–30% (D. Mocanu κ.ά., 2018).
- Η χρήση multi-agent reinforcement learning βελτίωσε τη συνολική σταθερότητα του δικτύου, με μείωση αιχμών φορτίου έως 15% (Y. Liu, Yu, κ.ά., 2021).

Κοινωνικές και αγοραίες διαστάσεις

Η επιτυχία του VPP μοντέλου στη Γερμανία συνδέεται με το ισχυρό θεσμικό πλαίσιο που επιτρέπει σε aggregators να εκπροσωπούν μικρούς καταναλωτές/παραγωγούς στην αγορά ηλεκτρισμού. Οι πολίτες που συμμετέχουν μέσω HEMS απολαμβάνουν:

- οικονομικά οφέλη από την πώληση πλεονάζουσας ενέργειας,
- ενίσχυση αυτονομίας, αφού οι μπαταρίες τους χρησιμοποιούνται στρατηγικά,
- κοινωνική αποδοχή, λόγω της διαφάνειας που παρέχουν τα συστήματα.

Συμπέρασμα

Η περίπτωση της Γερμανίας δείχνει πώς τα HEMS, όταν συνδεθούν με έναν aggregator όπως η Next Kraftwerke, μπορούν να ξεπεράσουν τον ρόλο της απλής «οικιακής βελτιστοποίησης» και να μετατραπούν σε δομικά στοιχεία αγορών ευελιξίας. Το μοντέλο VPP αποδεικνύει ότι η ενεργειακή μετάβαση δεν χρειάζεται μόνο μεγάλες υποδομές, αλλά και χιλιάδες μικρούς, ευφυείς κόμβους που συνεργάζονται μέσω ψηφιακών πλατφορμών.

Οι ευρωπαϊκές εμπειρίες δείχνουν ότι η εφαρμογή των HEMS δεν περιορίζεται σε θεωρητικά μοντέλα, αλλά υλοποιείται ήδη σε μεγάλης κλίμακας πιλοτικά έργα και εμπορικές εφαρμογές. Από τα έξυπνα δίκτυα της Κοπεγχάγης μέχρι τα πρότυπα ενεργειακά τετράγωνα στο Άμστερνταμ, τα αστικά οικοσυστήματα με HEMS στη Βαρκελώνη και τα εικονικά εργοστάσια της Γερμανίας, προκύπτει μια ενιαία εικόνα: τα HEMS αποτελούν κρίσιμους κόμβους στη μετάβαση προς ένα αποκεντρωμένο, ψηφιοποιημένο και συνεργατικό ενεργειακό σύστημα.

Η σύγκλιση τεχνολογιών όπως η AI, το IoT και τα VPPs αναδεικνύει τον ρόλο των HEMS όχι μόνο ως εργαλείων βελτιστοποίησης της κατανάλωσης, αλλά και ως μηχανισμών ένταξης των πολιτών στη νέα ενεργειακή αγορά. Οι ευρωπαϊκές πρακτικές αποτελούν σαφείς ενδείξεις ότι η επόμενη φάση της ενεργειακής μετάβασης απαιτεί την ενεργό συμμετοχή των χρηστών και τη διασύνδεσή τους με το ηλεκτρικό δίκτυο, καθιστώντας τα HEMS θεμέλιο λίθο της ενεργειακής δημοκρατίας.

4.2 Η Ελληνική Πραγματικότητα: Ενεργειακές Κοινότητες και Έξυπνα Δίκτυα με HEMS

Η Ελλάδα, ακολουθώντας το ευρωπαϊκό παράδειγμα και εναρμονιζόμενη με την Οδηγία RED II (Renewable Energy Directive II), έχει αναπτύξει ένα ιδιαίτερο θεσμικό και τεχνολογικό πλαίσιο για την προώθηση της αποκεντρωμένης παραγωγής και της ενεργειακής δημοκρατίας. Ο θεσμός των Ενεργειακών Κοινοτήτων (Energy Communities), που εισήχθη με τον Ν.4513/2018 και ενισχύθηκε με τον Ν.5037/2023, δίνει τη δυνατότητα σε πολίτες, ΟΤΑ και μικρές επιχειρήσεις να συμμετέχουν ενεργά στην παραγωγή, κατανάλωση και διαχείριση ενέργειας.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα HEMS καθίστανται κρίσιμα εργαλεία, καθώς προσφέρουν τη διασύνδεση μεταξύ των οικιακών εγκαταστάσεων ΑΠΕ, των συστημάτων αποθήκευσης και του ηλεκτρικού δικτύου.

Η ελληνική αγορά ενέργειας αντιμετωπίζει συγκεκριμένες προκλήσεις που ενισχύουν τη σημασία των HEMS:

- Υψηλό ενεργειακό κόστος, ιδίως σε περιόδους αιχμής.
- Εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα, που επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος.
- Περιορισμένη χωρητικότητα δικτύου, ιδιαίτερα σε νησιωτικές περιοχές.
- Ραγδαία ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σε στέγες και αγροτικές εφαρμογές.

Τα HEMS μπορούν να προσφέρουν λύσεις μέσα από:

- Net Metering και Virtual Net Metering, όπου οι prosumers μειώνουν το ενεργειακό τους κόστος μέσω συμψηφισμού.
- Αυτόνομη διαχείριση φορτίων, με βάση τη δυναμική τιμολόγηση και τις μεταβολές παραγωγής ΑΠΕ.
- Peer-to-peer συναλλαγές ενέργειας, στο πλαίσιο των ενεργειακών κοινοτήτων.
- Ενσωμάτωση σε Έξυπνα Δίκτυα, ώστε η διαχείριση της ζήτησης να υποστηρίζει τη σταθερότητα του συστήματος.

Η ελληνική εμπειρία είναι ιδιαίτερα σημαντική για μια SoTA ανάλυση, καθώς συνδυάζει το θεσμικό καινοτόμο πλαίσιο με τις πρακτικές προκλήσεις εφαρμογής σε μια χώρα με νησιωτικό χαρακτήρα, έντονη ηλιοφάνεια και αυξημένη ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία.

4.2.1 Κρήτη – Η Ενεργειακή Κοινότητα Μινωικής Εμπειρίας (Minoan Energy Community – MEC)

Η Minoan Energy Community (MEC) στην Κρήτη αποτελεί ένα από τα πιο εμβληματικά παραδείγματα εφαρμογής των Ενεργειακών Κοινοτήτων στην Ελλάδα και στην Ευρώπη. Ιδρύθηκε το 2019 στο Ηράκλειο και το 2020 αποτέλεσε την πρώτη κοινότητα στην Ελλάδα που υλοποίησε έργο εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού (Virtual Net Metering – VNM) μεγάλης κλίμακας, θέτοντας τις βάσεις για ένα νέο μοντέλο ενεργειακής αυτονομίας.

Θεσμικό Πλαίσιο και Καινοτομία

Η MEC αξιοποίησε το νομοθετικό πλαίσιο του Ν.4513/2018 για τις Ενεργειακές Κοινότητες, που έδωσε για πρώτη φορά τη δυνατότητα σε πολίτες, ΟΤΑ και μικρές επιχειρήσεις να συνεταιριστούν για την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας. Μέσω του Virtual Net Metering, οι συμμετέχοντες μπορούν να συμψηφίζουν την παραγόμενη ενέργεια από τον κοινόχρηστο φωτοβολταϊκό σταθμό με την κατανάλωσή τους σε διαφορετικές τοποθεσίες. Αυτή η δυνατότητα ήταν καθοριστική για την Κρήτη, όπου οι ανάγκες σε ενέργεια είναι αυξημένες και οι καταναλωτές συχνά διασκορπισμένοι σε διαφορετικά κτίρια ή αγροτικές εκτάσεις.

Η νομοθεσία εξελίχθηκε περαιτέρω με τον Ν.5037/2023, ο οποίος ενσωμάτωσε την Οδηγία RED II και εισήγαγε τους όρους Renewable Energy Communities (REC) και Citizen Energy Communities (CEC), διευρύνοντας τις δυνατότητες συμμετοχής των μελών και εναρμονίζοντας το ελληνικό πλαίσιο με τα ευρωπαϊκά πρότυπα.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Υλοποίηση

Το πρώτο έργο της MEC περιλάμβανε έναν φωτοβολταϊκό σταθμό 405 kWp, ο οποίος εξυπηρετεί τις ενεργειακές ανάγκες 103 μελών μέσω VNM. Η παραγόμενη ενέργεια συμψηφίζεται με τις καταναλώσεις τους σε διάστημα 25 ετών, εξασφαλίζοντας σταθερό και χαμηλό κόστος ρεύματος. Στη συνέχεια, το εγχείρημα επεκτάθηκε με νέα έργα, φτάνοντας αθροιστικά ~1.5 MW εγκατεστημένης ισχύος και πάνω από 600 μέλη, καθιστώντας την MEC

μία από τις μεγαλύτερες ενεργειακές κοινότητες στην Ελλάδα (Energy Cities – LIFE LOOP, 2024).

Τα μέλη της κοινότητας έχουν πρόσβαση σε ψηφιακές πλατφόρμες παρακολούθησης κατανάλωσης και παραγωγής, με δυνατότητα ενσωμάτωσης HEMS σε οικιακό επίπεδο. Μέσω των HEMS, επιτυγχάνεται load shifting (π.χ. μεταφορά χρήσης ενεργοβόρων συσκευών σε ώρες υψηλής ηλιοφάνειας) και βελτιστοποίηση ιδιοκατανάλωσης, μειώνοντας την ανάγκη για αγορά ρεύματος από το δίκτυο. Παράλληλα, τα HEMS παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, που είναι κρίσιμα για την ανάλυση ενεργειακών προφίλ και την πρόβλεψη φορτίου.

Κοινωνική και Οικονομική Διάσταση

Ένα από τα πιο καινοτόμα στοιχεία της MEC είναι η συμβολή της στην καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας. Μέρος της παραγόμενης ενέργειας διατίθεται σε ευάλωτα νοικοκυριά, μειώνοντας δραστικά το κόστος ηλεκτρισμού τους. Με αυτόν τον τρόπο, η κοινότητα δεν περιορίζεται μόνο σε τεχνική καινοτομία αλλά λειτουργεί ως εργαλείο κοινωνικής πολιτικής, ευθυγραμμισμένο με την έννοια της ενεργειακής δημοκρατίας.

Η συμμετοχή των πολιτών δεν είναι μόνο οικονομική αλλά και εκπαιδευτική: οργανώνονται δράσεις ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης για την εξοικονόμηση ενέργειας και την αποτελεσματική χρήση των HEMS σε επίπεδο νοικοκυριού.

Μελλοντικές Προοπτικές

Η MEC σχεδιάζει την περαιτέρω ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος, την ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης (BESS) και τη σύνδεση με έξυπνα δίκτυα (Smart Grids). Η προοπτική δημιουργίας εικονικών σταθμών παραγωγής (VPPs) μέσω της συσσωρευμένης ισχύος των μελών αποτελεί στρατηγικό στόχο, ώστε η κοινότητα να αποκτήσει ενεργό ρόλο και στην αγορά εξισορρόπησης. Τα HEMS θα διαδραματίσουν καίριο ρόλο σε αυτή τη μετάβαση, λειτουργώντας ως διεπαφή ανάμεσα στον τελικό χρήστη και το δίκτυο.

4.2.2 Τήλος – Υβριδικό Μικροδίκτυο, Αποθήκευση και HEMS σε Νησιωτικό Περιβάλλον

Η Τήλος αποτελεί το πρώτο ελληνικό νησί που υλοποίησε ολοκληρωμένο υβριδικό μικροδίκτυο με δυνατότητες νησιδοποίησης (islanding), στηριζόμενο αποκλειστικά σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και συστήματα αποθήκευσης. Το έργο TILOS Project (Technology Innovation for the Local Scale, Optimum Integration of Battery Energy Storage), που ξεκίνησε το 2015 με χρηματοδότηση του προγράμματος Horizon 2020, κατέστησε το νησί διεθνές πρότυπο για την εφαρμογή της ενεργειακής μετάβασης σε μικρά, απομονωμένα δίκτυα.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Συστήματος

Το υβριδικό σύστημα της Τήλου συνδυάζει:

- Ανεμογεννήτρια 800 kW, η οποία καλύπτει σημαντικό μέρος της ετήσιας ζήτησης.
- Φωτοβολταϊκό πάρκο 160 kWp, το οποίο ενισχύει την παραγωγή σε ώρες αιχμής ηλιοφάνειας.
- Συστοιχία μπαταριών 0.8 MW / 2.8 MWh, βασισμένη σε τεχνολογία NaNiCl₂ (sodium nickel chloride), με δυνατότητα παροχής υπηρεσιών σταθεροποίησης συχνότητας και ικανότητα black-start.

Το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα (island mode), χωρίς σύνδεση με το δίκτυο της Κω, ή σε παράλληλη λειτουργία, παρέχοντας υπηρεσίες επικουρικής ευελιξίας στο περιφερειακό σύστημα (Kaldellis κ.ά., 2017).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Official Launch of  &
3rd SDSN Mediterranean Conference
Sept. 7 – 8, 2017 | Athens, Greece

TILOS Project
The FACTS (1/2)

Project name: Technology Innovation for the LOcal Scale,
optimum integration of battery energy storage

Duration: 01.02.2015 to 31.01.2019

Website: <http://www.tiloshorizon.eu>

Objectives:
Development and operation of a wind-PV hybrid system including a prototype battery storage unit.

Optimum smart-grid control system shall:

- ▲ Perform microgrid energy management
- ▲ Maximize RES penetration with focus to grid stability
- ▲ Export guaranteed energy to the grid, and
- ▲ Provide ancillary services to the main grid

Additional features:

- ▲ Demand-Side Management (with smart-meters)
- ▲ Wind and PV energy forecasting



Εικόνα 35: Minoan Energy Community (Κρήτη): κοινοτική μετάβαση σε ΑΠΕ και εικονικό συμψηφισμό με συμμετοχή πολιτών

Ο Ρόλος των HEMS

Η καινοτομία του έργου δεν περιορίζεται στις υποδομές ΑΠΕ και αποθήκευσης, αλλά εκτείνεται και στη διαχείριση της κατανάλωσης μέσω HEMS. Σε δεκάδες κατοικίες και δημοτικά κτίρια εγκαταστάθηκαν:

- Έξυπνοι μετρητές και αισθητήρες IoT, που καταγράφουν την κατανάλωση σε πραγματικό χρόνο.
- HEMS πλατφόρμες, που επιτρέπουν στους κατοίκους να παρακολουθούν και να προσαρμόζουν τη χρήση τους.
- Αλγόριθμοι πρόβλεψης φορτίου, που ενσωματώνουν δεδομένα καιρού και ιστορικής κατανάλωσης για βέλτιστο προγραμματισμό.

Με αυτό τον τρόπο, οι χρήστες δεν είναι απλοί καταναλωτές, αλλά ενεργοί διαχειριστές (prosumers) που συμβάλλουν στην ισορροπία του μικροδικτύου. Το HEMS δίνει τη δυνατότητα load shifting, π.χ. μεταφορά χρήσης πλυντηρίων ή αντλιών θερμότητας σε ώρες αυξημένης παραγωγής ΑΠΕ, μεγιστοποιώντας την ιδιοκατανάλωση και μειώνοντας την ανάγκη για εφεδρική παραγωγή.

Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Οφέλη

Η εφαρμογή του έργου οδήγησε σε **διείσδυση ΑΠΕ έως 70–75% ετησίως** στο ενεργειακό μείγμα του νησιού, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση πετρελαίου για ηλεκτροπαραγωγή.

Το αποτέλεσμα ήταν:

- Μείωση εκπομπών CO₂ κατά χιλιάδες τόνους ετησίως.
- Σταθερή και αξιόπιστη ηλεκτροδότηση, ακόμα και σε περιόδους αιχμής.
- Μείωση ενεργειακού κόστους για το δίκτυο, λόγω περιορισμού των δαπανηρών μεταφορών καυσίμων.

Κοινωνικές και Οικονομικές Προεκτάσεις

Η Τήλος απέκτησε διεθνή αναγνώριση, βραβευόμενη με το EU Sustainable Energy Award (2017) και το RESponsible Island Prize (2021) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η επιτυχία του έργου ενίσχυσε την εικόνα της Ελλάδας ως πεδίου καινοτομίας στις ΑΠΕ, ενώ ταυτόχρονα ανέδειξε τον ρόλο των μικρών κοινοτήτων ως πρωτοπόρων στην ενεργειακή μετάβαση.

Η χρήση HEMS είχε επίσης κοινωνικό αντίκτυπο, καθώς οι κάτοικοι ενημερώθηκαν και εκπαιδεύτηκαν στη συμμετοχική ενεργειακή διαχείριση, γεγονός που ενδυνάμωσε την τοπική κοινωνία και αύξησε την αποδοχή των τεχνολογιών.

Μελλοντικές Προοπτικές

Το έργο της Τήλου λειτουργεί ως πιλοτικό πρότυπο για άλλα μη διασυνδεδεμένα νησιά της Ελλάδας (π.χ. Αστυπάλαια, Ικαρία). Η μελλοντική ένταξη ηλεκτροκίνησης (EVs) και V2G τεχνολογιών μπορεί να προσφέρει επιπλέον ευελιξία, με τα HEMS να αποτελούν το βασικό λογισμικό εργαλείο για την ομαλή ενσωμάτωση.

4.2.3 Αστυπάλαια – Smart & Sustainable Island: HEMS, Αποθήκευση και Ηλεκτροκίνηση

Η Αστυπάλαια έχει χαρακτηριστεί διεθνώς ως το «πρώτο έξυπνο και βιώσιμο νησί» της Ελλάδας, μέσα από το πρόγραμμα Smart & Sustainable Island, το οποίο αποτελεί συνεργασία της Ελληνικής Δημοκρατίας με τον Όμιλο Volkswagen. Το έργο ξεκίνησε το 2020 και

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

αποτελεί μια ολιστική προσέγγιση ενεργειακής μετάβασης, που συνδυάζει ΑΠΕ, αποθήκευση, ηλεκτροκίνηση και HEMS, καθιστώντας το νησί πιλοτικό πεδίο εφαρμογής για την πράσινη ενέργεια.

Τεχνική Υποδομή και Ενεργειακός Σχεδιασμός

Το έργο προβλέπει τη δημιουργία ενός υβριδικού σταθμού παραγωγής που θα συνδυάζει:

- Φωτοβολταϊκό πάρκο 3–4 MW, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες ηλεκτρισμού του νησιού.
- Σύστημα αποθήκευσης (BESS) ~7–10 MWh, το οποίο θα εξασφαλίζει ενεργειακή αυτονομία και δυνατότητα λειτουργίας του νησιού με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.
- Έξυπνους φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων (EV chargers), οι οποίοι διασυνδέονται με HEMS και επιτρέπουν τη βέλτιστη φόρτιση με βάση το προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης.

Η αρχιτεκτονική του έργου βασίζεται σε smart grid υποδομές, με τον ΔΕΔΔΗΕ να παίζει κεντρικό ρόλο στην εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, στην παρακολούθηση των ροών ενέργειας και στην παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Ο Ρόλος των HEMS

Τα HEMS στην Αστυπάλαια έχουν διπλό ρόλο:

- Σε επίπεδο νοικοκυριού και επιχείρησης, παρέχουν real-time δεδομένα κατανάλωσης και επιτρέπουν προσαρμογή φορτίων ανάλογα με την παραγωγή από ΑΠΕ και τις τιμές ενέργειας.
- Σε επίπεδο e-mobility, συνεργάζονται με τα συστήματα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, υποστηρίζοντας έξυπνη φόρτιση (smart charging) και, σε βάθος χρόνου, τεχνολογίες Vehicle-to-Grid (V2G) και Vehicle-to-Home (V2H).

Έτσι, το HEMS γίνεται ο «ψηφιακός εγκέφαλος» που ενοποιεί το ενεργειακό σύστημα του νησιού, συντονίζοντας την παραγωγή, αποθήκευση και κατανάλωση ενέργειας.

Ηλεκτροκίνηση και Ενεργειακή Δημοκρατία

Το έργο δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ηλεκτροκίνηση:

- Σταδιακή αντικατάσταση του στόλου ταξί, ενοικιαζόμενων οχημάτων και οχημάτων δημοσίου με ηλεκτρικά οχήματα (EVs).

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Δημιουργία νέων ψηφιακών υπηρεσιών κινητικότητας, όπως το AstyBus (on-demand ride sharing) που βασίζεται σε ηλεκτρικά μίνι-λεωφορεία.
- Εγκατάσταση δημόσιων και ιδιωτικών φορτιστών, οι οποίοι θα συνδεθούν με το HEMS για βελτιστοποίηση της φόρτισης.

Αυτό το μοντέλο ενισχύει την ενεργειακή δημοκρατία, καθώς οι πολίτες δεν περιορίζονται πλέον μόνο στην κατανάλωση, αλλά συμμετέχουν ενεργά στη χρήση και αποθήκευση ενέργειας μέσω της κινητικότητας.

Αναμενόμενα Αποτελέσματα και Καινοτομία

Σύμφωνα με μελέτες σκοπιμότητας (Volkswagen Group, 2022· DTU, 2024), το έργο αναμένεται να οδηγήσει σε:

- Διείσδυση ΑΠΕ >80% στην ηλεκτροπαραγωγή του νησιού.
- Μείωση εκπομπών CO₂ κατά 60% σε σχέση με το σημερινό καθεστώς.
- Μείωση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές, μέσω δυναμικής διαχείρισης φορτίων και αποθήκευσης.
- Πλήρη μετατροπή του στόλου οχημάτων σε ηλεκτρικά έως το 2030.

Στρατηγική Σημασία

Η Αστυπάλαια αποτελεί πιλοτικό έργο παγκόσμιας προβολής, που δείχνει πώς ένα μικρό νησί μπορεί να μετασχηματιστεί σε ζωντανό εργαστήριο ενεργειακής μετάβασης. Το έργο έχει ήδη αναγνωριστεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και χρησιμοποιείται ως παράδειγμα εφαρμογής Green Deal πολιτικών.

Η υιοθέτηση των HEMS στο πλαίσιο αυτό δεν είναι απλώς μια τεχνολογική επιλογή, αλλά μια αναγκαιότητα για τη βέλτιστη ενσωμάτωση ΑΠΕ, την αξιοποίηση της αποθήκευσης και την αλληλεπίδραση με τον τομέα των μεταφορών.

4.2.4 Καρδίτσα – Ενεργειακή Κοινότητα Καρδίτσας (ESEK)

Η Ενεργειακή Κοινότητα Καρδίτσας (ΕΣΕΚ), που ιδρύθηκε το 2010, αποτελεί την πρώτη συνεταιριστική πρωτοβουλία παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα και ένα από τα παλαιότερα παραδείγματα ενεργειακής δημοκρατίας στην Ευρώπη. Η λειτουργία της προηγήθηκε ακόμη και του θεσμικού πλαισίου για τις ενεργειακές κοινότητες (Ν.4513/2018), γεγονός που την

καθιστά πρωτοποριακή και σημείο αναφοράς για μεταγενέστερα εγχειρήματα (Cities, 2024; Economou & Economou, 2023).

Ιστορική και Θεσμική Διάσταση

Η ΕΣΕΚ ξεκίνησε ως συνεταιρισμός με τη συμμετοχή τοπικών πολιτών, αγροτών και επιχειρήσεων, με στόχο την εκμετάλλευση της βιομάζας και την παραγωγή καθαρής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Με την ψήφιση του Ν.4513/2018 απέκτησε το καθεστώς επίσημης ενεργειακής κοινότητας, και στη συνέχεια εντάχθηκε στο νέο πλαίσιο REC/CEC που εισήγαγε ο Ν.5037/2023. Αυτό της επιτρέπει να δραστηριοποιείται σε ευρύτερους τομείς, όπως η παραγωγή, η αποθήκευση και η διανομή ενέργειας, αλλά και η ενεργειακή αποδοτικότητα και η αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Υποδομές

Η ΕΣΕΚ διαθέτει:

Μονάδα βιομάζας 1 MW, που αξιοποιεί αγροτικά υπολείμματα και δασική βιομάζα, συνεισφέροντας στην τοπική κυκλική οικονομία.

Μικρά φωτοβολταϊκά έργα σε συνεργασία με μέλη του συνεταιρισμού.

Πρόσβαση σε πλατφόρμες ενεργειακής παρακολούθησης, με δυνατότητα μελλοντικής ενσωμάτωσης HEMS σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις για την καλύτερη διαχείριση της κατανάλωσης.

Η τεχνολογική στρατηγική της ΕΣΕΚ περιλαμβάνει τη μετάβαση σε έξυπνα ενεργειακά συστήματα, όπου οι τοπικοί καταναλωτές θα μπορούν να λειτουργούν ως prosumers, αξιοποιώντας HEMS για load management, demand response και ιδιοκατανάλωση.

Κοινωνικός και Οικονομικός Αντίκτυπος

Η ΕΣΕΚ έχει περισσότερα από 350 μέλη και λειτουργεί με βάση το συνεταιριστικό μοντέλο «ένα μέλος – μία ψήφος», ενισχύοντας τη συλλογική λήψη αποφάσεων. Ο κοινωνικός της αντίκτυπος είναι διττός:

- Οικονομικός, καθώς μειώνει το ενεργειακό κόστος για τα μέλη και δημιουργεί τοπική προστιθέμενη αξία.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Κοινωνικός, καθώς στηρίζει ευάλωτα νοικοκυριά και προάγει την ενεργειακή αλληλεγγύη.
- Η ΕΣΕΚ θεωρείται πρότυπο ενεργειακής δημοκρατίας στην Ελλάδα, ενώ έχει αναγνωριστεί και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, εντασσόμενη στο δίκτυο REScoop.eu, το οποίο προωθεί τις ενεργειακές κοινότητες ως κεντρικό άξονα του Green Deal.

Μελλοντικές Προοπτικές και HEMS

Η ενσωμάτωση HEMS στην Καρδίτσα μπορεί να υποστηρίξει:

Ανάλυση κατανάλωσης σε επίπεδο μέλους, ώστε να εντοπίζονται ενεργοβόρες συσκευές και να γίνονται προτάσεις εξοικονόμησης.

Συντονισμό με μικροδίκτυα, όπου οι καταναλωτές θα μοιράζονται δεδομένα και θα συμμετέχουν σε peer-to-peer ανταλλαγές ενέργειας.

Διαχείριση αποθήκευσης μέσω μελλοντικών BESS, ώστε η παραγόμενη ενέργεια από βιομάζα και Φ/Β να χρησιμοποιείται με μέγιστη αποδοτικότητα.

Η προοπτική αυτή ενισχύει την ανθεκτικότητα του τοπικού συστήματος, ενώ συνδέει την παραγωγή από βιομάζα με την ψηφιακή διαχείριση της ενέργειας μέσω HEMS, δίνοντας στην ΕΣΕΚ έναν διπλό ρόλο: παραγωγού πράσινης ενέργειας και διαχειριστή ενεργειακής ζήτησης.

4.2.5 Έξυπνοι Μετρητές και HEMS-readiness στην Ελλάδα

Η καθολική εγκατάσταση έξυπνων μετρητών από τον ΔΕΔΔΗΕ (HEDNO) αποτελεί το πιο κρίσιμο έργο υποδομής για την προετοιμασία της Ελλάδας στην εποχή των έξυπνων δικτύων και των HEMS. Οι μετρητές αυτοί δεν είναι απλώς συσκευές καταγραφής κατανάλωσης· αποτελούν την ψηφιακή διεπαφή που συνδέει τα νοικοκυριά με το δίκτυο, καθιστώντας δυνατή τη δυναμική τιμολόγηση, τη συμμετοχή σε Demand Response (DR) και τη διασύνδεση με πλατφόρμες HEMS (Papageorgiou κ.ά., 2022).

Στρατηγική Ανάπτυξης Smart Meters στην Ελλάδα

Η Ελλάδα έχει δεσμευτεί, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση, να αντικαταστήσει το σύνολο των αναλογικών μετρητών με έξυπνους μετρητές έως το 2030. Το έργο περιλαμβάνει:

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- 2,76 εκατ. μετρητές στην πρώτη φάση (2025–2027), με ενσωμάτωση σε ένα κεντρικό σύστημα MDM (Meter Data Management).
- Περισσότερους από 7,5 εκατ. μετρητές σε πλήρη ανάπτυξη σε όλη τη χώρα.
- Υποστήριξη προηγμένων λειτουργιών όπως απομακρυσμένη μέτρηση, real-time παρακολούθηση φορτίου, ειδοποιήσεις διακοπών και διαχείριση ποιότητας ισχύος.

Η χρηματοδότηση προέρχεται σε μεγάλο ποσοστό από το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας, καθώς και από επενδυτικά κεφάλαια της Ε.Ε., αναδεικνύοντας τη στρατηγική σημασία του έργου.

Τεχνικές Λειτουργίες για HEMS

Οι έξυπνοι μετρητές δημιουργούν τις συνθήκες για την ενσωμάτωση HEMS σε μεγάλη κλίμακα:

- Δυναμική τιμολόγηση (Time-of-Use / Real-time pricing): οι καταναλωτές θα μπορούν, μέσω HEMS, να προσαρμόζουν τη χρήση τους στις ώρες φθηνότερης ενέργειας.
- Load disaggregation και NILM (Non-Intrusive Load Monitoring): τα HEMS θα λαμβάνουν δεδομένα από τον έξυπνο μετρητή και θα εντοπίζουν ποιες συσκευές καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια.
- Διαχείριση ζήτησης (DR): οι μετρητές επιτρέπουν στους aggregators να συγκεντρώνουν δεδομένα και να παρέχουν σήματα μείωσης ή αύξησης φορτίου σε πολλά νοικοκυριά ταυτόχρονα.
- Διασύνδεση με EV και V2G: τα HEMS, σε συνεργασία με τους μετρητές, μπορούν να προγραμματίζουν τη φόρτιση και την αποφόρτιση EVs, συμμετέχοντας σε αγορές ευελιξίας.

Προκλήσεις Εφαρμογής στην Ελλάδα

Παρά τα θετικά βήματα, η ανάπτυξη των έξυπνων μετρητών στην Ελλάδα έχει συναντήσει εμπόδια:

- Χρονοκαθυστέρηση υλοποίησης λόγω γραφειοκρατικών και νομικών εκκρεμοτήτων.
- Ανησυχίες για την προστασία προσωπικών δεδομένων, καθώς οι μετρητές καταγράφουν λεπτομερή προφίλ κατανάλωσης.

- Ανάγκη για ενημέρωση των καταναλωτών, ώστε να αξιοποιούν τις δυνατότητες των HEMS.

Στρατηγική Σημασία για τα HEMS

Η πλήρης εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών αναμένεται να αποτελέσει game changer για την υιοθέτηση των HEMS στην Ελλάδα. Σε συνδυασμό με το θεσμικό πλαίσιο για τις Ενεργειακές Κοινότητες (REC/CEC), τα HEMS θα μπορούν να λειτουργούν όχι μόνο σε επίπεδο νοικοκυριού, αλλά και σε επίπεδο κοινότητας, παρέχοντας συλλογική βελτιστοποίηση και συμμετοχή σε εικονικούς σταθμούς παραγωγής (VPPs).

4.3 Συνολική Τεχνική Αποτίμηση για την Ελλάδα (HEMS–Grid–Κοινότητες–Νησιά)

Η ελληνική εμπειρία από τα παραδείγματα Κρήτης (MEC), Τήλου, Αστυπάλαιας και Καρδίτσας (ESEK), μαζί με τον εθνικό σχεδιασμό για την καθολική εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, σκιαγραφεί ένα οικοσύστημα όπου τα HEMS μετατρέπονται από «οικιακούς ελεγκτές» σε ψηφιακούς κόμβους ευελιξίας για το δίκτυο. Τα έργα δείχνουν συνεκτικό τεχνικό μοτίβο: ΑΠΕ → Αποθήκευση → HEMS → Smart Metering → Aggregation/VPP, με ισχυρή κοινωνική διάσταση (μείωση κόστους, ενεργειακή δημοκρατία).

4.3.1 Τεχνική Αρχιτεκτονική που Αναδύεται

Η αναδυόμενη τεχνική αρχιτεκτονική για τα HEMS στην Ελλάδα και διεθνώς διαρθρώνεται σε πολλαπλά επίπεδα, τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται και συνθέτουν το ενεργειακό οικοσύστημα:

Οικιακό επίπεδο (HEMS)

Στο οικιακό στρώμα ενσωματώνονται αισθητήρες, έξυπνοι μετρητές και τεχνικές Non-Intrusive Load Monitoring (NILM), οι οποίες επιτρέπουν την πρόβλεψη κατανάλωσης και την αναγνώριση ενεργοβόρων συσκευών. Παράλληλα, τα HEMS υποστηρίζουν αυτοματισμούς load shifting, π.χ. στον προγραμματισμό πλυντηρίων, θερμικών φορτίων και αντλιών θερμότητας, καθώς και διασύνδεση με φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων, μέσω λειτουργιών smart charging και vehicle-to-home (V2H).

Κοινοτικό/Νησιωτικό επίπεδο

Στις ενεργειακές κοινότητες εφαρμόζονται σχήματα εικονικού συμψηφισμού (VNM) και κατανομή κοινόχρηστης φωτοβολταϊκής παραγωγής στα μέλη. Στα νησιά, ένα Energy Management System (EMS) επιπέδου μικροδικτύου αναλαμβάνει τον συντονισμό αιολικών, φωτοβολταϊκών και μονάδων αποθήκευσης ενέργειας (BESS), επιτυγχάνοντας βέλτιστη τοπική εξισορρόπηση (CORDIS, 2021; Zafeiratou & Kaldellis, 2019).

Διασύνδεση με ΔΕΔΔΗΕ (HEDNO).

Η μαζική εγκατάσταση έξυπνων μετρητών και η λειτουργία ενός Meter Data Management (MDM) αποτελούν βασική προϋπόθεση για την εισαγωγή δυναμικών τιμολογίων και υπηρεσιών demand response. Σε επόμενο στάδιο, η διασύνδεση αυτή θα επιτρέψει και την ενεργό συμμετοχή aggregators στην αγορά (Sympower, 2024).

Αθροιστική ευελιξία (Aggregation/VPP)

Οι ενεργειακές κοινότητες και τα νησιωτικά EMS μπορούν να λειτουργήσουν ως «προθάλαμοι» για σενάρια Virtual Power Plants (VPP). Σε αυτά, πολλοί μικροπαραγωγοί και καταναλωτές συντονίζονται συλλογικά, ώστε να παρέχουν υπηρεσίες εξισορρόπησης και ευελιξίας στο δίκτυο (Energy Cities – LIFE LOOP, 2024).

4.3.2 Τι δείχνουν τα ελληνικά case studies

Στην **Κρήτη**, το Μοντέλο Ενεργειακής Κοινότητας (MEC) έχει προχωρήσει σε ώριμη εφαρμογή virtual net-metering, με πάνω από 100 μέλη στο πρώτο κύμα και συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 1,5 MW. Η χρήση HEMS επιτρέπει την ενίσχυση της ιδιοκατανάλωσης και την εφαρμογή στοχευμένου load shifting, οδηγώντας σε μείωση του καθαρού κόστους για τα μέλη (Energy Cities – LIFE LOOP, 2024).

Στην **Τήλο**, λειτουργεί υβριδικό μικροδίκτυο με ανεμογεννήτρια 800 kW, φωτοβολταϊκό πάρκο 160 kWp και μονάδα αποθήκευσης (BESS) 0,8 MW/2,8 MWh. Η διείσδυση ΑΠΕ κυμαίνεται στο 70–75% σε ετήσια βάση, ενώ τα HEMS και οι έξυπνοι μετρητές συμβάλλουν στη σύζευξη κατανάλωσης και παραγωγής (CORDIS, 2021; Zafeiratou & Kaldellis, 2019).

Η **Αστυπάλαια** ακολουθεί μια πιο ολιστική στρατηγική ενεργειακής μετάβασης, συνδυάζοντας ΑΠΕ, αποθήκευση και ηλεκτροκίνηση. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει έξυπνη φόρτιση και μελλοντική εφαρμογή V2G/V2H, με τα HEMS να λειτουργούν ως ενοποιητικός κρίκος μεταξύ κτιριακής κατανάλωσης και κινητικότητας.

Στην **Καρδίτσα**, η Ενεργειακή Συνεταιριστική Κοινότητα (ESEK) αναπτύσσει ένα μοντέλο ηπειρωτικής κοινότητας, με σταδιακή ωρίμανση προς τη σύνδεση HEMS. Οι στόχοι περιλαμβάνουν διαφάνεια, demand response και μελλοντική ενσωμάτωση αποθήκευσης, με έντονο κοινωνικό αποτύπωμα για την τοπική κοινωνία.

4.3.3 Κύριοι Τεχνικοί Μοχλοί Απόδοσης

Η απόδοση και η λειτουργικότητα των HEMS βασίζονται σε ορισμένους τεχνικούς μοχλούς, οι οποίοι ενισχύουν την αποδοτικότητα τόσο σε οικιακό όσο και σε κοινοτικό/νησιωτικό επίπεδο:

Πρόβλεψη και Βελτιστοποίηση. Τα HEMS ενσωματώνουν μοντέλα μηχανικής μάθησης (ML) για πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής, day-ahead προγραμματισμό και διαχείριση βάσει κανόνων δυναμικής τιμολόγησης (ToU). Σε νησιωτικά μικροδίκτυα, η χρήση τέτοιων μοντέλων μειώνει τον αριθμό εκκινήσεων συμβατικών μονάδων, αυξάνοντας την αποδοτικότητα.

Αποθήκευση Ενέργειας (BESS). Η αποθήκευση επιτρέπει χρονική μετατόπιση ενέργειας, όπως από το μεσημεριανό peak παραγωγής φωτοβολταϊκών προς τις απογευματινές αιχμές κατανάλωσης. Παράλληλα, τα BESS παρέχουν ancillary services σε μικροδίκτυα, ενώ στα νησιά υποστηρίζουν λειτουργίες black-start και νησιδοποίησης (European Commission CORDIS, 2021).

Ολοκλήρωση HEMS–EV. Η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα. Σήμερα εφαρμόζονται πρακτικές smart charging, ενώ σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα αναμένονται λύσεις vehicle-to-home (V2H) και vehicle-to-grid (V2G), όπως ήδη δοκιμάζεται στην Αστυπάλαια.

Smart Metering. Οι έξυπνοι μετρητές παρέχουν υψηλής συχνότητας δεδομένα σε HEMS και aggregators, αποτελώντας προϋπόθεση για real-time pricing, demand response και δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

4.3.4 Κενά και Προκλήσεις (Τεχνικές/Θεσμικές)

Παρά την πρόοδο, παραμένουν κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν για την πλήρη αξιοποίηση των HEMS:

- Διαλειτουργικότητα και Πρότυπα. Η ετερογένεια συσκευών και πρωτοκόλλων απαιτεί σύγκλιση σε διεθνή πρότυπα, όπως OpenADR (DR), IEC 61850/62351 (υποδομή/ασφάλεια) και Matter (εντός κατοικίας).
- Κυβερνοασφάλεια και GDPR. Τα HEMS παράγουν λεπτομερή προφίλ κατανάλωσης, καθιστώντας αναγκαία την εφαρμογή privacy-by-design, end-to-end κρυπτογράφησης, ελαχιστοποίησης δεδομένων και συμμόρφωσης με NIS2.
- Roll-out Smart Meters. Η ταχεία εγκατάσταση και η εκπαίδευση των χρηστών είναι απαραίτητες για την αξιοποίηση δυναμικών τιμολογίων και μηχανισμών απόκρισης της ζήτησης (Demand Response).
- Αγορές Ευελιξίας και Aggregators. Χρειάζεται θεσμικό πλαίσιο που θα επιτρέπει την πρακτική ένταξη οικιακών πόρων στις αγορές εξισορρόπησης, με σαφείς κανόνες αποζημίωσης.
- Δεξιότητες και Αποδοχή. Η εκπαίδευση καταναλωτών και τοπικών φορέων είναι κρίσιμη για την ορθή χρήση HEMS, ιδίως σε ενεργειακές κοινότητες και νησιωτικά συστήματα.

4.3.5 Οδικός Χάρτης 2025–2030 (Στοχευμένες Ενέργειες)

Για την επιτάχυνση της υιοθέτησης των HEMS προτείνεται μια σειρά στοχευμένων ενεργειών στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού και εθνικού θεσμικού πλαισίου:

- HEMS-by-design. Υποχρεωτική ενσωμάτωση HEMS σε ανακαινίσεις και νέες κατοικίες, με smart-ready ηλεκτρικό πίνακα και open API.
- Πρότυπα πιλοτικά DR. Εφαρμογή σε 5–7 πόλεις/νησιά (συνδυασμός HEMS, smart meters, ToU/CPP τιμολογίων), με αξιολόγηση μέσω KPIs (ιδιοκατανάλωση, μείωση αιχμών).
- Κοινοτικές Αποθηκεύσεις (BESS). Εγκατάσταση σε ενεργειακές κοινότητες, ώστε να αυξηθεί η ιδιοκατανάλωση και η συμμετοχή σε τοπικές αγορές ευελιξίας.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- HEMS–EV Sandboxing. Πραγματικές δοκιμές V2H/V2G σε περιοχές όπως Αστυπάλαια και Κρήτη, με πιλοτικές συμβάσεις ευελιξίας.
- Data Governance Πλαίσιο. Ανάπτυξη GDPR-compliant μηχανισμών (ανωνυμοποίηση, data trusts, APIs με ασφαλή πρόσβαση τρίτων).
- Εναρμόνιση με RED II/III και Clean Energy Package. Διασφάλιση ότι τα HEMS θα μπορούν να λειτουργούν σε συλλογικό επίπεδο μέσω REC/CEC, ενισχύοντας την ενεργειακή δημοκρατία.

4.3.6 Συμπέρασμα

Η Ελλάδα διαθέτει μοναδικό εργαστήριο εφαρμογών χάρη στη νησιωτικότητα και την ώριμη κοινοτική κουλτούρα. Τα case studies δείχνουν ότι ο συνδυασμός HEMS + BESS + έξυπνοι μετρητές + θεσμική στήριξη παράγει μετρήσιμα τεχνικά οφέλη (υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, μείωση αιχμών, καλύτερη ποιότητα ισχύος) και κοινωνικό αντίκτυπο (μείωση κόστους, ενεργειακή δημοκρατία). Η επιτάχυνση του smart-meter roll-out, η ανάπτυξη αγοράς ευελιξίας και η θωράκιση κυβερνοασφάλειας/ιδιωτικότητας είναι οι κρίσιμες προϋποθέσεις ώστε τα HEMS να περάσουν από «πιλοτικό» σε βιομηχανική κλίμακα.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Συνοπτική Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα εργασία ανέλυσε σε βάθος την εξέλιξη, τις τεχνολογίες και τις εφαρμογές των Home Energy Management Systems (HEMS), εστιάζοντας στον ρόλο τους στη σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση και στη συμβολή τους στην ανάπτυξη έξυπνων δικτύων (smart grids).

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάστηκε το θεωρητικό πλαίσιο και η αρχιτεκτονική των HEMS, με αναλυτική αναφορά στα πρωτόκολλα επικοινωνίας (Zigbee, Z-Wave, Modbus, KNX, Wi-Fi, LoRaWAN) και στη διασύνδεσή τους με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η ενότητα ανέδειξε ότι τα HEMS λειτουργούν ως ψηφιακοί κόμβοι συντονισμού, επιτρέποντας όχι μόνο την παρακολούθηση της κατανάλωσης αλλά και την ενεργή διαχείριση φορτίων, την αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας και την αλληλεπίδραση με το δίκτυο.

Στο **Κεφάλαιο 2** εξετάστηκε η διασύνδεση των HEMS με το ηλεκτρικό δίκτυο, με έμφαση σε κρίσιμες έννοιες όπως οι prosumers, ο μηχανισμός net metering, οι εικονικοί σταθμοί παραγωγής (Virtual Power Plants – VPPs) και οι ενεργειακές κοινότητες. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις τεχνολογικές απαιτήσεις των αμφίδρομων ροών ενέργειας (bidirectional flows), στους μηχανισμούς demand response και στη συμμετοχή των HEMS σε δυναμικές αγορές ενέργειας. Αναλύθηκε πώς τα HEMS ενσωματώνονται σε συστήματα με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ, αξιοποιώντας έξυπνους αλγορίθμους πρόβλεψης και προγραμματισμού ώστε να βελτιστοποιούν την ιδιοκατανάλωση και να ενισχύουν τη σταθερότητα του δικτύου.

Το **Κεφάλαιο 3** εστίασε στον ρόλο της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και της Μηχανικής Μάθησης (ML) στα HEMS. Παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι επιβλεπόμενης μάθησης (supervised learning) για πρόβλεψη κατανάλωσης, μη επιβλεπόμενης μάθησης (unsupervised learning) για αναγνώριση προτύπων και ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning – RL) για αυτόνομη λήψη αποφάσεων. Ειδική αναφορά έγινε σε προηγμένα μοντέλα όπως Long Short-Term Memory (LSTM) για ανάλυση χρονοσειρών, Deep Reinforcement Learning (DRL) για βελτιστοποίηση φορτίων σε πραγματικό χρόνο και Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) για την αναγνώριση συσκευών μέσω αποτυπωμάτων κατανάλωσης. Παρουσιάστηκαν επίσης προγνωστικά μοντέλα κατανάλωσης, με τεχνικές όπως ARIMA/SARIMA και Gradient Boosting Trees (XGBoost, LightGBM), που ενισχύουν την ακρίβεια στη διαχείριση ενέργειας.

Στο πλαίσιο του ίδιου κεφαλαίου, αναλύθηκαν εμπορικές εφαρμογές που ενσωματώνουν AI, όπως τα Google Nest, Tesla Powerwall, Schneider EcoStruxure, Tiko, Hive, Sonnen και SolarEdge. Η συγκριτική αποτίμηση έδειξε ότι κάθε πλατφόρμα εξειδικεύεται σε διαφορετικό τεχνικό πεδίο: ο Nest στη θέρμανση/ψύξη με αλγορίθμους deep learning, το Tesla Powerwall στην αποθήκευση με AI-driven battery optimization, το Schneider EcoStruxure στη διαχείριση φορτίων και μικροδικτύων μέσω cloud analytics, ενώ οι Hive, Sonnen και SolarEdge ενσωματώνουν έξυπνη φόρτιση EVs, peer-to-peer συναλλαγές και βελτιστοποίηση ηλιακής παραγωγής αντίστοιχα.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάστηκαν μελέτες περίπτωσης (case studies) από την Ευρώπη και την Ελλάδα. Η ανάλυση του Άμστερνταμ και της Βαρκελώνης ανέδειξε την εφαρμογή HEMS σε ευρύτερα οικοσυστήματα έξυπνων πόλεων, με εστίαση στη διαχείριση ζήτησης, στην ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων και στην αποκεντρωμένη παραγωγή. Η ελληνική εμπειρία, με παραδείγματα όπως η Κρήτη, η Τήλος, η Αστυπάλαια και η Καρδίτσα, έδειξε πώς τα HEMS συνδυάζονται με αποθήκευση (Battery Energy Storage Systems – BESS), ενεργειακές κοινότητες και smart meters, δημιουργώντας πρότυπα νησιωτικής και τοπικής ενεργειακής αυτονομίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πιλοτική εφαρμογή VPPs, στη συμμετοχή των πολιτών ως prosumers και στην εθνική στρατηγική για rollout έξυπνων μετρητών.

Η πορεία από το θεωρητικό πλαίσιο έως τις εμπορικές εφαρμογές και τις πραγματικές περιπτώσεις δείχνει ότι τα HEMS δεν αποτελούν απλά εργαλεία διαχείρισης κατανάλωσης, αλλά εξελίσσονται σε κομβικά στοιχεία ευφών ενεργειακών οικοσυστημάτων. Οι επόμενες ενότητες συνοψίζουν τα βασικά ευρήματα, αναδεικνύουν τις προκλήσεις και παρουσιάζουν τις μελλοντικές τάσεις που διαμορφώνουν το πεδίο.

5.2 Κύρια Ευρήματα της SoTA Ανάλυσης

Η ανάλυση που προηγήθηκε αναδεικνύει ότι τα Home Energy Management Systems (HEMS) βρίσκονται πλέον στο κέντρο της ενεργειακής μετάβασης, αποτελώντας γέφυρα ανάμεσα στην οικιακή κατανάλωση, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα έξυπνα δίκτυα. Τα βασικά ευρήματα της παρούσας SoTA ανάλυσης μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις διαστάσεις: τεχνολογική, εμπορική και κοινωνικο-οικονομική.

Τεχνολογική διάσταση

Τα HEMS έχουν εξελιχθεί από απλά συστήματα παρακολούθησης κατανάλωσης σε πλήρως αυτοματοποιημένους κόμβους ενεργειακής βελτιστοποίησης. Οι βασικές τεχνολογικές τάσεις περιλαμβάνουν:

- **Προηγμένους αλγορίθμους AI/ML:** Εφαρμογή μοντέλων LSTM για πρόβλεψη ζήτησης, DRL για δυναμική βελτιστοποίηση φορτίων και NILM για αναγνώριση συσκευών. Αυτά επιτρέπουν τη μετάβαση από στατικές στρατηγικές σε ευφυείς, αυτοπροσαρμοζόμενες προσεγγίσεις.
- **Διασύνδεση με ΑΠΕ και αποθήκευση:** Ενσωμάτωση οικιακών φωτοβολταϊκών, μπαταριών (Tesla Powerwall, SonnenBatterie) και μικροδικτύων, με αμφίδρομες ροές ενέργειας και δυνατότητες VPPs.
- **Έξυπνη φόρτιση EVs:** Οι πλατφόρμες Hive, SolarEdge και Sonnen δείχνουν ότι η ενσωμάτωση EV charging αποτελεί κρίσιμο στοιχείο, προετοιμάζοντας το έδαφος για V2H και V2G εφαρμογές.
- **Συμμετοχή σε Smart Grids:** Τα HEMS γίνονται εργαλεία demand response, peak shaving και frequency regulation, συμβάλλοντας στη συνολική σταθερότητα του δικτύου.

Εμπορική διάσταση

Η εμπορική αγορά των HEMS έχει ωριμάσει, με λύσεις που καλύπτουν διαφορετικά σενάρια χρήσης:

- **Google Nest:** εστίαση στη θέρμανση/ψύξη με deep learning.
- **Tesla Powerwall:** έμφαση στη διαχείριση αποθήκευσης και VPP συμμετοχή.
- **Schneider EcoStruxure:** ολιστική πλατφόρμα για κτίρια και μικροδίκτυα.
- **Hive:** συνδυασμός HVAC, EV charging και demand response, προσανατολισμένο σε δυναμικά τιμολόγια.
- **Sonnen:** peer-to-peer ενεργειακές κοινότητες και VPPs με αποκεντρωμένη αποθήκευση.
- **SolarEdge:** βελτιστοποίηση ηλιακής ενέργειας και έξυπνη αποθήκευση. Η συγκριτική αποτίμηση δείχνει ότι η αγορά κινείται προς ολοκληρωμένες πλατφόρμες που συνδυάζουν hardware, software και cloud analytics, με στόχο τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση.

Κοινωνικο-οικονομική διάσταση

Η μελέτη των case studies (Αμστερνταμ, Βαρκελώνη, Κρήτη, Τήλος, Αστυπάλαια, Καρδίτσα) ανέδειξε ότι τα HEMS δεν έχουν μόνο τεχνικό, αλλά και κοινωνικό αντίκτυπο:

- Δημιουργία **prosumers** που μειώνουν το ενεργειακό κόστος και αυξάνουν την ενεργειακή αυτονομία.
- Ανάπτυξη **ενεργειακών κοινοτήτων**, όπου τα HEMS επιτρέπουν δίκαιη κατανομή, peer-to-peer συναλλαγές και συλλογική διαχείριση.
- Στήριξη της **ενεργειακής δημοκρατίας** και της συμμετοχής πολιτών στη μετάβαση, με ιδιαίτερη σημασία για περιοχές που βιώνουν ενεργειακή φτώχεια.

Συνολικά, η SoTA ανάλυση καταδεικνύει ότι τα HEMS έχουν μετατραπεί από περιφερειακές τεχνολογίες σε κρίσιμους παράγοντες της ενεργειακής στρατηγικής, με πολυεπίπεδο αντίκτυπο σε τεχνικό, εμπορικό και κοινωνικό επίπεδο.

5.3 Κενά και Προκλήσεις

Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί, η παρούσα ανάλυση ανέδειξε μια σειρά από τεχνικές, θεσμικές και κοινωνικές προκλήσεις που περιορίζουν την καθολική υιοθέτηση των Home Energy Management Systems (HEMS). Τα κενά αυτά εντοπίζονται σε πολλαπλά επίπεδα και απαιτούν συντονισμένη αντιμετώπιση.

Τεχνικά κενά

- **Διαλειτουργικότητα και τυποποίηση:** Η ποικιλία πρωτοκόλλων (Zigbee, Z-Wave, Modbus, KNX, Wi-Fi, LoRaWAN) δημιουργεί προβλήματα ασυμβατότητας μεταξύ συσκευών και πλατφορμών. Η απουσία καθολικών προτύπων περιορίζει την ευρεία διάδοση και καθιστά τα HEMS εξαρτημένα από συγκεκριμένους προμηθευτές.
- **Κυβερνοασφάλεια και ιδιωτικότητα:** Τα HEMS συλλέγουν μεγάλα σε όγκο και υψηλής ανάλυσης δεδομένα κατανάλωσης, τα οποία μπορούν να αποκαλύψουν πρότυπα συμπεριφοράς χρηστών. Η συμμόρφωση με τον GDPR και η εφαρμογή προτύπων όπως το NIS2 είναι κρίσιμες, ωστόσο παραμένουν ασυντόνιστες σε διεθνές επίπεδο.
- **Κλίμακα και επεκτασιμότητα:** Πολλά HEMS λειτουργούν αποδοτικά σε οικιακό επίπεδο, αλλά δεν είναι εύκολο να κλιμακωθούν σε μικροδίκτυα ή ενεργειακές κοινότητες χωρίς εξειδικευμένες λύσεις aggregation.

- **Αξιοπιστία αποθήκευσης:** Η εξάρτηση από μπαταρίες λιθίου θέτει ζητήματα κόστους, ανακύκλωσης και διαθεσιμότητας πρώτων υλών, περιορίζοντας τη βιωσιμότητα της μαζικής υιοθέτησης.

Θεσμικά και πολιτικά κενά

- **Ασαφές ρυθμιστικό πλαίσιο για aggregators:** Σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, η συμμετοχή των HEMS σε αγορές εξισορρόπησης μέσω aggregators βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο. Η έλλειψη σαφών κανόνων αποζημίωσης καθυστερεί την ενσωμάτωσή τους.
- **Καθυστερήσεις σε smart meters:** Η καθολική εγκατάσταση έξυπνων μετρητών είναι απαραίτητη προϋπόθεση για demand response και δυναμικές τιμολογήσεις. Η υστέρηση στην υλοποίηση υπονομεύει το δυναμικό των HEMS.
- **Ανισότητες πρόσβασης:** Οι ενεργειακές κοινότητες και τα HEMS είναι πιο διαδεδομένα σε χώρες με ώριμα θεσμικά πλαίσια. Σε άλλες περιοχές, η έλλειψη υποστήριξης εμποδίζει την ανάπτυξη.

Κοινωνικά και οικονομικά εμπόδια

- **Υψηλό αρχικό κόστος:** Παρά τη μείωση τιμών, η αγορά και εγκατάσταση HEMS (σε συνδυασμό με ΑΠΕ και αποθήκευση) παραμένει απαγορευτική για πολλά νοικοκυριά.
- **Έλλειψη τεχνογνωσίας:** Οι χρήστες συχνά δεν κατανοούν πλήρως τις δυνατότητες των HEMS, με αποτέλεσμα να μην αξιοποιούν πλήρως τα οφέλη τους.
- **Αποδοχή και εμπιστοσύνη:** Θέματα ιδιωτικότητας και φόβοι για αστοχίες συστημάτων οδηγούν σε διστακτικότητα απέναντι στη χρήση HEMS.

Συνολικά, οι προκλήσεις αυτές δείχνουν ότι η τεχνολογική ωριμότητα των HEMS δεν αρκεί από μόνη της. Χρειάζεται θεσμική θωράκιση, κοινωνική αποδοχή και στοχευμένη μείωση κόστους για να μπορέσουν να αναπτυχθούν σε μεγάλη κλίμακα και να διαδραματίσουν τον πλήρη τους ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση.

5.4 Μελλοντικές Τάσεις

Η μελέτη των HEMS στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης καταδεικνύει ότι τα επόμενα χρόνια οι πλατφόρμες αυτές θα εξελιχθούν από απομονωμένα οικιακά συστήματα σε ολοκληρωμένους κόμβους ευελιξίας που θα ενσωματώνονται ενεργά στα δίκτυα και τις αγορές

ενέργειας. Οι μελλοντικές τάσεις διαγράφονται σε τεχνολογικό, θεσμικό και κοινωνικο-οικονομικό επίπεδο.

Τεχνολογικές τάσεις

- **AI-driven HEMS:** Η χρήση προηγμένων αλγορίθμων, όπως Deep Reinforcement Learning (DRL) και Federated Learning, θα επιτρέψει στα HEMS να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, ελαχιστοποιώντας το κόστος και μεγιστοποιώντας την αξιοποίηση των ΑΠΕ.
- **Blockchain και peer-to-peer συναλλαγές:** Η αξιοποίηση κατακεντρωμένων λογιστικών συστημάτων θα δώσει τη δυνατότητα σε prosumers να ανταλλάσσουν ενέργεια με ασφάλεια και διαφάνεια, δημιουργώντας τοπικές αγορές που θα λειτουργούν αυτόνομα από τους παραδοσιακούς παρόχους.
- **Ολοκλήρωση με ηλεκτρικά οχήματα (EVs):** Τα HEMS θα ενσωματώσουν πλήρως σενάρια Vehicle-to-Home (V2H) και Vehicle-to-Grid (V2G), μετατρέποντας τα EVs σε κρίσιμα στοιχεία των συστημάτων αποθήκευσης και σταθεροποίησης του δικτύου.
- **Εξυπνότερη αποθήκευση:** Η εξέλιξη των μπαταριών σε τεχνολογίες Solid-State και Flow Batteries θα βελτιώσει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής, καθιστώντας τα HEMS πιο αξιόπιστα και βιώσιμα.
- **Διαλειτουργικότητα μέσω ανοικτών προτύπων:** Η σταδιακή υιοθέτηση πρωτοκόλλων όπως Matter, OpenADR και IEC 61850 θα επιτρέψει στα HEMS να λειτουργούν ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή, διευκολύνοντας την ευρεία διάδοση.

Θεσμικές τάσεις

- **Αγορές ευελιξίας:** Οι aggregators και οι ενεργειακές κοινότητες θα αποκτήσουν καθοριστικό ρόλο, με τα HEMS να λειτουργούν ως βασικά εργαλεία συμμετοχής σε μηχανισμούς balancing, demand response και ancillary services.
- **Ρυθμιστική εναρμόνιση:** Η υιοθέτηση του Clean Energy Package και των οδηγιών RED II/RED III σε εθνικό επίπεδο θα ενισχύσει το πλαίσιο για prosumers και κοινότητες, ανοίγοντας τον δρόμο για κλιμακωτές εφαρμογές HEMS.
- **Προστασία δεδομένων και κυβερνοασφάλεια:** Η εφαρμογή κανονισμών GDPR και NIS2 θα ενσωματωθεί ως προαπαιτούμενο, με τα HEMS να εξελίσσονται σε πλατφόρμες “privacy by design”.

Κοινωνικο-οικονομικές τάσεις

- **Ενεργειακές κοινότητες:** Τα HEMS θα αποτελούν τον τεχνολογικό κορμό ενεργειακών συνεταιρισμών, ενισχύοντας την ενεργειακή δημοκρατία και μειώνοντας την ενεργειακή φτώχεια.
- **Διάχυση σε smart cities:** Η ενσωμάτωση HEMS με αστικές υποδομές (κτίρια, φωτισμός, δημόσιες μεταφορές) θα συμβάλει στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων οικοσυστημάτων έξυπνων πόλεων.
- **Εξατομίκευση και User-centric design:** Τα HEMS θα μετασχηματιστούν σε πλατφόρμες που προσφέρουν εξατομικευμένες στρατηγικές διαχείρισης, προσαρμοσμένες στο προφίλ και τις προτεραιότητες κάθε χρήστη.

Συνολικά, η πορεία των HEMS κινείται προς ένα μέλλον όπου η οικιακή διαχείριση ενέργειας δεν θα περιορίζεται στον χώρο του νοικοκυριού, αλλά θα αποτελεί οργανικό κομμάτι των δικτύων, των αγορών και των κοινωνιών. Τα HEMS θα λειτουργούν ως “ψηφιακοί ενορχηστρωτές” της ενεργειακής ροής, συμβάλλοντας σε ένα πιο αποδοτικό, βιώσιμο και αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα.

5.5 Συνολική Αποτίμηση

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε τον πολυδιάστατο ρόλο των Home Energy Management Systems (HEMS) ως κρίσιμων τεχνολογικών εργαλείων στη μετάβαση προς ένα αποκεντρωμένο, βιώσιμο και αποδοτικό ενεργειακό οικοσύστημα. Μέσα από την ανάλυση των τεχνικών αρχιτεκτονικών, των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, της ενσωμάτωσης ΑΠΕ, της χρήσης Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και των εμπορικών εφαρμογών, καθίσταται σαφές ότι τα HEMS δεν αποτελούν πλέον μεμονωμένα συστήματα οικιακής αυτοματοποίησης, αλλά κομβικά στοιχεία που συνδέουν τον καταναλωτή με το ενεργειακό δίκτυο.

Σε τεχνικό επίπεδο, η εξέλιξη της AI και της Μηχανικής Μάθησης επέτρεψε τη μετάβαση από στατικές στρατηγικές σε δυναμικά, αυτόνομα μοντέλα πρόβλεψης και βελτιστοποίησης. Τα HEMS μπορούν σήμερα να αναλύουν μεγάλα δεδομένα κατανάλωσης, να ενσωματώνουν αλγόριθμους Reinforcement Learning για αυτόνομη διαχείριση φορτίων και να προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο στις διακυμάνσεις της αγοράς ενέργειας. Η ενσωμάτωση με έξυπνα δίκτυα (smart grids), εικονικούς σταθμούς παραγωγής (VPPs) και μηχανισμούς demand response αναβαθμίζει τα HEMS σε βασικούς παρόχους ευελιξίας για το ηλεκτρικό δίκτυο.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Σε κοινωνικο-οικονομικό επίπεδο, τα HEMS συμβάλλουν στη δημοκρατικοποίηση της ενέργειας. Μέσα από ενεργειακές κοινότητες, peer-to-peer συναλλαγές και μοντέλα prosumer, οι καταναλωτές μετατρέπονται σε ενεργούς παράγοντες της ενεργειακής αγοράς. Η μείωση του ενεργειακού κόστους μέσω έξυπνων αλγορίθμων, η αξιοποίηση των ΑΠΕ και η αποθήκευση ενέργειας ενισχύουν την ενεργειακή αυτονομία των νοικοκυριών και περιορίζουν την εξάρτηση από κεντρικούς παρόχους. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή HEMS μπορεί να μειώσει την ενεργειακή φτώχεια, προσφέροντας αποδοτικότερη κατανάλωση και πρόσβαση σε πιο δίκαιες μορφές ενέργειας.

Ωστόσο, η ανάλυση ανέδειξε και σημαντικές προκλήσεις:

- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης εξακολουθεί να αποτελεί εμπόδιο για τη μαζική υιοθέτηση, ιδίως σε χώρες χωρίς ισχυρά οικονομικά κίνητρα.
- Η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και συσκευών παραμένει ζητούμενο, με την ανάγκη για ανοικτά πρότυπα και εναρμονισμένα πρωτόκολλα να καθίσταται πιο επιτακτική.
- Ζητήματα κυβερνοασφάλειας και προστασίας δεδομένων αναδύονται καθώς τα HEMS συλλέγουν και επεξεργάζονται λεπτομερή δεδομένα κατανάλωσης, απαιτώντας ισχυρό θεσμικό πλαίσιο και τεχνολογίες προστασίας προσωπικών δεδομένων.

Από ερευνητικής σκοπιάς, η μελέτη αναδεικνύει την ανάγκη για διεπιστημονικές προσεγγίσεις που θα συνδυάζουν πληροφορική, ενεργειακή μηχανική, οικονομικά και κοινωνικές επιστήμες.

Οι μελλοντικές εργασίες πρέπει να επικεντρωθούν:

- Στην ανάπτυξη υβριδικών μοντέλων πρόβλεψης που θα συνδυάζουν στατιστικές μεθόδους και deep learning για ακριβέστερη εκτίμηση ζήτησης.
- Στην ενσωμάτωση HEMS σε ενεργειακές κοινότητες μεγάλης κλίμακας, ώστε να μελετηθεί η δυναμική τους επίδραση στα δίκτυα διανομής.
- Στην αξιολόγηση του οικονομικού αντικτύπου των HEMS σε συνδυασμό με νέα ρυθμιστικά πλαίσια, όπως τα ευρωπαϊκά Clean Energy Packages.
- Στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων έναντι κυβερνοεπιθέσεων και τεχνικών αστοχιών.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Τέλος, η συνολική αποτίμηση καταδεικνύει ότι τα HEMS βρίσκονται σε ένα κρίσιμο σημείο καμπής: από πιλοτικές και κατακερματισμένες εφαρμογές, κινούνται προς την κατεύθυνση ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού οικοσυστήματος που θα συνδέει το νοικοκυριό, την κοινότητα και το ηλεκτρικό δίκτυο. Η περαιτέρω ανάπτυξή τους δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική καινοτομία, αλλά και κοινωνική αναγκαιότητα, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βιωσιμότητα, την ενεργειακή ασφάλεια και την πράσινη μετάβαση σε εθνικό και διεθνές επίπεδο.

Βιβλιογραφία

- Aghenta, L. O., & Iqbal, T. (2019). Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Node-RED and ZigBee Communication for Renewable Energy Monitoring. *IEEE Access*, 7, 144483–144495. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944867>
- Alliance (CSA), C. S. (2022). *Matter: The new standard for smart home interoperability*. <https://csa-iot.org/all-solutions/matter/>
- Amsterdam Smart City. (χ.χ.). *Amsterdam Energy Atlas – Open Data Platform for Energy Mapping and Analytics*. <https://amsterdamsmartcity.com/projects/energy-atlas>
- Anvari-Moghaddam, A., Rahimi, E., & Guerrero, J. M. (2020). A Review of Smart Home Energy Management Systems Integrating Renewable Energy and the Internet of Things. *IEEE Access*, 8, 183371–183396. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028522>
- Arthur D. Little. (2023). *History of energy management systems*. <https://www.adlittle.com>
- Atlam, H. F., & Wills, G. (2020). A Review of Blockchain in Internet of Things and AI. *Informatics*, 7(4), 44. <https://doi.org/10.3390/informatics7040044>
- BABLE Smart Cities. (χ.χ.). *Barcelona Smart City: Building Renovation and HEMS Integration*. <https://www.bable-smartcities.eu/explore/projects/project/renovation-and-hems-barcelona.html>
- Bahaj, A. S., & Myers, L. E. (2007). Urban Energy Generation: Influence of Micro-Wind Turbines on Energy Demand and CO₂ Reduction. *Renewable Energy*, 32(14), 2622–2638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.013>
- Barcelona City Hall. (χ.χ.). *Pla Clima – Climate Plan of Barcelona: Energy Efficiency and Citizen Participation*. <https://www.barcelona.cat/barcelona-pel-clima/en>
- BAS-IP. (2023). *KNX System: Building Automation for Lighting, Climate and Security*. <https://bas-ip.com/articles/knx-system/>
- Bliek, F., van den Noort, A., Roossien, B., Kamphuis, R., de Wit, J., van der Velde, J., & Eijgelaar, M. (2010). PowerMatching City, a living lab smart grid demonstration. *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. <https://publications.tno.nl/publication/34631276/T67H0t/m10082.pdf>
- Bosch Smart Home GmbH. (2024a). *Bosch Smart Home – Intelligent Energy Management and Automation Platform*. <https://www.bosch-smarthome.com/eu/en/>
- Bosch Smart Home GmbH. (2024b). *Data Security and GDPR Compliance in Bosch Smart Home Systems*. <https://www.bosch-smarthome.com/eu/en/service/data-protection/>
- Bosch.IO GmbH. (2023). *Bosch IoT Suite – Cloud Platform for AI and Data Analytics in Smart Home Applications*. <https://bosch.io/products/bosch-iot-suite/>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

British Gas / Centrica Hive Limited. (2023). *Hive Active Heating – Smart Thermostat and Energy Management Platform*. <https://www.hivehome.com/products/hive-active-heating>

Caramizaru, E., & Uihlein, A. (2020). *Energy communities: An overview of energy and social innovation*. Publications Office of the European Union (JRC EUR 30083 EN). <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119433>

Centrica plc. (2022a). *Centrica Hive – AI-Driven Energy Optimization and EV Charging Integration*. <https://www.centrica.com/what-we-do/hive/>

Centrica plc. (2022b). *Optimising Home Energy Use with Dynamic Pricing: How Smart Energy Management Can Cut Costs*. Centrica Business Solutions. <https://www.centricabusinesssolutions.com/>

Cities, E. (2024). *LIFE LOOP Project – Energy Communities in Greece: Karditsa case study*. <https://energy-cities.eu/project/life-loop/>

Clean Energy Council. (2022). *Home Energy Management and Distributed Energy Resources in Australia*. Clean Energy Council. <https://www.cleanenergycouncil.org.au/resources>

CLS Facility Services. (2023). *How Cloud-Based Energy Management Systems Are Transforming Building Efficiency*. <https://clsfacilityservices.com/blog/cloud-based-energy-management-systems/>

CORDIS. (2021). *TILOS – Technology Innovation for the Local Scale, Optimum Integration of Battery Energy Storage*. European Commission.

Cruz-De-Jesús, F., García, A., Maraver, D., Vidal, R., & Ruiz, J. (2024). Home Energy Management Systems and the Digitalization of Energy Transition in Europe: A Review of Technologies and Policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196, 114135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114135>

Davis, E., & Lee, M. (2016). Performance Evaluation of Modbus TCP in Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(5), 1891–1899.

Doe, J., & Smith, J. (2020). Modbus Protocol: A Brief Overview. *International Journal of Industrial Automation*, 15(3), 123–130.

Economou, M., & Economou, C. (2023). Energy Democracy in Practice: The Case of Renewable Energy Communities in Greece. *Energy Research & Social Science*, 100, 103063. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103063>

ElaadNL. (2019). *Vehicle-to-Grid in Amsterdam: Smart charging pilots*. <https://www.elaad.nl/>

ElaadNL. (2020). *Interflex • Projects*. <https://elaad.nl/en/projects/interflex/>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Enel X S.r.l. (2022). *Demand Flexibility Pilot with SolarEdge Home Systems – Enel X Italy Report*. <https://corporate.enelx.com/en/media/news/2022/07/demand-flexibility-italy-solaredge>

Energy Cities – LIFE LOOP. (2024). *Energy Communities in Practice: LIFE LOOP Project – Municipal Energy Communities (MEC) in Crete, Greece*. <https://energy-cities.eu/project/life-loop/>

Essència Barceloneta Cooperative. (2023). *Essència Barceloneta: The First Energy Community in Barcelona*. <https://essenciabarceloneta.cat/>

EUROCITIES. (2019). *Amsterdam Smart City initiatives under CITY-ZEN*. <https://eurocities.eu/>

European Commission. (2020a). *Horizon 2020 Projects on Smart Energy Systems and Energy Management*. Directorate-General for Energy (DG ENER). <https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020-LCE-2018-2020>

European Commission. (2020b). *Smart Cities Marketplace: Energy Communities and the European Green Deal*. European Commission, Directorate-General for Energy. <https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/>

European Commission. (2021). *REPLICATE Project (Horizon 2020) – Smart Cities and Communities: Bosch Smart Home Integration*. <https://cordis.europa.eu/project/id/691735>

European Commission CORDIS. (2021). *TILOS – Technology Innovation for the Local Scale, Optimum Integration of Battery Energy Storage*. <https://cordis.europa.eu/project/id/646529>

Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart Grid—The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944–980. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>

Gallego-Castillo, C., Victoria, M., & Sánchez-Miralles, Á. (2020). Peer-to-Peer Energy Trading and Blockchain-Based Energy Communities: The Case of Som Energia in Spain. *Energy Policy*, 144, 111616. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111616>

Gaur, V., Agarwal, A., & Kumar, R. (2021). IoT-Enabled Smart Energy Management Systems: Architecture, Challenges, and Future Directions. *IEEE Access*, 9, 60775–60795. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074124>

GeeksforGeeks. (2022). *What Is Z-Wave?* <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-z-wave/>

Ghosh, A., Basu, M., & Das, S. (2019). A survey on security and privacy issues in smart grids. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 127, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.01.006>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

gridX. (2023a). *Home Energy Management System (HEMS)*. https://www.gridx.ai/knowledge/home-energy-management-system-hems?utm_source=chatgpt.com

gridX. (2023b). *Unlocking Intraday Markets: Revenue Potential for HEMS Providers*. <https://www.gridx.ai/blog/unlocking-intraday-markets-revenue-potential-for-hems-providers>

Harvard University, John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences. (2023). *Edge Computing for Real-Time Smart Energy Management*. Harvard University. <https://seas.harvard.edu/news/2023/edge-computing-smart-energy-management>

Hoeller, A., Souza, R. D., Alves, H., Monteiro, E., Almeida, E., Sousa, R. T., & Rodríguez, J. (2020). Beyond 5G Low-Power Wide-Area Networks: A LoRaWAN Suitability Study. *arXiv preprint arXiv:2002.08256*. <https://arxiv.org/abs/2002.08256>

Hossain, M., Fotouhi, A., & Hasan, K. (2022). Interoperability in Smart Homes: Matter, Thread, and IP-Based IoT Frameworks. *IEEE Access*, 10, 64285–64299. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180157>

Huang, Y., Chen, W., Zhang, W., & Zhou, H. (2020). High-Efficiency Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: A Review. *Energy Reports*, 6, 2438–2452. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.014>

International Energy Agency (IEA). (2021). *Smart Grids and HEMS Integration in Japan: Lessons from Pilot Projects*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/japan-2021>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

Jouhari, M., Hossain, E., Abdellatif, T., & Ben-Othman, J. (2022). A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges. *arXiv preprint arXiv:2202.11082*. <https://arxiv.org/abs/2202.11082>

Kabalci, E. (2016). *Smart Grids and Their Communication Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23997-8>

Kakran, S., & Chanana, S. (2018). Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.045>

Kakran, S., Chanana, S., & Singh, P. (2021). Renewable Energy Integration and Energy Storage in Smart Homes: A Review of Optimization Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110225>

Kakran, S., Kumar, N., & Singh, S. (2021). Optimization of PV Generation and Storage Integration Using AI and IoT-Based Home Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110239>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Kaldellis, J. K., Zafirakis, D., & Kondili, E. (2017). *Tilos: The first autonomous renewable green island in the Mediterranean – A Horizon 2020 project*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.887615>
- Kavousi-Fard, A., & Tarashkar, N. (2021). A Novel Home Energy Management System Based on Machine Learning and Optimization. *Energy Reports*, 7, 6091–6103. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.066>
- Khabbush, A., Alquthami, T., Mahmoud, M., & Abdel-Aziz, M. (2020). A Comparative Study of Centralized, Distributed, and Hybrid Architectures for Home Energy Management Systems. *Energies*, 13(21), 5672. <https://doi.org/10.3390/en13215672>
- Khan, I., Xu, Y., Ullah, Z., & Ali, G. (2020). A Comprehensive Review on Smart Grid Technologies and Applications in Power Systems. *Energies*, 13(23), 6116. <https://doi.org/10.3390/en13236116>
- Khosravi, A., Rezaei, M., & Rahmani, M. (2021). Artificial Intelligence Techniques for Energy Consumption Forecasting in Smart Homes: A Comprehensive Review. *Energy and Buildings*, 247, 111112. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111112>
- Kieny, C., Verzijlbergh, R., Blik, F., & De Vries, L. (2019). Aggregation of Flexibility in Local Energy Communities: The Role of Virtual Power Plants. *Energy Policy*, 135, 111019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111019>
- Kim, J., & Park, S. (2021). AI-Based Smart Home Energy Management System for Urban Residential Complexes in South Korea. *Energies*, 14(22), 7582. <https://doi.org/10.3390/en14227582>
- Klein, L., Goyal, M., Singh, R., & Meyer, T. (2020). Smart Home Energy Management and Sustainability: A Review of Trends and Future Directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110020>
- KNX Association. (2023). *What Is KNX? The Worldwide Standard for Smart Home and Building Automation*. <https://www.knx.org/knx-en/for-professionals/what-is-knx/>
- Kremers, E., Eicker, U., Rivas, D., & Kandler, C. (2020). Decentralized Control and Virtual Power Plant Integration of Residential Battery Systems: The SonnenCommunity Case Study. *Applied Energy*, 276, 115475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115475>
- Kremers, E., Vieira, J., de la Nieta, A., & Gonzalez, J. (2020). Virtual power plant operation and management using decentralized storage units. *Energy Reports*, 6, 145–156.
- Kuenzi, F., Widmer, J., & Giustiniano, D. (2020). IEEE 802.11ax: Improving Wi-Fi for Next Generation Wireless LANs. *IEEE Access*, 8, 153027–153046.
- Lapshin, P. (2023). *Integration of KNX and IoT Systems for Smart Building Control*. <https://iotbusinessnews.com/2023/03/knx-iot-integration-smart-building/>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Li, H., Zhao, W., Deng, L., & Sun, X. (2022). Machine Learning-Based Real-Time Control for Energy Management in Smart Homes with Renewable Energy and Storage. *IEEE Access*, 10, 45823–45836. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3167479>
- Li, Y., Zhang, C., Wang, J., & Chen, Q. (2021). Energy Efficiency Optimization in Smart Homes: A Comprehensive Review. *Applied Energy*, 283, 116335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116335>
- Liu, Q., Zhang, M., Li, X., & Wang, T. (2022). Economic Assessment and Return on Investment of Home Energy Management Systems in Residential Buildings. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133456>
- Liu, Y., Sun, H., Wang, J., & Zhao, R. (2022). Deep Reinforcement Learning-Based Fault Detection and Energy Optimization for Smart Home Energy Management Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(9), 6235–6247. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3157894>
- Liu, Y., Wang, J., Qin, H., & Li, F. (2021). Multi-agent reinforcement learning for demand side management in smart grid. *Energy*, 214, 118874. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118874>
- Liu, Y., Yu, X., Zhao, T., & Wang, Z. (2021). Multi-Agent Reinforcement Learning for Power System Stability and Flexibility. *Applied Energy*, 300, 117346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117346>
- López-Pérez, D., Garcia-Rodriguez, A., Galati-Giordano, L., Kasslin, M., & Doppler, K. (2019). IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back. *IEEE Communications Magazine*, 57(3), 114–121. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800877>
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2015). *Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review* (τ. 60). Geothermics. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.02.004>
- Mahapatra, B. K., & Nayyar, A. (2022). AI-Based Energy Management Systems for Smart Cities: A Comprehensive Review. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103547. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103547>
- Mahapatra, B., & Nayyar, A. (2022). Home energy management system (HEMS): Concept, architecture, infrastructure, challenges and energy management schemes. *Energy Systems*, 13. <https://doi.org/10.1007/s12667-019-00364-w>
- Marinescu, A., Sanduleac, M., Popescu, B., & Dobre, C. (2021). Artificial Intelligence Techniques for Virtual Power Plants: Optimization, Forecasting and Energy Trading. *Applied Energy*, 301, 117443. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117443>
- Mocanu, D., Nguyen, P. H., Gibescu, M., & Kling, W. L. (2018). On-line Building Energy Optimization Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 3698–3708. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834219>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Mocanu, E., Nguyen, P. H., Kling, W. L., & Gibescu, M. (2018). Deep learning for estimating building energy consumption. *Applied Energy*, 221, 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.128>
- Muppala, R. (2021). Feasibility of GNSS-Free Localization: A TDoA-Based Approach Using LoRaWAN. *arXiv preprint arXiv:2107.14494*. <https://arxiv.org/abs/2107.14494>
- Mwasilu, F., Justo, J. J., Kim, E.-K., Do, T. D., & Jung, J.-W. (2014). Electric Vehicles and Smart Grid Interaction: A Review on Vehicle to Grid and Renewable Energy Integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>
- Nest Labs, Inc. (2015). *Energy Savings from the Nest Learning Thermostat: Energy Bill Analysis Results*. Google Nest. <https://storage.googleapis.com/nest-public-downloads/press/documents/energy-savings-white-paper.pdf>
- Next Kraftwerke GmbH. (χ.χ.). *Next Kraftwerke Virtual Power Plant*. <https://www.next-kraftwerke.com/virtual-power-plant>
- Next Kraftwerke GmbH. (2024). *Next Kraftwerke – The Virtual Power Plant Next Pool*. <https://www.next-kraftwerke.com/virtual-power-plant>
- Nutanix. (2023). *The Future of Energy Management: Cloud-Based HEMS Solutions*. <https://www.nutanix.com/company/news/press-releases/future-of-energy-management>
- Ofgem. (2023). *Demand Flexibility Service and Smart Home Participation – Ofgem Report 2023*. <https://www.ofgem.gov.uk/publications/demand-flexibility-service-2023>
- OSTI.GOV. (2018). *Home Energy Management Systems: An Overview*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1423114>
- Pal, R., & Kumar, R. (2020). Demand Response-Based Home Energy Management Systems: A Comprehensive Review. *Energy Reports*, 6, 662–672. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.03.014>
- Palensky, P., & Dietrich, D. (2011). Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 381–388. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841>
- Palensky, P., Fränzle, M., & Kupzog, F. (2021). Standards for demand side management—A survey. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 982–992. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2368356>
- Papageorgiou, D., Karampelas, P., Tsikalakis, A., & Hatziargyriou, N. (2022). Integration of Net Metering and Demand Response Mechanisms in Residential Energy Management Systems. *Energies*, 15(19), 7135. <https://doi.org/10.3390/en15197135>
- Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1, 16032. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.32>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Parreño-Rodríguez, D., García-Torres, A., Muñoz, M., & Sánchez, R. (2023a). Integrating Home Energy Management Systems with Renewable Generation and Storage: Lessons from Southern Europe. *Energy Reports*, 9, 13215–13232. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.145>

Parreño-Rodríguez, D., García-Torres, A., Muñoz, M., & Sánchez, R. (2023b). Integrating Home Energy Management Systems with Renewable Generation and Storage: Lessons from Southern Europe. *Energy Reports*, 9, 13215–13232. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.145>

Paterakis, N. G., Erdinc, O., & Catalao, J. P. S. (2017). Optimal Operation of Smart Homes under Real-Time Pricing and Demand Response Events Using Model Predictive Control. *Energy and Buildings*, 138, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Coronel, J. F., & Maestre, I. R. (2022). Smart Homes and Buildings: Energy Efficiency and Comfort—A Review. *Energy and Buildings*, 258, 111823. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111823>

SAP. (2022). *SAP Energy Data Management and IoT integration*. <https://www.sap.com>

SAP SE. (2022). *Energy Data Management (IS-U/EDM)—SAP Help Portal*. <https://help.sap.com/>

Schmutzler, J., Widmer, F., Bernath, C., & Andersson, G. (2021). Tiko – A Case Study of a Large-Scale Demand Response and Virtual Power Plant Platform in Europe. *Energy Reports*, 7, 7123–7138. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.107>

Schneider Electric. (χ.χ.-a). *EcoStruxure: Innovation at Every Level – Schneider Electric*. <https://www.se.com/ww/en/work/campaign/innovation/platform.jsp>

Schneider Electric. (χ.χ.-b). *EcoStruxure Microgrid Advisor – Intelligent Energy Optimization*. <https://www.se.com/ww/en/work/products/microgrid-advisor/>

Schneider Electric. (χ.χ.-c). *Fault Detection and Diagnostics (FDD) in EcoStruxure Building Advisor*. <https://www.se.com/ww/en/work/products/building-advisor/>

Schneider Electric. (2023). *Integrating Home Energy Management Systems with Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid (V2G) Technologies*. <https://www.se.com/ww/en/work/solutions/for-business/electric-utilities/smart-grid-solutions.jsp>

Smart Grid Innovation Network Canada. (2022). *Smart Grid Atlantic: Building Resilience through Home Energy Management*. Smart Grid Innovation Network Canada. <https://www.sgin.ca/projects/smart-grid-atlantic>

SolarEdge Technologies Ltd. (2023). *SolarEdge Home Energy Management – Integrated PV, Storage, and Smart Energy Ecosystem*. <https://www.solaredge.com/en/products/solaredge-home>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Song, Z., Zhao, Y., Xu, Y., Zhang, P., & Chen, J. (2022). Recent Advances and Challenges of Bifacial Photovoltaic Modules: A Review. *Solar Energy*, 237, 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.046>

Sonnen GmbH. (2023a). *SonnenBatterie and SonnenCommunity – Smart Home Energy Management and Virtual Power Plant Platform*. <https://sonnen.de/en/sonnenbatterie>

Sonnen GmbH. (2023b). *SonnenFlat – Community Energy Tariff and Circular Energy Economy Model*. <https://sonnen.de/en/sonnenflat>

STL Partners. (2023). *Edge Computing in Energy: From Smart Homes to Smart Grids*. <https://stlpartners.com/articles/edge-computing-in-energy/>

Stojkoska, B. L. R., & Trivodaliev, K. V. (2017). A Review of Internet of Things for Smart Home: Challenges and Solutions. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1454–1464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.006>

Swisscom Energy Solutions. (2023). *Swisscom Energy Solutions and Tiko: Flexible Energy Management for Smart Homes*. <https://www.swisscom.ch/en/residential/tiko-energy-solutions.html>

Sympower. (2024). *Sympower and Optimus Energy join forces to unlock 230 MW of flexibility in the Greek balancing market*. <https://sympower.net/news/optimus-energy-sympower-230mw-greece-balancing-market>

Takahashi, R., Yoshimura, T., & Namerikawa, T. (2019). Optimal Demand Response Based on Distributed Optimization in Residential Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 4001–4010. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2839674>

Tao, Y., Zhang, L., & Chen, W. (2021). Energy Anomaly Detection in Smart Homes Using Deep Autoencoders and Machine Learning Techniques. *Energy and Buildings*, 251, 111345. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111345>

Taromboli, E., Giordano, P., & Riva, M. (2025a). Integrating Smart Grids, Renewable Energy, and Energy Communities: Regulatory and Technological Perspectives for 2030. *Energy Policy*, 189, 114923. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114923>

Taromboli, E., Giordano, P., & Riva, M. (2025b). Integrating Smart Grids, Renewable Energy, and Energy Communities: Regulatory and Technological Perspectives for 2030. *Energy Policy*, 189, 114923. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114923>

Tesla. (χ.χ.). *Virtual Power Plant Integration with Tesla Powerwall*.

Tesla, Inc. (χ.χ.). *Tesla Powerwall: Technical Specifications*. <https://www.tesla.com/powerwall>

Tesla Inc. (2023). *Tesla Powerwall: Home Battery for Energy Independence*. <https://www.tesla.com/powerwall>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

- Tiko Energy Solutions. (2024). *Tiko Energy Solutions – AI-Enabled Home Energy Management and Virtual Power Plant Platform*. <https://tiko.energy/en/solutions/>
- Tushar, W., Saha, T. K., Yuen, C., Morstyn, T., Poor, H. V., & Bean, R. (2018). Peer-to-Peer Energy Trading with Blockchain Technology for Smart Grids: A Survey. *Applied Energy*, 228, 2454–2469. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.048>
- U.S. Department of Energy. (2021). *Net-Zero Energy Communities with SolarEdge Home Systems – U.S. Department of Energy Report*. <https://www.energy.gov/articles/net-zero-energy-communities-solaredge-case-study>
- U.S. Department of Energy (DOE). (2021). *Net-zero energy communities and SolarEdge adoption in the US*. <https://www.energy.gov>
- U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information (OSTI). (2018). *Home Energy Management Systems (HEMS): A Review of Current Practices and Future Prospects*. U.S. Department of Energy. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1470915>
- van Winden, W. (2017). The Energy Atlas Amsterdam: Data-driven planning for a sustainable city. *Journal of Urban Technology*, 24(4), 75–91. <https://doi.org/10.1080/10630732.2017.1334835>
- Vázquez-Canteli, J. R., & Nagy, Z. (2019). Reinforcement Learning for Demand Response: A Review of Algorithms and Modeling Techniques for Smart Energy Management. *Applied Energy*, 235, 1072–1089. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.002>
- Vojdani, A. (2008). Smart Integration. *IEEE Power & Energy Magazine*, 6(6), 71–79.
- Wang, J., Li, Q., & Zhang, C. (2021). Real-Time Data Analytics and Energy Optimization in IoT-Enabled Smart Homes. *IEEE Access*, 9, 121295–121308. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109863>
- Wang, J., Zhou, B., Zhang, P., & Li, Y. (2021). An Integrated Home Energy Management System with Renewable Generation, Electric Vehicle and Demand Response Capabilities. *Energy Reports*, 7, 3932–3945. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.089>
- Wang, L., Zhang, R., Chen, M., & Xu, J. (2022). Deep Q-Network Based Autonomous Energy Management for Electric Vehicle Charging in Smart Homes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(2), 1678–1689. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3142518>
- Wang, Y., Li, P., Zhang, H., & Wang, T. (2021). Artificial Intelligence-Based Energy Management Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110702. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110702>
- Wilson, D., & Martinez, S. (2020). Integration of Modbus Protocol in Smart Grid Systems. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 18, 245–252.

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Yoldas, Y., Ozturk, U. A., Ramasamy, M., Ozansoy, C., Zayegh, A., & Gorkemli, B. (2017). Enhancement of Smart Grid with Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1114–1123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.071>

Zafeiratou, E., & Kaldellis, J. K. (2019). Energy management strategies and RES integration in autonomous island microgrids. *Renewable Energy*, 138, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.048>

Zhang, Q., Ping, P., Wei, X., Li, G., Shi, X., Ruan, X., & Chen, Z. (2020). A Review of Solid-State Batteries: Materials, Interfaces and Performance. *Journal of Power Sources*, 480, 228836. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228836>

Zhang, X., Gomes, I., & others. (2022). Recent Techniques Used in Home Energy Management Systems: A Systematic Review. *Energies*, 15(8), 2866. <https://doi.org/10.3390/en15082866>

Zhao, L., Chen, X., & Wang, R. (2021). A Comprehensive Review on Energy Management Strategies for Smart Homes and Buildings. *Applied Energy*, 288, 116625. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116625>

Zhou, K., Yang, S., & Shao, Z. (2020a). Deep Learning-Based Load Forecasting for Smart Homes in a Smart Grid Environment. *Applied Energy*, 257, 114102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114102>

Zhou, K., Yang, S., & Shao, Z. (2020b). Energy Internet: The state-of-the-art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3570–3588.

Zhou, Y., Liu, W., Xu, F., & Chen, H. (2020). Predictive Control of Home Energy Management Systems with Renewable Energy Sources and Storage. *Applied Energy*, 262, 114567. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114567>

Z-Wave Alliance. (2024). *The Internet of Things Is Powered by Z-Wave*. <https://z-wavealliance.org/>

Z-Wave.Me. (2024). *Z-Way for Raspberry Pi, Windows, Linux*. <https://z-wave.me/z-way/z-way/>

Εικόνα 1. Wang, Z., Hong, T., & Piette, M. A. (2021). Building energy prediction using deep neural network and novel data augmentation method. *Energy and Buildings*, 231, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110678>

Εικόνα 2. Alam, M. R., Reaz, M. B. I., & Ali, M. A. M. (2012). Design and implementation of a cloud-IoT-based home energy management system. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58(4), 1169–1177. <https://doi.org/10.1109/TCE.2012.6414961>

Εικόνα 3. Ιδία επεξεργασία βάσει [αναφορών Zigbee, Z-Wave, Modbus, KNX, Wi-Fi, Lo-RaWAN].

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Εικόνα 4. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). *Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

Εικόνα 5. Liu, N., Yu, X., Wang, C., Li, C., Ma, L., & Wang, J. (2016). *Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 3569–3583.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2645559>

Εικόνα 6. Motta, L. L., Ferreira, L. C. B. C., Cabral, T. W., Lemes, D. A. M., Cardoso, G. d. S., Borchardt, A., Cardieri, P., Fraidenraich, G., de Lima, E. R., Neto, F. B., & Meloni, L. G. P. (2023). *General overview and proof of concept of a smart home energy management system architecture*. *Electronics*, 12(21), 4453.
<https://doi.org/10.3390/electronics12214453>

Εικόνα 7. Atlam, H. F., & Wills, G. B. (2020). *IoT security, privacy, safety and ethics*. *Digital Communications and Networks*, 6(2), 81–88.
<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.08.006>

Εικόνα 8. Mocanu, E., Nguyen, P. H., Kling, W. L., & Gibescu, M. (2018). *Deep learning for estimating building energy consumption*. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 16, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.06.002>

Εικόνα 9. Connectivity Standards Alliance. (2022). *Matter: The foundation for connected things*. CSA. <https://csa-iot.org/all-solutions/matter/>

Εικόνα 10. Ghosh, A., Basu, M., & Das, S. (2019). *A survey on security and privacy issues in smart grids*. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 127, 134–145.
<https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.01.006>

Εικόνα 11. Mocanu, E., Nguyen, P. H., Kling, W. L., & Gibescu, M. (2018). *Deep learning for estimating building energy consumption*. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 16, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.06.002>

Εικόνα 12. EnergySage. (2021). *How home energy management systems work*. EnergySage. <https://www.energysage.com/energy-management/>

Εικόνα 13. Wikimedia Commons. (2016). *Net metering diagram*. Wikimedia Foundation. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Net_Metering_Diagram.png

Εικόνα 14. Wikimedia Commons. (2020). *Virtual power plant illustration*. Wikimedia Foundation. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Virtual_power_plant.png

Εικόνα 15. Energy Sovereignty Institute. (2021). *Microgrid solar – community energy systems*. Energy Sovereignty Institute. <https://energysov.org/microgrid-solar>

Εικόνα 16. Kakran, S., & Chanana, S. (2021). *Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.018>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Εικόνα 17. Tesla. (2023). Tesla Powerwall: Technical specifications and performance. Tesla Inc. <https://www.tesla.com/powerwall>

Εικόνα 18. Li, H., Wan, Z., & He, H. (2020). Real-time residential demand response: A deep reinforcement learning approach. *Energies*, 13(12), 2980. <https://doi.org/10.3390/en13122980>

Εικόνα 19. Khosravi, A., Nahavandi, S., Creighton, D., & Atiya, A. F. (2021). Comprehensive review of artificial intelligence and machine learning applications in energy systems. *Energy Reports*, 7, 4005–4020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.020>

Εικόνα 20. GeeksforGeeks. (2023). Supervised vs Unsupervised vs Reinforcement Learning. <https://www.geeksforgeeks.org/supervised-vs-unsupervised-vs-reinforcement-learning/>

Εικόνα 21. *Energies Journal*. (2021). Machine learning approaches to predict energy consumption. MDPI. <https://www.mdpi.com/journal/energies>

Εικόνα 22. Gholamzadehmir, M., Al-Fuqaha, A., & Ayyash, M. (2021). Energy management in modern buildings based on demand prediction and optimization using hybrid data-driven and AI methods. *Energies*, 14(3), 563. <https://doi.org/10.3390/en14030563>

Εικόνα 23. TechCrunch. (2017). Google Nest Thermostat with AI-driven HVAC management. TechCrunch. <https://techcrunch.com>

Εικόνα 24. Tesla. (n.d.). Tesla Powerwall. Tesla, Inc. Retrieved September 28, 2025, from <https://www.tesla.com/powerwall>

Εικόνα 25. Shutterstock. (n.d.). Smart factory with IoT and AI-based energy management on tablet screen. Retrieved September 28, 2025, from <https://www.shutterstock.com/>

Εικόνα 26. Tiko Energy Solutions AG. (n.d.). Tiko energy management platform – Dashboard interface. Retrieved September 28, 2025, from <https://tiko.energy>

Εικόνα 27. Bosch. (2023). Bosch Smart Home app – Connected appliances and energy management. Retrieved September 28, 2025, from <https://www.bosch-smarthome.com>

Εικόνα 28. Hive. (2023). Hive Smart Thermostat – Control your heating from anywhere. Hive Energy. Retrieved September 28, 2025, from <https://www.hivehome.com>

Εικόνα 29–30. Sonnen. (2023). SonnenBatterie: Smart energy storage solutions. Sonnen GmbH. Retrieved September 28, 2025, from <https://sonnen.de>

Εικόνα 31. SolarEdge. (2023). SolarEdge Home – Smart energy ecosystem for solar, storage, EV charging, and smart devices. SolarEdge Technologies. Retrieved September 28, 2025, from <https://www.solaredge.com>

State-of-the-Art Analysis of Home Energy Management Systems

Μπιμπίκας Αθανάσιος

Εικόνα 32. I amsterdam. (2023, December 5). How smart grids are enabling Amsterdam's energy transition. <https://www.i amsterdam.com/en/business/how-smart-grids-are-enabling-amsterdams-energy-transition>

Εικόνα 33. State of Green. (2023). How district heating is paving the way towards Denmark's climate goals. <https://stateofgreen.com/en/news/how-district-heating-is-paving-the-way-towards-denmarks-climate-goals/>

Εικόνα 34. Solarserver. (2022, April 22). Next Kraftwerke: Mehr als 10 GW Leistung aus Photovoltaik, Windenergie & Co. (Grafik: Next Kraftwerke GmbH). <https://www.solarserver.de/2022/04/22/next-kraftwerke-mehr-als-10-gw-leistung-aus-photovoltaik-windenergie-und-co/>

Εικόνα 35. Sustainable Greece. (2024, January). Minoan Energy Community: Dreams and fights for a fair energy transition in Crete. <https://sustainablegreece.co.uk>