

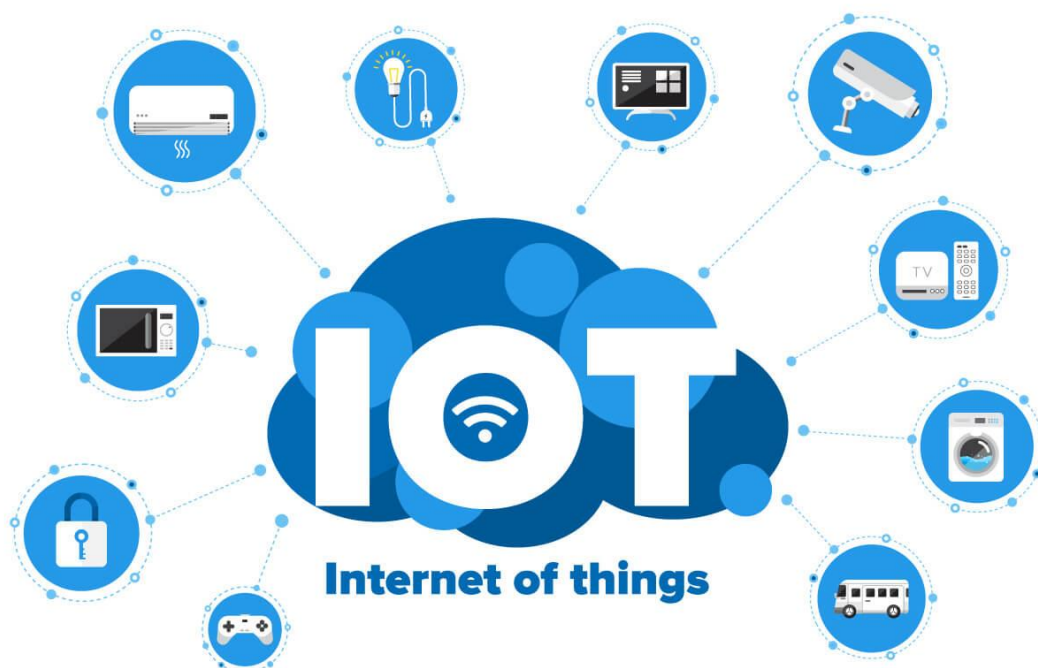


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΙΣ ΙΟΤ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

ΓΕΜΕΛΙΑΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



ΑΡΤΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ, 2025

ENERGY EFFICIENCY IN IOT DEVICES

© Γεμελιάρης, Δημήτριος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Περίληψη

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αποτελεί μια τεχνολογία που μετασχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές αλληλεπιδρούν, συλλέγουν και επεξεργάζονται δεδομένα, με εφαρμογές σε τομείς όπως οι έξυπνες πόλεις, η υγειονομική περίθαλψη, η γεωργία και η ενέργεια. Κεντρικό ζήτημα αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας, καθώς οι IoT συσκευές συχνά λειτουργούν με περιορισμένους πόρους και απαιτούν αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα για τη βιώσιμη λειτουργία τους. Η ενεργειακή εξοικονόμηση επιτυγχάνεται μέσω βελτιστοποίησης του υλικού και του λογισμικού, χρήσης αποδοτικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, edge computing και τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας. Παράλληλα, αναδεικνύονται προκλήσεις όπως η ασφάλεια, η διαλειτουργικότητα και οι περιορισμοί των μπαταριών, ενώ η μελλοντική εξέλιξη των IoT συστημάτων προσανατολίζεται στην ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης, τη χρήση δικτύων 5G/6G και την ανάπτυξη έξυπνων, αυτοματοποιημένων και ενεργειακά βιώσιμων λύσεων.

Λέξεις-κλειδιά: Διαδίκτυο των Πραγμάτων, κατανάλωση ενέργειας, edge computing, ενεργειακή εξοικονόμηση, ενεργειακά βιώσιμων λύσεων.

Abstract

The Internet of Things (IoT) is a technology that transforms the way devices interact, collect, and process data, with applications in areas such as smart cities, healthcare, agriculture, and energy. A central issue is energy consumption, as IoT devices often operate with limited resources and require increased energy efficiency for sustainable operation. Energy savings are achieved through hardware and software optimization, the use of efficient communication protocols, edge computing, and energy harvesting technologies. At the same time, challenges such as security, interoperability, and battery limitations are highlighted, while the future development of IoT systems is oriented toward the integration of artificial intelligence, the use of 5G/6G networks, and the development of smart, automated, and energy-efficient solutions.

Keywords: Internet of Things, energy consumption, edge computing, energy saving, energy-efficient solutions.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Ευρετήριο Πινάκων.....	7
Ευρετήριο Εικόνων	7
Πίνακας συντομογραφιών	8
Εισαγωγή.....	9
1. Εισαγωγή στο Internet of Things (IoT)	11
1.1 Τι είναι το IoT και πώς λειτουργεί	12
1.2 Κύριες εφαρμογές του IoT	13
1.3 Προκλήσεις και περιορισμοί στις IoT συσκευές	16
1.4 Μελλοντικές τάσεις επέκτασης των συστημάτων IoT	19
2. Κατανάλωση Ενέργειας στις IoT Συσκευές.....	22
2.1 Βασικές Αρχές Ενεργειακής Αποδοτικότητας.....	24
2.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανάλωση Ενέργειας.....	25
2.3 Τεχνολογίες και Στρατηγικές Εξοικονόμησης Ενέργειας.....	28
2.3.1 Βελτιστοποίηση hardware για χαμηλή κατανάλωση.....	29
2.3.2 Βελτιστοποίηση λογισμικού για διαχείριση της κατανάλωσης	32
3. Χαμηλού Κόστους Λύσεις για Βελτίωση Ενεργειακής Απόδοσης.....	35
3.1 Μπαταρίες και περιορισμός των διατάσεων.....	36
3.2 Οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες μπαταριών.....	38
3.2.1 Λιθίου-Ιόντων (Li-Ion)	39
3.2.2 Λιθίου-Πολυμερούς (Li-Po)	40
3.2.3 Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου (NiMH).....	40
3.2.4 LiFePO ₄ (Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου).....	41
3.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	42
3.3.1 BLE (Bluetooth Low Energy)	43
3.3.2 Zigbee	44
3.3.3 Z-Wave	45
3.3.4 LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	46
3.3.5 Sigfox.....	47
3.3.6 NB-IoT (Narrowband IoT)	48
3.3.7 LTE-M (LTE Cat-M1)	49
3.4 Edge Computing και τοπική επεξεργασία δεδομένων	50

4. Σύγχρονες Εξελίξεις και Μελλοντικές Τάσεις.....	53
4.1 Πρόσφατες έρευνες για ενεργειακή απόδοση στις IoT συσκευές	55
4.2 Συγκριτική ανάλυση κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας.....	61
4.3 Μελλοντικές εξελίξεις και προοπτικές	64
Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	70

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας.....	62
--	----

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων	10
Εικόνα 2 Αρχιτεκτονική IoT.....	13
Εικόνα 3 Smart IoT	15
Εικόνα 4 IoT Συστήματα.....	20
Εικόνα 5 Μέθοδοι Κατανάλωσης Ενέργειας IoT.....	23
Εικόνα 6 Edge και Fog Computing.....	28
Εικόνα 7 IoT Hardware	30
Εικόνα 8 Τοπολογία δικτύου LoRa WAN	31
Εικόνα 9 Real-Time Operating System.....	33
Εικόνα 10 Τεχνολογίες IoT έξυπνου σπιτιού.....	34
Εικόνα 11 IoT Βελτίωση Ενεργειακής Απόδοσης	35
Εικόνα 12 Αρχιτεκτονική IoT Edge Computing.....	51
Εικόνα 13 Αρχιτεκτονική IoT Cloud.....	52
Εικόνα 14 Έξυπνη διαχείριση ενέργειας με το IoT.....	53
Εικόνα 15 Σύστημα προγνωστικής διαχείρισης ενέργειας	55
Εικόνα 16 Μηχανισμός ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων για το IoT	57
Εικόνα 17 Απεικόνιση του μοντέλου Predictive Energy Modeling.....	58
Εικόνα 18 Αρχιτεκτονική δικτύου του συστήματος Edge-IoT.....	59
Εικόνα 19 Μια γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας LEACH	60
Εικόνα 20 Γραφική Απεικόνιση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας Κατανάλωση Μπαταρίας.....	63
Εικόνα 21 Γραφική Απεικόνιση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας με βάση τα Πακέτα...	64
Εικόνα 22 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση για ενεργειακή βελτιστοποίηση στο IoT	66
Εικόνα 23 Διαχείριση δεδομένων για ενεργειακή αποδοτικότητα και ιδιωτικότητα στα IoT.	67

Πίνακας συντομογραφιών

IoT.....	Internet of Things
ICT.....	Internet Computing Technology
DoS.....	Denial-of-Service
MQTT.....	Message Queuing Telemetry Transport
COAP.....	Constrained Application Protocol
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
BLE.....	Bluetooth Low Energy
RTOS.....	Real-Time Operating Systems
ECC.....	Elliptic Curve Cryptography
BMS.....	Battery Management Systems
NB-IoT.....	Narrowband Internet of Things
LTE-M.....	Long Term Evolution for Machines
eDRX.....	extended Discontinuous Reception
PSM.....	Power Saving Mode
AI.....	Artificial Intelligence
ML.....	Machine Learning
DRL.....	Deep Reinforcement Learning
DQN.....	Deep Q-Networks
LEACH.....	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
QCA.....	Quantum-dot Cellular Automata
PEM.....	Predictive Energy Modeling

Εισαγωγή

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) αποτελεί μια καινοτόμο τεχνολογία που διαμορφώνει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι φυσικές συσκευές αλληλοεπιδρούν και ενσωματώνονται στο σύγχρονο ψηφιακό περιβάλλον. Χάρη στην προηγμένη συνδεσιμότητα που προσφέρει, επιτρέπει τη διασύνδεση δισεκατομμυρίων φυσικών αντικειμένων και έξυπνων συσκευών σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτά τα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν, να ανταλλάσσουν και να επεξεργάζονται δεδομένα αυτόματα, μέσω ενός ενοποιημένου δικτύου, χωρίς την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση.

Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η αυτοματοποίηση διαδικασιών, βελτιώνονται η αποδοτικότητα και η παραγωγικότητα, ενώ παράλληλα ανοίγονται νέοι ορίζοντες για την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, βιομηχανιών, μεταφορών και υγειονομικών υπηρεσιών.

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα που απαιτούν την ενεργή ανθρώπινη συμμετοχή, οι αυτοματοποιημένες λύσεις του IoT επιτυγχάνουν πολύ ταχύτερη και ακριβέστερη απόδοση, προσφέροντας συνεχή ροή δεδομένων και ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων.



Εικόνα 1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων

1. Εισαγωγή στο Internet of Things (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελεί το δίκτυο επικοινωνίας πληθώρας συσκευών, οικιακών συσκευών, αυτοκινήτων καθώς και κάθε αντικειμένου που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων.

Στον σύγχρονο τομέα των εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων, η συνεργασία και η ολοκληρωμένη σύζευξη με τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) έχει συμβάλει καταλυτικά στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογικών λύσεων και στην εισαγωγή καινοτομιών σε ποικίλους τομείς. Τα ενσωματωμένα συστήματα, σε συνδυασμό με αισθητήρες και μονάδες συλλογής δεδομένων, ενδυναμώνουν τη λειτουργικότητα των IoT συσκευών και επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση και τον αυτοματοποιημένο έλεγχο φυσικών και βιομηχανικών διαδικασιών.

Η ενσωμάτωση των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ICT) με τον εξελισσόμενο τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) έχει επιφέρει μια σημαντική μεταμόρφωση στην υπολογιστική. Ωστόσο, μια αξιοσημείωτη πρόκληση είναι η διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών IoT και των σχετικών δικτύων. Η ευρεία χρήση συσκευών IoT, που λειτουργούν με περιορισμένους πόρους, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης για βιώσιμη λειτουργία. Η πρόκληση αυτή γίνεται πιο έντονη σε εκτεταμένες αναπτύξεις IoT, όπου πολυάριθμες διασυνδεδεμένες συσκευές συνεργάζονται για την ανταλλαγή δεδομένων.

Στον ακαδημαϊκό χώρο της επιστήμης των υπολογιστών, η αντιμετώπιση αυτής της ανησυχίας περιλαμβάνει την εύρεση καινοτόμων λύσεων για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των υπολογιστικών απαιτήσεων των εφαρμογών IoT και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Η προσπάθεια αυτή στοχεύει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των οικοσυστημάτων ICT που υποστηρίζονται από IoT.

Η διαχείριση της ενέργειας στο IoT επεκτείνεται πέρα από την ανάλυση της κατανάλωσης, περιλαμβάνοντας ολόκληρο τον κύκλο ζωής, από τη δημιουργία ενέργειας έως την κατανάλωση. Επίσης, περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους πελάτες. Για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση

των πελατών, το οικοσύστημα του IoT χρησιμοποιεί μηχανισμούς παρακολούθησης και ελέγχου για την εποπτεία των λειτουργιών των παρόχων υπηρεσιών. Κατά συνέπεια, ο τομέας των αστικών υπηρεσιών ξεχωρίζει ως η μεγαλύτερη παγκόσμια αγορά για εφαρμογές IoT.

Η τεχνολογία του IoT περιλαμβάνει συσκευές, δίκτυα επικοινωνίας και πρωτόκολλα, τα οποία αποτελούν κρίσιμο παράγοντα στον συντονισμό και τη ρύθμιση ενεργειακών διαδικασιών όπως η παραγωγή, η συγκομιδή, η αποθήκευση και η κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χωριστεί σε αρκετές λειτουργικές κατηγορίες με διαφορετικούς στόχους, που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των διαφόρων πτυχών της διαχείρισης ενέργειας: Παραγωγή Ενέργειας, Συγκομιδή, Κατανάλωση, Αποθήκευση.

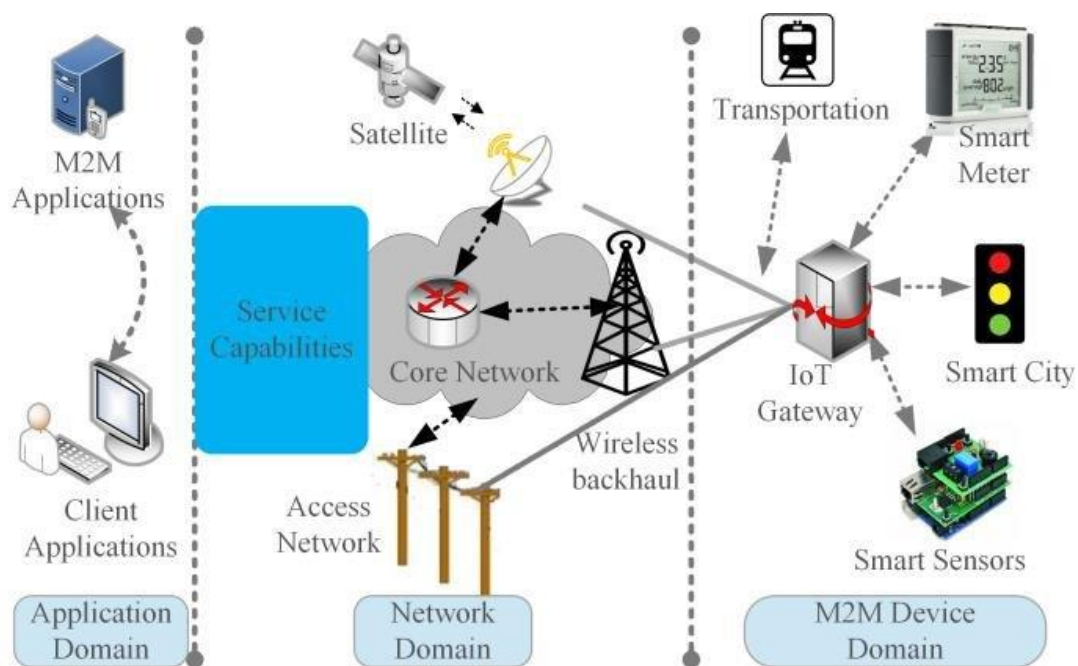
1.1 Τι είναι το IoT και πώς λειτουργεί

Το IoT μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα πολύπλοκο δίκτυο δικτύων, το οποίο ενώνει αμέτρητα συνδεδεμένα φυσικά αντικείμενα με προηγμένα συστήματα ελέγχου και ανάλυσης, με ιδιαίτερη έμφαση στην ασφάλεια και τη διαχείριση (Δασυγένης & Σούντρης, 2024). Ως αποτέλεσμα, η τεχνολογία αυτή καθίσταται θεμελιώδης για την επιτυχή εκτέλεση και αυτοματοποίηση ποικίλων εργασιών σε τομείς όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές, η υγειονομική περίθαλψη και οι έξυπνες πόλεις, καθιστώντας τις διεργασίες πιο αποτελεσματικές, ευέλικτες και καινοτόμες.

Συγκαταλέγεται αναμφίβολα στις πιο επαναστατικές και πρωτοποριακές τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών, αλλάζοντας ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον. Οι συσκευές που ανήκουν στο οικοσύστημα του IoT διαθέτουν μοναδικά χαρακτηριστικά, τα οποία τις διαφοροποιούν σημαντικά από άλλες παραδοσιακές τεχνολογικές λύσεις.

Ο πρωταρχικός σκοπός της τεχνολογίας IoT είναι η ανάπτυξη και η παροχή προηγμένων συσκευών, οι οποίες λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο και συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας και της συνέπειας στη συλλογή και διανομή κρίσιμων πληροφοριών επιφανείας.

Μέσω της δυναμικής συνδεσιμότητας και της απομακρυσμένης διαχείρισης φυσικών αντικειμένων και συσκευών, αξιοποιώντας προηγμένες δικτυακές υποδομές, το IoT ανοίγει τον δρόμο για μια πιο άμεση και διαδραστική σχέση μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Αυτή η ενσωμάτωση οδηγεί σε σημαντικά οφέλη, όπως η βελτιστοποίηση της λειτουργικής απόδοσης, η αύξηση της ακρίβειας των δεδομένων, καθώς και η δημιουργία νέων ευκαιριών για οικονομική ανάπτυξη και κερδοφορία.



Εικόνα 2 Αρχιτεκτονική IoT

1.2 Κύριες εφαρμογές του IoT

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες του ψηφιακού μετασχηματισμού, με εφαρμογές που εκτείνονται σε ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας και της βιομηχανίας. Οι τεχνολογίες IoT αξιοποιούνται ευρέως τόσο για την αυτοματοποίηση διαδικασιών όσο και για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που συμβάλλει στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και στην ενίσχυση της αποδοτικότητας και βιωσιμότητας συστημάτων και οργανισμών.

Ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς τομείς εφαρμογής του IoT είναι οι έξυπνες πόλεις (Smart Cities). Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται συστήματα έξυπνης διαχείρισης της κυκλοφορίας και της στάθμευσης, όπου αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι σε οδικά δίκτυα και φανάρια επιτρέπουν την παρακολούθηση και τη ρύθμιση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, εγκαθίστανται έξυπνοι κάδοι απορριμμάτων που χρησιμοποιούν αισθητήρες για την παρακολούθηση του επιπέδου πληρότητας και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας συλλογής απορριμμάτων. Ο αστικός φωτισμός γίνεται πιο αποδοτικός μέσω της χρήσης φωτιστικών σωμάτων LED με αισθητήρες κίνησης και φωτεινότητας, επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, αναπτύσσονται δίκτυα αισθητήρων για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και των περιβαλλοντικών παραμέτρων, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για τη διαμόρφωση περιβαλλοντικών πολιτικών και την προστασία της δημόσιας υγείας.

Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας αυτών των συσκευών επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το εύρος ζώνης και η διάρκεια μετάδοσης δεδομένων, τις ανάγκες επεξεργασίας και αποθήκευσης. Δεδομένης της μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας του ζητήματος της ενέργειας στο IoT, είναι σημαντική η χρήση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και πρακτικών για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της αξιοπιστίας του ενεργειακού εφοδιασμού. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση αποδοτικού υλικού (hardware), τη βελτιστοποίηση λογισμικού και πρωτοκόλλων επικοινωνίας και την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η ενσωμάτωση αισθητήρων σε τομείς όπως τα έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, οι έξυπνες πόλεις, οι στρατιωτικές εφαρμογές, η υγειονομική περίθαλψη, η γεωργία, η παρακολούθηση κλίματος και η βιομηχανία ενισχύει το οικοσύστημα του IoT. Ωστόσο, μια βασική πρόκληση σε αυτόν τον τομέα είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών των αισθητήρων, λόγω των αυξανόμενων υπολογιστικών απαιτήσεων και του μικρού μεγέθους/χωρητικότητας των μπαταριών.

Στον οικιακό τομέα, οι τεχνολογίες IoT εφαρμόζονται στα λεγόμενα έξυπνα σπίτια (Smart Homes), τα οποία βασίζονται στην αυτοματοποίηση οικιακών συστημάτων με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής και την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Μέσω της χρήσης έξυπνων συσκευών, οι κάτοικοι έχουν τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου φωτισμού, θέρμανσης και συστημάτων ασφαλείας μέσω εφαρμογών κινητών τηλεφώνων ή φωνητικών βοηθών, όπως οι

Amazon Alexa και Google Assistant. Παράλληλα, οι έξυπνοι θερμοστάτες και οι συσκευές παρακολούθησης κατανάλωσης ενέργειας συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής χρήσης, οδηγώντας σε μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.



Εικόνα 3 Smart IoT

Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, το IoT έχει επιφέρει σημαντικές καινοτομίες, ενισχύοντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών και την προληπτική ιατρική. Φορητές συσκευές (wearables) και εμφυτεύσιμοι αισθητήρες καταγράφουν ζωτικά δεδομένα, όπως ο καρδιακός ρυθμός, τα επίπεδα γλυκόζης και η αρτηριακή πίεση, και μεταδίδουν τα δεδομένα αυτά σε επαγγελματίες υγείας σε πραγματικό χρόνο. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών (Remote Patient Monitoring - RPM), σε συνδυασμό με πλατφόρμες τηλεϊατρικής, βελτιώνει τη διαχείριση χρόνιων παθήσεων και διευκολύνει την πρόσβαση σε ιατρική φροντίδα, ιδίως σε απομακρυσμένες περιοχές.

Η εφοδιαστική αλυσίδα και ο τομέας των logistics είναι επίσης πεδία όπου οι εφαρμογές του IoT έχουν οδηγήσει σε ριζικές αλλαγές (Καστρινός, 2018). Μέσω της χρήσης τεχνολογιών όπως τα RFID tags και οι αισθητήρες GPS, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της τοποθεσίας και της κατάστασης των εμπορευμάτων σε όλο το μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επιπλέον, οι αισθητήρες συνθηκών περιβάλλοντος, όπως θερμοκρασίας και υγρασίας, εξασφαλίζουν την ποιότητα και την ακεραιότητα

ευπαθών προϊόντων κατά τη μεταφορά, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την ασφάλεια των διαδικασιών.

Στον ενεργειακό τομέα, τα έξυπνα δίκτυα και οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, ενισχύοντας τη βιώσιμη διαχείριση ενεργειακών πόρων. Μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, τα συστήματα αυτά διευκολύνουν την εφαρμογή στρατηγικών ζήτησης και προσφοράς ενέργειας και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο. Η ανάπτυξη μικροδικτύων, τα οποία συνδυάζουν αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, υποστηρίζεται από IoT τεχνολογίες, προσφέροντας αυτονομία σε απομακρυσμένες κοινότητες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Τέλος, στη γεωργία, το IoT προωθεί την εφαρμογή της γεωργίας, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Αισθητήρες εδάφους και καιρού παρέχουν δεδομένα για την υγρασία, τη θερμοκρασία και τη σύσταση του εδάφους, επιτρέποντας στοχευμένες παρεμβάσεις άρδευσης και λίπανσης (Καστρινός, 2018). Παράλληλα, τα drones και τα αυτόνομα οχήματα επιτηρούν τις καλλιέργειες και ανιχνεύουν ενδείξεις ασθενειών ή παρασίτων, βελτιώνοντας την απόδοση και τη βιωσιμότητα της αγροτικής παραγωγής.

1.3 Προκλήσεις και περιορισμοί στις IoT συσκευές

Παρά τη ραγδαία ανάπτυξη και την ευρεία εφαρμογή των τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων, η υιοθέτηση και η αξιοποίηση των IoT συσκευών συνοδεύεται από μία σειρά προκλήσεων και περιορισμών, οι οποίοι επηρεάζουν τη λειτουργικότητα, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητά τους. Οι προκλήσεις αυτές σχετίζονται τόσο με τεχνικούς όσο και με κοινωνικούς και κανονιστικούς παράγοντες, επηρεάζοντας τη συνολική αρχιτεκτονική και την απόδοση των IoT συστημάτων.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις είναι τα ζητήματα ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων (Ζιώγου, 2023). Τα IoT συστήματα συλλέγουν, αποθηκεύουν και μεταδίδουν τεράστιους όγκους ευαίσθητων πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Η απουσία ισχυρών μηχανισμών κρυπτογράφησης και τα συχνά ελλιπή μέτρα

αυθεντικοποίησης καθιστούν τις συσκευές ευάλωτες σε επιθέσεις, όπως man-in-the-middle, denial-of-service (DoS) και επιθέσεις τύπου κακόβουλου λογισμικού (malware). Παράλληλα, οι περιορισμένοι υπολογιστικοί πόροι των συσκευών καθιστούν δύσκολη την ενσωμάτωση εξελιγμένων πρωτοκόλλων ασφαλείας, αυξάνοντας τους κινδύνους για παραβίαση της ιδιωτικότητας των χρηστών και τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε κρίσιμα δεδομένα.

Ένας επιπλέον περιοριστικός παράγοντας είναι η περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία των IoT συσκευών. Δεδομένου ότι πολλές από αυτές βασίζονται σε μπαταρίες μικρής χωρητικότητας ή απαιτούν ενέργεια από ανανεώσιμες ή περιορισμένες πηγές, η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποδοτικότητα των ενεργειακών τους κυκλωμάτων και των στρατηγικών διαχείρισης κατανάλωσης ενέργειας (Σαμαράς, 2020). Η ανάγκη για συνεχή λειτουργία και μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιβαρύνει περαιτέρω την ενεργειακή κατανάλωση, ενώ οι υπάρχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν επαρκούν για μακροχρόνια και βιώσιμη λειτουργία σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα περιβάλλοντα.

Η ανομοιογένεια και η έλλειψη τυποποίησης στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τις τεχνολογίες διασύνδεσης αποτελούν επίσης σημαντική πρόκληση για την υλοποίηση διαλειτουργικών IoT συστημάτων. Οι διαφορετικοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν ποικίλα ιδιόκτητα πρωτόκολλα, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη συμβατότητα και την αλληλεπίδραση μεταξύ συσκευών διαφορετικών προελεύσεων. Η έλλειψη καθολικών προτύπων και η ασυνεπής υιοθέτηση των υπάρχοντων όπως τα MQTT, CoAP, Zigbee, LoRaWAN δημιουργούν εμπόδια στη διασύνδεση και την ενοποίηση των συσκευών σε ενιαία δίκτυα, οδηγώντας σε αυξημένα κόστη ανάπτυξης και συντήρησης.

Επιπρόσθετα, οι περιορισμοί σε υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικούς πόρους επηρεάζουν την ικανότητα των IoT συσκευών να εκτελούν πολύπλοκους αλγορίθμους ανάλυσης δεδομένων και τεχνητής νοημοσύνης τοπικά (Tekin et al., 2024). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη αποστολής μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε κεντρικούς εξυπηρετητές ή συστήματα αιχμής για περαιτέρω επεξεργασία, γεγονός που αυξάνει την εξάρτηση από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα του δικτύου και δημιουργεί πιθανά προβλήματα καθυστέρησης.

Τέλος, οι κανονιστικοί περιορισμοί και η συμμόρφωση με νομοθεσίες προστασίας δεδομένων αποτελούν επιπλέον παράγοντα επιβράδυνσης της ευρείας εφαρμογής των

IoT τεχνολογιών (Φραντζής, 2024). Η αυστηροποίηση των πλαισίων κανονιστικής συμμόρφωσης, όπως ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (GDPR), δημιουργεί την ανάγκη για επιπρόσθετα μέτρα προστασίας δεδομένων, τα οποία συχνά οδηγούν σε αύξηση του κόστους σχεδιασμού και υλοποίησης λύσεων IoT.

Οι συνεχιζόμενες προκλήσεις και τομείς έρευνας σε αναπτύξεις IoT περιλαμβάνουν την ανίχνευση, τη συνδεσιμότητα, τη διαχείριση ισχύος, την υπολογιστική των δεδομένων IoT και την ασφάλεια. Οι ερευνητές τονίζουν την έλλειψη βασικών λειτουργιών του IoT στους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε έξυπνα σπίτια και δίκτυα. Έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές όπως η δυναμική διαχείριση ενέργειας, καθώς και τεχνικές για την επίτευξη ενεργειακά αποδοτικής επικοινωνίας μέσω ενσύρματων, ασύρματων, οπτικών και οπτικοασύρματων μεθόδων.

Η διάρκεια ζωής των δικτύων IoT επηρεάζεται κυρίως από τις δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας των αισθητήρων και τις τεχνολογίες επικοινωνίας. Αυτό περιλαμβάνει: ασύρματη επικοινωνία, Κυβερνοφυσικά Συστήματα, Επικοινωνία Συσκευής με Πύλη, Ασύρματη Μετάδοση Ισχύος, υποδομή IoT και πρωτόκολλα όπως MQTT, CoAP. Το άρθρο εξετάζει επίσης αλγορίθμους δρομολόγησης και τη συμβολή τους στη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και στη βιωσιμότητα των δικτύων.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, οι ερευνητές αναπτύσσουν νέες μεθόδους για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε συσκευές και δίκτυα IoT:

- **Ενεργειακά Αποδοτικά Πρωτόκολλα:** Ανάπτυξη πρωτοκόλλων ειδικά σχεδιασμένων για συσκευές IoT, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς σε μπαταρία και υπολογιστική ισχύ.
- **Βελτιστοποίηση σε Επίπεδο Δικτύου:** Μείωση των δεδομένων που χρειάζεται να μεταδοθούν για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.
- **Διαχείριση Ενέργειας μέσω Cloud:** Χρήση της υπολογιστικής ισχύος του cloud για την επίβλεψη και βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης.
- **Μηχανική Μάθηση & Τεχνητή Νοημοσύνη:** Πρόβλεψη προτύπων κατανάλωσης ενέργειας και βελτιστοποίηση της λειτουργίας συσκευών.

1.4 Μελλοντικές τάσεις επέκτασης των συστημάτων IoT

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων εξελίσσεται ραγδαία, αποτελώντας έναν από τους βασικούς μοχλούς της Ψηφιακής Επανάστασης. Οι προοπτικές επέκτασης των IoT συστημάτων στο προσεχές μέλλον καθορίζονται από την πρόοδο σε τομείς όπως η τεχνητή νοημοσύνη, τα δίκτυα πέμπτης και έκτης γενιάς (5G/6G), η υπολογιστική αιχμή, καθώς και οι αυξανόμενες ανάγκες για ενεργειακή αποδοτικότητα και ασφάλεια. Οι τάσεις αυτές αναμένεται να διαμορφώσουν νέες μορφές αλληλεπίδρασης ανθρώπων, συσκευών και περιβαλλόντων, προάγοντας τη δημιουργία ευφών και αυτόνομων συστημάτων.

Μία από τις κυριότερες μελλοντικές τάσεις είναι η ολοκληρωμένη αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης σε IoT συσκευές και πλατφόρμες (Κονδύλης, 2024). Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας δυνατή τη λήψη αποφάσεων με ελάχιστη ή και μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση. Αναμένεται ότι οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης θα ενσωματωθούν όλο και περισσότερο στις IoT συσκευές, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται, να προβλέπουν και να προσαρμόζονται αυτόνομα σε αλλαγές του περιβάλλοντος, βελτιώνοντας τη συνολική τους απόδοση και λειτουργικότητα.

Η υιοθέτηση των δικτύων 5G και μελλοντικά 6G θα συμβάλει σημαντικά στην επέκταση και αναβάθμιση των IoT εφαρμογών (Κονδύλης, 2024). Η χαμηλή καθυστέρηση, οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και η δυνατότητα σύνδεσης μεγάλου αριθμού συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο που προσφέρουν τα δίκτυα νέας γενιάς, θα καταστήσουν εφικτή τη μαζική υλοποίηση ευφών συστημάτων σε τομείς όπως οι αυτόνομες μεταφορές, οι έξυπνες πόλεις και η βιομηχανία 4.0. Η εξέλιξη των 6G δικτύων, με τις υποσχέσεις για ταχύτητες μετάδοσης τάξης terabits ανά δευτερόλεπτο και την ενοποίηση με τεχνολογίες όπως το Internet of Senses και το Holographic Communication, θα αναβαθμίσει περαιτέρω το οικοσύστημα του IoT.



Εικόνα 4 IoT Συστήματα

Παράλληλα, η υπολογιστική αιχμής (Edge Computing) και η υπολογιστική ομίχλης (Fog Computing) αναδεικνύονται ως κρίσιμες τάσεις για την εξέλιξη των IoT συστημάτων (Hassan et al., 2018). Η μεταφορά της επεξεργασίας δεδομένων πλησιέστερα στην πηγή παραγωγής τους μειώνει τη χρονοκαθυστέρηση και περιορίζει την ανάγκη για συνεχή μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων στο cloud, ενισχύοντας την απόκριση των εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο και τη διαθεσιμότητα υπηρεσιών ακόμα και σε περιβάλλοντα με περιορισμένη συνδεσιμότητα. Η σύζευξη edge AI με τις IoT συσκευές αναμένεται να δώσει ώθηση σε τομείς όπως η βιομηχανική αυτοματοποίηση, η υγειονομική περίθαλψη και τα αυτόνομα οχήματα (Kaftantzis, Kogias & Patrikakis, 2024).

Η ενεργειακή αποδοτικότητα και η βιωσιμότητα θα αποτελέσουν επίσης καίριας σημασίας προτεραιότητες στη μελλοντική ανάπτυξη των IoT συστημάτων. Η ζήτηση για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας θα ενισχύσει την έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ενεργειακής συγκομιδής (energy harvesting) από περιβαλλοντικές

πηγές όπως το φως, η θερμότητα και οι δονήσεις (Modarress Fathi, Ansari & Ansari, 2022). Επιπλέον, η ανάπτυξη επαναστατικών μπαταριών με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και τα έξυπνα πρωτόκολλα επικοινωνίας που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας, θα συμβάλουν στην περαιτέρω επέκταση και βιωσιμότητα των IoT εφαρμογών, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές και υποδομές δύσκολης πρόσβασης.

Εξίσου σημαντική είναι η ενίσχυση των μέτρων κυβερνοασφάλειας στα IoT συστήματα. Η αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών συνεπάγεται και αύξηση των πιθανών σημείων ευπάθειας. Στο πλαίσιο αυτό, οι μελλοντικές IoT αρχιτεκτονικές θα ενσωματώνουν εξελιγμένα μοντέλα ασφαλείας όπως το Zero Trust Architecture, την αποκεντρωμένη ταυτοποίηση μέσω τεχνολογιών blockchain και τη χρήση hardware-based security modules για την προστασία δεδομένων και την αυθεντικοποίηση των συσκευών (Liu et al., 2024).

Η ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων και η ενσωμάτωση IoT σε κρίσιμες υποδομές θα αποτελέσουν έναν από τους σημαντικότερους τομείς εφαρμογής στο μέλλον (Kaftantzis, Kogias & Patrikakis, 2024). Συστήματα παρακολούθησης κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, έξυπνη διαχείριση ενέργειας και υδάτινων πόρων, καθώς και προηγμένα δίκτυα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και του περιβάλλοντος, θα ενισχύσουν την ποιότητα ζωής στις αστικές περιοχές και θα προάγουν τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη.

Τέλος, αναμένεται σημαντική πρόοδος στις IoT εφαρμογές στον τομέα της υγείας. Οι φορητές συσκευές υγείας και οι εμφυτεύσιμοι αισθητήρες θα παρέχουν συνεχή παρακολούθηση της φυσιολογικής κατάστασης των ασθενών, επιτρέποντας την έγκαιρη διάγνωση και την προσωποποιημένη ιατρική φροντίδα. Οι έξυπνες συσκευές θα ενσωματώνουν AI-driven αναλυτικά εργαλεία, συμβάλλοντας στην πρόβλεψη κρίσεων υγείας και στη βελτιστοποίηση των θεραπευτικών πρωτοκόλλων.

2. Κατανάλωση Ενέργειας στις IoT Συσκευές

Η εξέλιξη των τεχνολογιών (IoT) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και διάθεση εκατομμυρίων συσκευών που συλλέγουν, επεξεργάζονται και αποστέλλουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Aslam, et al., 2020). Παράλληλα, οι αυξημένες ανάγκες για συνεχή και αυτόνομη λειτουργία των IoT συσκευών έχουν αναδείξει την κατανάλωση ενέργειας ως έναν από τους πλέον κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχία και βιωσιμότητα των λύσεων αυτών.

Η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζει άμεσα:

- **Τη διάρκεια ζωής της συσκευής** (ιδιαίτερα σε φορητές ή απομακρυσμένες εφαρμογές όπου η φόρτιση ή αντικατάσταση της μπαταρίας είναι δύσκολη ή αδύνατη).
- **Το κόστος λειτουργίας** (σε περιβάλλοντα με εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους).
- **Την αξιοπιστία και απόδοση του συστήματος**, ειδικά σε κρίσιμες εφαρμογές (π.χ. στην υγεία ή στην ασφάλεια).

Η ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικά συστήματα καθιστά επιτακτική τη μελέτη και εφαρμογή στρατηγικών που στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, χωρίς όμως να θυσιάζεται η ποιότητα υπηρεσίας ή τα επίπεδα ασφάλειας και αξιοπιστίας.

INTERNET OF THINGS



Εικόνα 5 Μέθοδοι Κατανάλωσης Ενέργειας IoT

Η διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης στα IoT συστήματα δεν περιορίζεται μόνο στο επίπεδο του υλικού, αλλά επεκτείνεται και στο λογισμικό, τις δικτυακές αρχιτεκτονικές και τις στρατηγικές διαχείρισης δεδομένων. Η επιλογή αποδοτικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, ο προγραμματισμός ενεργειακά ευαίσθητων αλγορίθμων, καθώς και η χρήση τεχνικών συμπίεσης και φιλτραρίσματος δεδομένων, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την παράταση της αυτονομίας των συσκευών.

Παράλληλα, η τεχνολογία Edge και Fog Computing συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, μετατοπίζοντας την επεξεργασία δεδομένων πιο κοντά στην πηγή παραγωγής τους. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η ανάγκη για μακρινές μεταδόσεις προς κεντρικούς διακομιστές και κατά συνέπεια εξοικονομείται πολύτιμη ενέργεια. Ειδικά σε εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης ή σε απομακρυσμένα περιβάλλοντα, η τοπική επεξεργασία δεδομένων μπορεί να αποτελέσει τον πιο αποτελεσματικό δρόμο προς τη βιώσιμη λειτουργία.

Η έρευνα και ανάπτυξη νέων τύπων ενεργειακών πηγών και τεχνικών συλλογής ενέργειας, όπως η χρήση ηλιακής ενέργειας, της θερμοηλεκτρικής ενέργειας ή της ενέργειας από την κίνηση, προσφέρουν επιπλέον προοπτικές για τη δημιουργία αυτόνομων IoT κόμβων. Έτσι, ενισχύεται η μακροχρόνια βιωσιμότητα των συστημάτων χωρίς την ανάγκη για συχνές συντηρήσεις ή αντικαταστάσεις μπαταριών, κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο σε δυσπρόσιτες ή απαιτητικές συνθήκες.

Συμπερασματικά, η διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας στο IoT αποτελεί έναν πολυδιάστατο στόχο που συνδέεται άρρηκτα με τη συνολική απόδοση και επιτυχία των συστημάτων. Ο συνδυασμός βελτιωμένου σχεδιασμού συσκευών, έξυπνης διαχείρισης δεδομένων και τοπικής επεξεργασίας δημιουργεί το θεμέλιο για ενεργειακά αποδοτικές και αξιόπιστες εφαρμογές που θα ανταποκριθούν στις αυξημένες ανάγκες των επόμενων ετών.

2.1 Βασικές Αρχές Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Η ενεργειακή αποδοτικότητα στις συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχημένη υιοθέτηση και ανάπτυξη των σχετικών τεχνολογιών (Al-Obaidi, et al., 2022). Καθώς εξαπλώνεται σε πλήθος εφαρμογών, από τη βιομηχανία και τη γεωργία, έως την υγειονομική περίθαλψη και τις έξυπνες πόλεις, αυξάνεται η ανάγκη για συσκευές που μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα, για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα, καταναλώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια.

Η απαίτηση αυτή δεν πηγάζει μόνο από την επιθυμία για μείωση του λειτουργικού κόστους ή την αύξηση της διάρκειας ζωής των συσκευών, αλλά και από την ανάγκη επίτευξης βιώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων. Η εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές συνδέεται στενά με την προσπάθεια περιορισμού του ανθρακικού αποτυπώματος των τεχνολογικών εφαρμογών και της γενικότερης μείωσης της κατανάλωσης φυσικών πόρων.

Έξυπνες συσκευές ενσωματωμένες με αξιόπιστα συστήματα ενέργειας αποτελούν κρίσιμο βήμα προς την ανάπτυξη ενός ανθεκτικού, ασφαλούς και βιώσιμου δικτύου ενεργειακής παροχής (Ahmed et al., 2021). Αυτή η ενσωμάτωση καλύπτει όλα τα συστατικά της παραγωγής, διανομής και μεταφοράς ενέργειας, καθώς και της

κατανάλωσης. Η χρήση έξυπνων συσκευών επιτρέπει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σχετικά με τη χρήση και τα πρότυπα ενέργειας, καθιστώντας δυνατή τη βελτιστοποίηση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας.

Η διαχείριση ενέργειας επικεντρώνεται στη διασφάλιση της αποδοτικής παραγωγής και διανομής ενέργειας. Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας αποτελούν βασικό στοιχείο της παραγωγής, και η διαχείριση ενέργειας περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και συντήρησής τους, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Mishra, et al., 2021). Επιπλέον, στόχος είναι η διασφάλιση της αξιόπιστης και αδιάλειπτης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών διανομής για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών.

Ένα κρίσιμο στοιχείο της διαχείρισης ενέργειας είναι η προώθηση της παραγωγής καθαρής ενέργειας. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής και να προωθήσει τη βιωσιμότητα.

2.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανάλωση Ενέργειας

Η υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών στις IoT συσκευές αποτελεί παράγοντα μιας πολυεπίπεδης προσέγγισης, που περιλαμβάνει τη σχεδίαση του υλικού, την ανάπτυξη αποδοτικού λογισμικού, την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και τη διαμόρφωση αποδοτικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας και δικτυακής διαχείρισης.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα μιας IoT συσκευής ξεκινάει από τη θεμελιώδη αρχιτεκτονική και τις τεχνολογικές επιλογές του υλικού της. Οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές, οι μονάδες αποθήκευσης, τα κυκλώματα διαχείρισης ισχύος και οι αισθητήρες οφείλουν να είναι σχεδιασμένοι ώστε να καταναλώνουν τη μικρότερη δυνατή ποσότητα ενέργειας, χωρίς να θυσιάζεται η υπολογιστική ισχύς ή η λειτουργικότητα.

Η σύγχρονη τάση οδηγεί στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συστήματος, τα οποία ενσωματώνουν πολλαπλές λειτουργίες σε ένα ενιαίο, συμπαγές και ενεργειακά αποδοτικό σύστημα (Habibullah, et al., 2024). Οι επεξεργαστές χαμηλής,

παρέχουν υψηλές επιδόσεις με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ειδικά σε καταστάσεις αναμονής.

Παράλληλα, η επιλογή αισθητήρων και μονάδων επικοινωνίας που λειτουργούν σε χαμηλή ισχύ (π.χ. αισθητήρες με δυνατότητα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ανάλογα με την ανάγκη μέτρησης) συντελεί στη συνολική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής.

Η κατανάλωση ενέργειας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αυτό ελέγχεται μέσω λογισμικού (Faïd et al., 2021). Ο σχεδιασμός του λογισμικού που εκτελείται στις IoT συσκευές παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων.

Σημαντικές αρχές στη διαχείριση ενέργειας μέσω λογισμικού περιλαμβάνουν:

- **Ορθολογική διαχείριση των καταστάσεων λειτουργίας**, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων που επιτρέπουν στο σύστημα να τίθεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης όταν δεν εκτελεί κρίσιμες εργασίες.
- **Ελαχιστοποίηση της ανάγκης επεξεργασίας δεδομένων**, μετατοπίζοντας μέρος της επεξεργασίας σε τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο (Edge Computing), μειώνοντας έτσι τις ανάγκες επικοινωνίας.
- **Δυναμική προσαρμογή της συχνότητας λειτουργίας και της τάσης**, η οποία επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζει την κατανάλωσή του στις απαιτήσεις φόρτου σε πραγματικό χρόνο.

Η ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων και η υιοθέτηση ελαφριών πρωτοκόλλων επικοινωνίας ενισχύουν περαιτέρω τη δυνατότητα λειτουργίας των συσκευών με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

Η ενσωμάτωση μηχανισμών συλλογής ενέργειας προσφέρει στις IoT συσκευές τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα για μεγάλα χρονικά διαστήματα ή και επ' αόριστον (Μπουρίκης, 2025), χωρίς την ανάγκη εξωτερικής τροφοδοσίας ή συχνής αντικατάστασης μπαταριών.

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- **Ηλιακή ενέργεια**, ιδιαίτερα χρήσιμη σε εξωτερικές εφαρμογές (π.χ. αισθητήρες περιβαλλοντικής παρακολούθησης).

- **Θερμική ενέργεια**, εκμεταλλευόμενη θερμοηλεκτρικά φαινόμενα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα ή σε εφαρμογές wearable.
- **Μηχανική ενέργεια**, μέσω συστημάτων που συλλέγουν ενέργεια από κραδασμούς ή κινήσεις (π.χ. πιεζοηλεκτρικά υλικά).
- **Ραδιοσυχνότητες**, που επιτρέπουν τη συλλογή ενέργειας από ραδιοκύματα στο περιβάλλον.

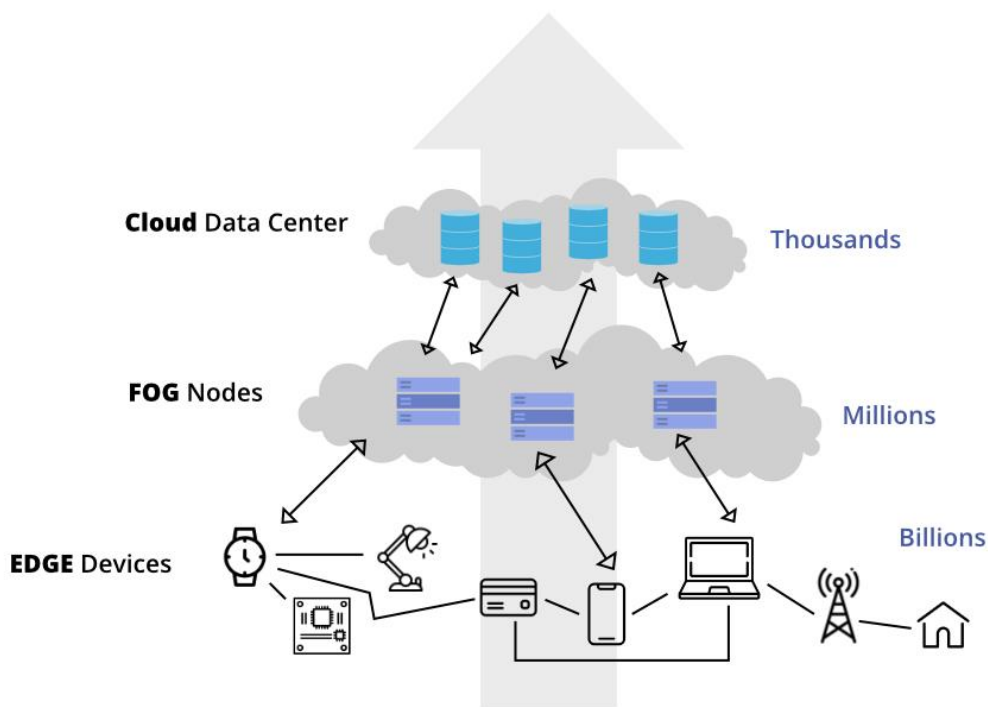
Η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας σε συστήματα όπως super capacitors ή προηγμένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες επιτρέπει τη συνεχή και αξιόπιστη παροχή ισχύος στις συσκευές.

Η επικοινωνία των IoT συσκευών με δίκτυα και άλλες συσκευές αποτελεί, συνήθως, έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας σε ένα σύστημα IoT. Η βελτιστοποίηση αυτής της επικοινωνίας έχει κρίσιμη σημασία για τη συνολική ενεργειακή απόδοση.

Οι βασικές αρχές που διέπουν τη σχεδίαση αποδοτικών επικοινωνιακών συστημάτων είναι:

- **Επιλογή κατάλληλων πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλής ισχύος**, όπως τα Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN, τα οποία έχουν σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές όπου η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί προτεραιότητα.
- **Μείωση της συχνότητας μετάδοσης δεδομένων**, είτε με την αποθήκευση και αποστολή δεδομένων σε πακέτα είτε με την αποστολή μόνο κρίσιμων δεδομένων.
- **Edge Computing και Fog Computing**, όπου η ανάλυση και η λήψη αποφάσεων πραγματοποιούνται τοπικά, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για συχνή επικοινωνία με κεντρικούς servers ή το cloud.
- **Δομές δικτύου τύπου Mesh**, που επιτρέπουν τη διαμοίραση του ενεργειακού φόρτου επικοινωνίας σε πολλαπλές συσκευές, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του δικτύου συνολικά.

Η σωστή αρχιτεκτονική του δικτύου, σε συνδυασμό με τη στρατηγική τοποθέτηση των κόμβων και την αποδοτική διαχείριση του εύρους ζώνης, συνεισφέρει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας.



Εικόνα 6 Edge και Fog Computing

Στις IoT εφαρμογές που βασίζονται σε αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων, η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να επιτευχθεί μέσω στρατηγικών ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των αισθητήρων, μεθόδων συμπίεσης δεδομένων, και αλγορίθμων που μειώνουν τη συχνότητα δειγματοληψίας χωρίς να επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων.

Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνικών ανίχνευσης συμβάντων, όπου οι αισθητήρες ενεργοποιούνται μόνο όταν εντοπίζουν μία μεταβολή ή ένα συμβάν που αξίζει να καταγραφεί, περιορίζει τη σπατάλη ενέργειας που προκύπτει από τη συνεχή δειγματοληψία και μετάδοση.

2.3 Τεχνολογίες και Στρατηγικές Εξοικονόμησης Ενέργειας

Η εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές IoT αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις, καθώς οι συσκευές αυτές σχεδιάζονται για να λειτουργούν με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους. Ειδικά όταν οι IoT συσκευές στηρίζονται σε

μπαταρίες ή άλλες αυτόνομες πηγές ενέργειας, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση μακροχρόνιας αυτονομίας.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται οι κύριες στρατηγικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση ενέργειας σε τέτοιες συσκευές, χωρίζοντας την ανάλυση σε δύο βασικούς τομείς: τη βελτιστοποίηση του hardware και τη βελτιστοποίηση του λογισμικού.

Η βελτιστοποίηση του hardware επικεντρώνεται στον σχεδιασμό συσκευών που χρησιμοποιούν εξαρτήματα χαμηλής κατανάλωσης, όπως ενεργειακά αποδοτικούς μικροελεγκτές, αισθητήρες με λειτουργία sleep mode, και ασύρματες μονάδες επικοινωνίας που ελαχιστοποιούν την ενεργοβόρα μεταφορά δεδομένων. Η επιλογή ενεργειακά αποδοτικών αρχιτεκτονικών και η ανάπτυξη ειδικών κυκλωμάτων για ελαχιστοποίηση της διαρροής ρεύματος αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία αυτής της στρατηγικής. Παράλληλα, η βελτιστοποίηση του λογισμικού στοχεύει στον έλεγχο και περιορισμό των ενεργειακά απαιτητικών διεργασιών μέσω της ανάπτυξης έξυπνων αλγορίθμων.

Η διαχείριση ενεργειακών καταστάσεων, η προσαρμοστική ενεργοποίηση υποσυστημάτων μόνο όταν απαιτείται, και η χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας ειδικά σχεδιασμένων για χαμηλή κατανάλωση, όπως τα Bluetooth Low Energy (BLE) και LoRaWAN, αποτελούν μεθόδους που μεγιστοποιούν την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Επιπλέον, η περιοδική εναλλαγή μεταξύ ενεργών και ανενεργών καταστάσεων και η τοπική προ επεξεργασία δεδομένων στο άκρο του δικτύου (Edge Computing) περιορίζουν την ανάγκη για συνεχή επικοινωνία με απομακρυσμένους διακομιστές, συμβάλλοντας έτσι στη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Η ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει hardware και software τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, καθίσταται αναγκαία για τη δημιουργία IoT λύσεων που είναι ενεργειακά βιώσιμες, αξιόπιστες και προσαρμοσμένες στις απαιτήσεις της αγοράς για χαμηλό κόστος και υψηλή απόδοση.

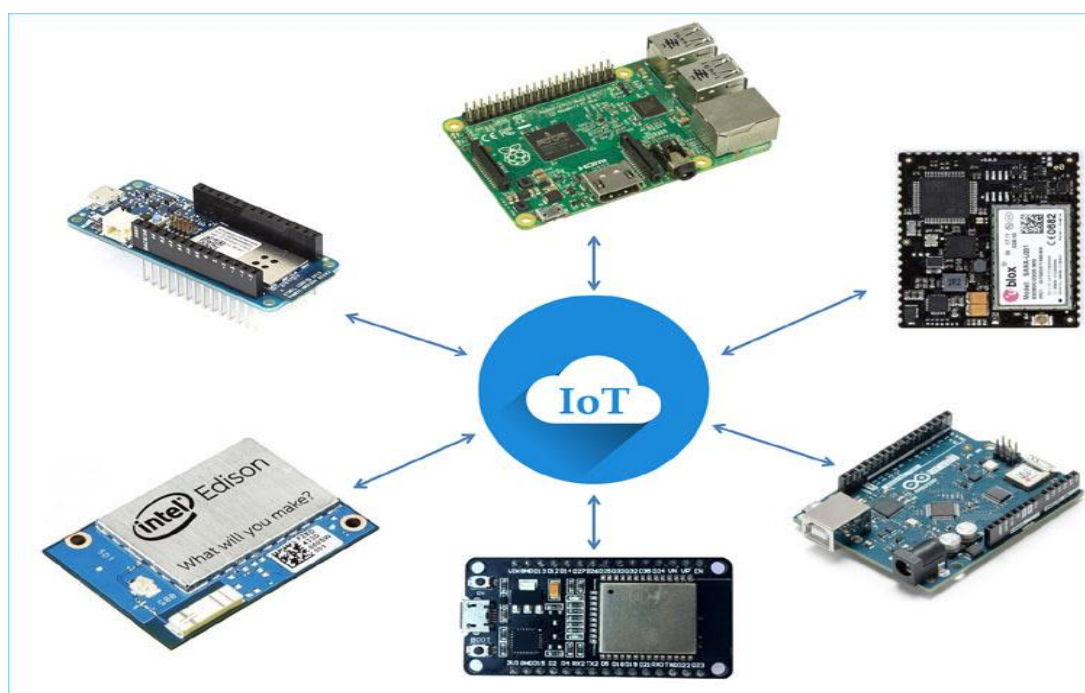
2.3.1 Βελτιστοποίηση hardware για χαμηλή κατανάλωση

Η βελτιστοποίηση του hardware αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στις IoT συσκευές. Οι στρατηγικές στο επίπεδο

του hardware περιλαμβάνουν την επιλογή ενεργειακά αποδοτικών μικροελεγκτών, αισθητήρων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας, καθώς και την ενσωμάτωση τεχνολογιών ενεργειακής συλλογής.

Οι μικροελεγκτές (MCUs) αποτελούν τη βασική μονάδα επεξεργασίας για κάθε IoT συσκευή και είναι υπεύθυνοι για τις περισσότερες υπολογιστικές εργασίες. Για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, η επιλογή μικροελεγκτών με χαμηλή κατανάλωση είναι καθοριστική. Παραδείγματος χάρη, οι μικροελεγκτές ARM Cortex-M ή ESP32 είναι σχεδιασμένοι για εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας και παρέχουν δυνατότητες όπως sleep modes ή deep sleep modes που περιορίζουν την κατανάλωση ενέργειας όταν η συσκευή δεν εκτελεί κάποια εργασία.

Επιπλέον, η χρήση ενεργειακά αποδοτικών αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας. Οι αισθητήρες όπως ο DHT11 ή BME280 καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χωρίς να επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων.

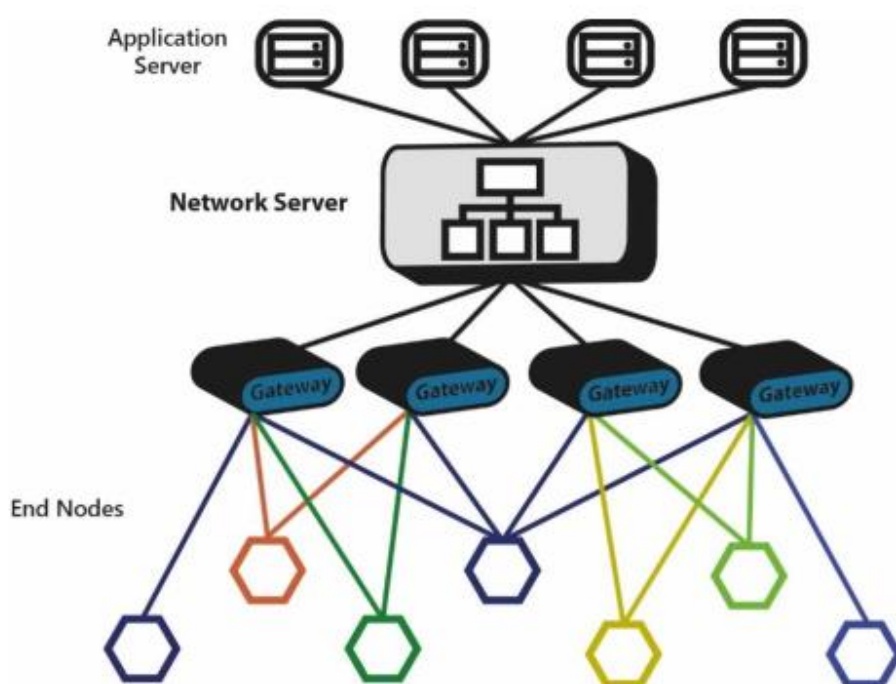


Εικόνα 7 IoT Hardware

Η επικοινωνία αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας στις IoT συσκευές. Ως εκ τούτου, η επιλογή κατάλληλων πρωτοκόλλων επικοινωνίας μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το Bluetooth Low Energy

(BLE), το ZigBee και το LoRaWAN είναι μερικά από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα που προσφέρουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ενώ διατηρούν την αποτελεσματικότητα στην επικοινωνία.

Το LoRaWAN, (Al-Sammak, et al., 2025) για παράδειγμα, επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις (έως και 15 χιλιόμετρα) με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες επικοινωνίας εξασφαλίζουν ότι οι IoT συσκευές μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με περιορισμένη ανάγκη για ανανέωση της ενέργειας τους.



Εικόνα 8 Τοπολογία δικτύου LoRa WAN

Οι τεχνολογίες ενεργειακής συλλογής παρέχουν μια επαναστατική λύση για την επίλυση του προβλήματος της εξάντλησης των μπαταριών σε IoT συσκευές. Η συλλογή ενέργειας από πηγές όπως το φως, οι κραδασμοί ή η θερμότητα επιτρέπει στις συσκευές IoT να λειτουργούν αυτόνομα χωρίς την ανάγκη συχνής αντικατάστασης της μπαταρίας.

Οι τεχνολογίες ενεργειακής συλλογής, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες ή τα συστήματα που εκμεταλλεύονται τους κραδασμούς, χρησιμοποιούνται ήδη σε εφαρμογές IoT, όπως τα ασύρματα αισθητήρια δίκτυα σε απομακρυσμένες περιοχές.

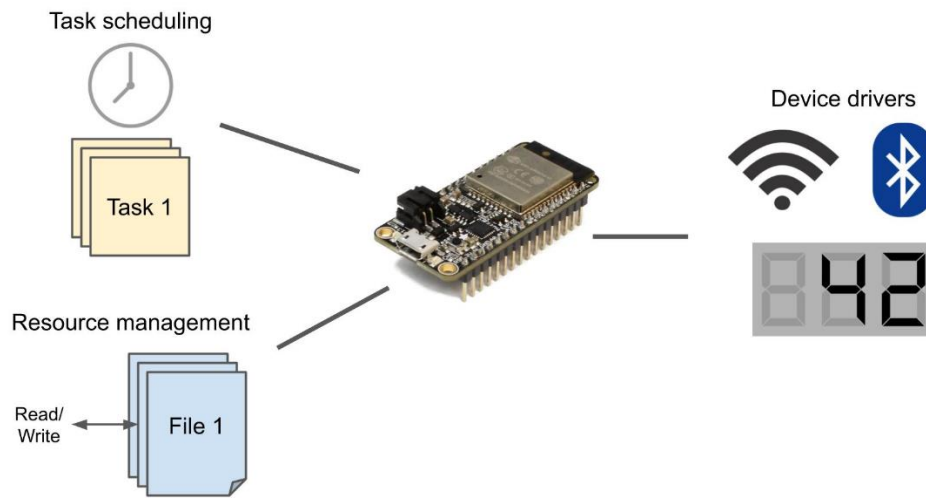
2.3.2 Βελτιστοποίηση λογισμικού για διαχείριση της κατανάλωσης

Η διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης στο επίπεδο του λογισμικού είναι εξίσου σημαντική για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των συσκευών IoT. Οι στρατηγικές λογισμικού περιλαμβάνουν την αποτελεσματική διαχείριση της κατάστασης λειτουργίας της συσκευής, τον έλεγχο της κατανάλωσης μέσω της επεξεργασίας δεδομένων, καθώς και τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας δεδομένων (Ευθυμίου, 2024).

Η βασική στρατηγική για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι η σωστή διαχείριση της κατάστασης λειτουργίας του μικροελεγκτή. Ο προγραμματισμός για την αλλαγή καταστάσεων, όπως sleep και deep sleep modes, είναι απαραίτητος για την εξοικονόμηση ενέργειας όταν η συσκευή δεν εκτελεί εργασίες ή όταν δεν απαιτείται η επικοινωνία (Μπουλογεώργος & Τσαμπουνάρης, 2022).

Οι σύγχρονοι μικροελεγκτές υποστηρίζουν διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, και μέσω της χρήσης Real-Time Operating Systems (RTOS), όπως το Free RTOS, μπορούν να προγραμματίσουν τις εργασίες σε τέτοια χρονικά διαστήματα ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας.

Real-Time Operating System (RTOS)



Εικόνα 9 Real-Time Operating System

Η επικοινωνία δεδομένων είναι μια από τις πιο απαιτητικές διαδικασίες από πλευράς ενέργειας (Κίικιλας, 2025). Για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, χρησιμοποιούνται στρατηγικές όπως η "event-driven" επικοινωνία, όπου η συσκευή αποστέλλει δεδομένα μόνο όταν είναι απαραίτητο, αντί να στέλνει συνεχώς δεδομένα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

Η συμπίεση δεδομένων προτού τα μεταδώσει μπορεί επίσης να μειώσει τη διάρκεια και τη συχνότητα της επικοινωνίας, εξασφαλίζοντας έτσι χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η ενσωμάτωση τεχνικών ασφαλείας χωρίς υπερβολική κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης σημαντική. Αλγόριθμοι κρυπτογράφησης όπως το Elliptic Curve Cryptography (ECC) επιτρέπουν τη διασφάλιση της επικοινωνίας χωρίς να επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση της συσκευής.

Η εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές IoT είναι θεμελιώδης για την επιτυχή ανάπτυξη και εφαρμογή τους, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου οι πηγές ενέργειας είναι περιορισμένες. Η συνδυασμένη βελτιστοποίηση τόσο του hardware όσο και του λογισμικού επιτρέπει την παράταση της διάρκειας ζωής των συσκευών και τη μείωση του κόστους συντήρησης. Οι στρατηγικές που συζητήθηκαν, όπως η χρήση μικροελεγκτών χαμηλής κατανάλωσης, η χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως το

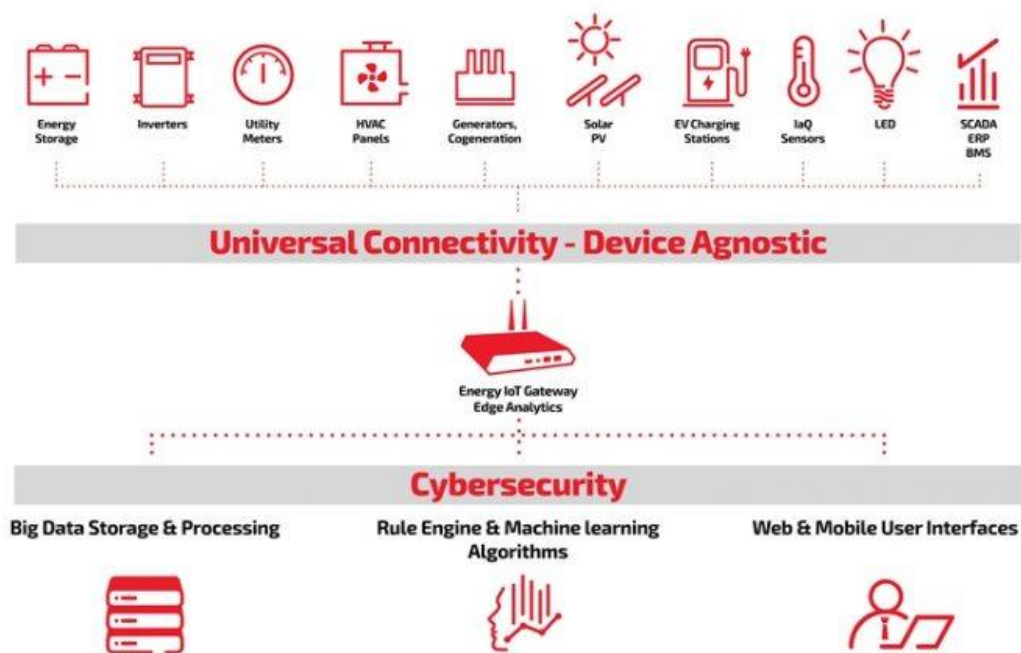
LoRaWAN, η ενεργειακή συλλογή και η βελτιστοποίηση του λογισμικού, συνιστούν τα θεμέλια για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών IoT συσκευών.



Εικόνα 10 Τεχνολογίες IoT έξυπνου σπιτιού

3. Χαμηλού Κόστους Λύσεις για Βελτίωση Ενεργειακής Απόδοσης

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί βασικό στόχο της τεχνολογικής εξέλιξης στο πεδίο του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Καθώς οι έξυπνες συσκευές εξαπλώνονται με ραγδαίους ρυθμούς σε όλους τους τομείς όπου η ανάγκη για οικονομικά βιώσιμες και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στις χαμηλού κόστους τεχνολογικές προσεγγίσεις που συμβάλλουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα των IoT συστημάτων. Αναλύονται σε βάθος οι μπαταρίες και ο σχεδιασμός μικρών διαστάσεων, οι οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, τα αποδοτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, και οι σύγχρονες μέθοδοι τοπικής επεξεργασίας δεδομένων (Edge Computing).



Εικόνα 11 IoT Βελτίωση Ενεργειακής Απόδοσης

Οι σύγχρονες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης σε κάθε επίπεδο λειτουργίας ενός IoT συστήματος. Η επιλογή

κατάλληλων μπαταριών, με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και παρατεταμένο κύκλο ζωής, αποτελεί στρατηγικό παράγοντα για την αύξηση της αυτονομίας των συσκευών. Επιπλέον, η ανάπτυξη μικρών και ελαφριών συσκευών συμβάλλει όχι μόνο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης αλλά και στη μείωση του κόστους παραγωγής και συντήρησης.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπου καινοτόμες λύσεις, όπως οι υπερπυκνωτές και οι νέες γενιές μπαταριών λιθίου, προσφέρουν δυνατότητες ταχύτερης φόρτισης και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής. Τα αποδοτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το LoRaWAN, το Zigbee και το Bluetooth Low Energy (BLE), επιτρέπουν στις συσκευές να επικοινωνούν με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και ασφάλειας.

Η τοπική επεξεργασία δεδομένων μέσω Edge Computing έρχεται να συμπληρώσει αυτές τις προσπάθειες, μειώνοντας δραστικά την ανάγκη για συνεχή αποστολή μεγάλων όγκων δεδομένων στο cloud. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζεται η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τη μετάδοση, ενώ επιτυγχάνεται ταχύτερη απόκριση και βελτιωμένη λειτουργικότητα των συστημάτων. Οι μέθοδοι αυτές αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο για τη δημιουργία ευφών, ανθεκτικών και βιώσιμων IoT υποδομών, που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες των χρηστών και του περιβάλλοντος.

3.1 Μπαταρίες και περιορισμός των διατάσεων

Η μπαταρία είναι ο πυρήνας κάθε φορητής ή αυτόνομης IoT συσκευής (Manyika et al., 2015). Η επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μειώσει δραστικά τόσο την κατανάλωση όσο και το κόστος λειτουργίας μιας συσκευής. Οι μπαταρίες δεν αποτελούν μόνο πηγή ενέργειας αλλά συνδέονται άμεσα με την απόδοση, την αξιοπιστία και το χρόνο ζωής των IoT μονάδων.

Η κατάλληλη μπαταρία μπορεί να μειώσει δραστικά τόσο την κατανάλωση ενέργειας όσο και το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης της συσκευής. Δεν θεωρείται απλώς για ένα εξάρτημα παροχής ρεύματος, αλλά για έναν στρατηγικό παράγοντα που επηρεάζει τις επιδόσεις, την απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος, την ανθεκτικότητα της συσκευής και, τελικά, την εμπειρία του τελικού χρήστη.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατηγορίες μπαταριών στις IoT εφαρμογές είναι:

- **Li-Ion (Λιθίου-Ιόντων):** Διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα, επιτρέποντας μακρά διάρκεια χρήσης ανά φόρτιση. Επιπλέον, υποστηρίζουν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, κάνοντάς τις ιδανικές για συσκευές με συχνή χρήση. Ωστόσο, παρουσιάζουν ευαισθησία σε απότομες μεταβολές θερμοκρασίας, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- **Li-Po (Λιθίου-Πολυμερούς):** Παρόμοιες με τις Li-Ion ως προς την ενεργειακή απόδοση, αλλά πλεονεκτούν στο σχεδιασμό, χάρη στο εύκαμπτο και λεπτό τους περίβλημα. Προσφέρουν μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιασμό μικρών και ελαφριών συσκευών, γεγονός που τις καθιστά δημοφιλείς σε wearables και μικροσυσκευές.
- **NiMH (Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου):** Αν και είναι λιγότερο ενεργειακά αποδοτικές και έχουν υψηλότερο ποσοστό αυτοεκφόρτισης, είναι οικονομικότερες και περιβαλλοντικά πιο φιλικές. Προτείνονται για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης όπου το κόστος έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από την απόδοση.
- **LiFePO₄ (Φωσφορικού Λιθίου):** Ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες, προσφέρουν υψηλά επίπεδα ασφάλειας και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από άλλους τύπους. Είναι κατάλληλες για απαιτητικά ή απομακρυσμένα περιβάλλοντα, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή εξωτερικές εφαρμογές.

Οι σύγχρονες ερευνητικές προσπάθειες προσανατολίζονται προς τις λεγόμενες solid-state μπαταρίες, οι οποίες αντικαθιστούν το υγρό ηλεκτρολύτη με στερεό, αυξάνοντας την ασφάλεια και μειώνοντας τις απώλειες. Ο περιορισμός των διαστάσεων της συσκευής οδηγεί άμεσα σε:

- Μείωση της απαιτούμενης ενέργειας λειτουργίας.
- Ενσωμάτωση μικρότερων μπαταριών χωρίς απώλεια απόδοσης.
- Μείωση του κόστους παραγωγής.

Συνολικά, η επιλογή μπαταρίας δεν είναι απλώς θέμα κόστους αλλά στρατηγική απόφαση που επηρεάζει την απόδοση, την ασφάλεια, τη βιωσιμότητα και τη συνολική εμπειρία χρήσης μιας IoT συσκευής.

3.2 Οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες μπαταριών

Η μείωση του κόστους αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη IoT συστημάτων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για συσκευές μεγάλης κλίμακας, τοποθετημένες σε δυσπρόσιτες ή απομακρυσμένες περιοχές. Οι οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες μπαταριών δεν επικεντρώνονται μόνο στο χαμηλό αρχικό κόστος, αλλά εξετάζουν και την ενεργειακή απόδοση, τη διάρκεια ζωής, τις απαιτήσεις συντήρησης και την ευκολία ενσωμάτωσης σε υπάρχουσες υποδομές.

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων IoT. Ειδικά όταν εξετάζονται εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή απομακρυσμένων περιοχών, η μείωση του κόστους σε συνδυασμό με την αξιοπιστία και τη μακροχρόνια λειτουργία των συσκευών καθίσταται πρωταρχικός στόχος (Κατωμέρη, 2025). Οι οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες μπαταριών καλούνται να καλύψουν αυτό το κενό, προσφέροντας βιώσιμες λύσεις χωρίς να θυσιάζουν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

Πολλές λύσεις επικεντρώνονται στην εξέλιξη και αναβάθμιση υπάρχοντων τύπων μπαταριών ώστε να καταστούν πιο αποδοτικές οικονομικά. Για παράδειγμα, οι νικελίου-μεταλλικού υδριδίου μπαταρίες επωφελούνται από βελτιώσεις στη χημική τους σύσταση που μειώνουν τον ρυθμό αυτόεκφόρτισης και αυξάνουν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (Ελευθεριάδου, 2023). Παράλληλα, ιόντων λιθίου έχουν πλέον καταστεί περισσότερο προσιτές λόγω της μαζικής παραγωγής και της ευρείας χρήσης τους σε άλλους τομείς (π.χ. ηλεκτρικά οχήματα, κινητά τηλέφωνα).

Σημαντικό ρόλο στην οικονομική αποδοτικότητα διαδραματίζουν και οι επαναφορτιζόμενες λύσεις, οι οποίες, παρότι κοστίζουν περισσότερο κατά την αρχική αγορά, οδηγούν σε σημαντική μείωση του κόστους μακροπρόθεσμα. Οι μπαταρίες LiFePO₄, για παράδειγμα, έχουν εξαιρετικά υψηλό αριθμό κύκλων ζωής, είναι ανθεκτικές σε ακραίες θερμοκρασίες και έχουν αυξημένη ασφάλεια, καθιστώντας τις ιδανικές για συστήματα που απαιτούν σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία για πολλά χρόνια.

Ένας ακόμα πολλά υποσχόμενος τομέας είναι αυτός της συγκομιδής ενέργειας, δηλαδή της χρήσης τεχνολογιών που αξιοποιούν την ενέργεια από το περιβάλλον για τη

φόρτιση ή την υποστήριξη λειτουργίας των συσκευών (Ali et al., 2025). Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι μπαταρίες λειτουργούν υποστηρικτικά, αποθηκεύοντας την ενέργεια που συλλέγεται για χρήση όταν η εξωτερική πηγή απουσιάζει. Τέτοιες λύσεις μειώνουν αισθητά την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις ή συντηρήσεις και είναι ιδανικές για εγκαταστάσεις με περιορισμένη πρόσβαση.

Τέλος, για εφαρμογές μικρής διάρκειας ζωής ή εφήμερες εγκαταστάσεις, οι μπαταρίες μίας χρήσης εξακολουθούν να αποτελούν βιώσιμη επιλογή. Οι αλκαλικές ή ψευδαργύρου-άνθρακα μπαταρίες, για παράδειγμα, προσφέρουν ικανοποιητική απόδοση με ελάχιστο κόστος, καθιστώντας τις κατάλληλες για ετικέτες RFID, αισθητήρες που τοποθετούνται προσωρινά ή άλλες εφαρμογές περιορισμένης χρήσης.

Η επιλογή οικονομικά αποδοτικής τεχνολογίας μπαταρίας εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής και από το ισοζύγιο μεταξύ κόστους, απόδοσης, διάρκειας ζωής και απαιτήσεων συντήρησης. Οι πιο αποτελεσματικές λύσεις προκύπτουν από την κατάλληλη ισορροπία όλων αυτών των παραμέτρων, με στόχο τη δημιουργία συστημάτων που είναι τόσο ενεργειακά αποδοτικά όσο και οικονομικά βιώσιμα.

3.2.1 Λιθίου-Ιόντων (Li-Ion)

Οι μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων (Li-Ion) αποτελούν σήμερα μια από τις πιο εξελιγμένες και διαδεδομένες μορφές επαναφορτιζόμενων μπαταριών, χάρη στην υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα, το μικρό βάρος και τη μεγάλη διάρκεια ζωής. Η λειτουργία τους βασίζεται στη μετακίνηση ιόντων λιθίου μεταξύ της καθόδου και της ανόδου μέσω ενός οργανικού ηλεκτρολύτη. Κατά τη φόρτιση, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από την κάθοδο (συνήθως από υλικά όπως το LiCoO_2) προς την άνοδο (συνήθως γραφίτης), ενώ κατά την εκφόρτιση η κίνηση αυτή αντιστρέφεται, αποδίδοντας ηλεκτρική ενέργεια στο εξωτερικό κύκλωμα. Ο σχεδιασμός τους περιλαμβάνει επίσης ένα διαχωριστικό (separator) για την αποτροπή βραχυκυκλωμάτων και την ασφαλή ροή ιόντων.

Παρά τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα, όπως η απουσία φαινομένου μνήμης και η χαμηλή αυτοεκφόρτιση, οι μπαταρίες Li-Ion απαιτούν ιδιαίτερη διαχείριση για την αποφυγή υπερφόρτισης, υπερθέρμανσης ή εκφόρτισης κάτω από το επιτρεπτό όριο. Ειδικά κυκλώματα (Battery Management Systems) φροντίζουν για την ασφαλή λειτουργία τους, ενώ η έρευνα εστιάζει πλέον στην ανάπτυξη στερεών ηλεκτρολυτών

και νέων καθοδικών υλικών για αύξηση της αποδοτικότητας και της ασφάλειας. Η ευρεία χρήση τους σε καταναλωτικά ηλεκτρονικά, ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας επιβεβαιώνει τον ρόλο τους ως βασική τεχνολογία στην ενεργειακή μετάβαση και την κινητικότητα του μέλλοντος.

3.2.2 Λιθίου-Πολυμερούς (Li-Po)

Οι μπαταρίες Λιθίου-Πολυμερούς (Li-Po) αποτελούν μια παραλλαγή των μπαταριών Λιθίου-Ιόντων, με βασική διαφορά τη χρήση στερεού ή ημιστερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη αντί για υγρό. Η αρχή λειτουργίας τους παραμένει ίδια, καθώς βασίζεται στη μετακίνηση ιόντων λιθίου μεταξύ ανόδου και καθόδου κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Ωστόσο, η χρήση πολυμερούς ηλεκτρολύτη επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό, καθώς οι μπαταρίες Li-Po μπορούν να πάρουν λεπτότερες και ελαστικότερες μορφές, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές με περιορισμένο χώρο ή ιδιαίτερες απαιτήσεις σχήματος.

Παρόλο που προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και καλύτερη προσαρμοστικότητα στο σχεδιασμό συσκευών, οι Li-Po είναι γενικά πιο ευαίσθητες στη μηχανική καταπόνηση και παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο αστοχίας σε περίπτωση κακής χρήσης ή φυσικής διάτρησης. Απαιτούν αυστηρή διαχείριση φόρτισης μέσω BMS (Battery Management System), ενώ η διάρκεια ζωής τους είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή των παραδοσιακών Li-Ion. Οι Li-Po χρησιμοποιούνται ευρέως σε drones, smartphones, wearables, καθώς και σε μοντέλα RC και φορητές συσκευές όπου το βάρος και το σχήμα είναι κρίσιμοι παράγοντες.

3.2.3 Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου (NiMH)

Οι μπαταρίες Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου (NiMH) αποτελούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που βασίζονται στην αντίδραση μεταξύ υδρογόνου (αποθηκευμένου σε μορφή μεταλλικού υδριδίου) και υδροξειδίου του νικελίου. Η άνοδος αποτελείται από

κράματα μεταλλικού υδριδίου (MH) που απορροφούν υδρογόνο κατά τη φόρτιση, ενώ η κάθοδος βασίζεται στο Ni(OH)_2 . Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης περιλαμβάνει την αναστρέψιμη αποθήκευση και απελευθέρωση υδρογόνου, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μπαταρίες NiMH αντικατέστησαν σε μεγάλο βαθμό τις παλαιότερες τεχνολογίες NiCd (Νικελίου-Καδμίου), λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας και της απουσίας τοξικών βαρέων μετάλλων όπως το κάδμιο.

Παρόλο που οι NiMH υστερούν σε σχέση με τις Li-Ion και Li-Po όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα και το βάρος, παραμένουν ιδιαίτερα αξιόπιστες και ασφαλείς. Χαρακτηρίζονται από μακροχρόνια σταθερότητα, αντοχή σε κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης και μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Παρουσιάζουν όμως υψηλότερο ποσοστό αυτοεκφόρτισης και μεγαλύτερη πτώση τάσης κατά την αποφόρτιση. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες, φωτογραφικές μηχανές, ασύρματα τηλέφωνα, υβριδικά οχήματα και συσκευές που απαιτούν μέτρια ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλη αξιοπιστία.

3.2.4 LiFePO_4 (Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου)

Οι μπαταρίες LiFePO_4 (Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου) αποτελούν μια υποκατηγορία των μπαταριών Λιθίου-Ιόντων και είναι γνωστές για την εξαιρετική θερμική και χημική τους σταθερότητα. Η κάθοδος τους βασίζεται στο φωσφορικό λίθιο σίδηρο (LiFePO_4), ενώ η άνοδος συνήθως χρησιμοποιεί άνθρακα (π.χ. γραφίτη). Η συγκεκριμένη χημική σύνθεση προσφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια σε σχέση με άλλες τεχνολογίες λιθίου, καθώς δεν είναι επιρρεπής σε θερμική διαφυγή ή ανάφλεξη, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές όπου η ασφάλεια είναι κρίσιμη. Επιπλέον, έχουν πολύ σταθερή ηλεκτροχημική συμπεριφορά και μικρότερη υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των μπαταριών LiFePO_4 είναι η εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής τους, με 2.000 έως και 5.000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης υπό κατάλληλες συνθήκες, χωρίς σημαντική απώλεια απόδοσης. Αν και η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι μικρότερη από άλλες Li-Ion τεχνολογίες, η σταθερή τάση εκφόρτισης (περίπου 3,2V ανά στοιχείο) και η δυνατότητα για παροχή υψηλών ρευμάτων τις

καθιστούν ιδανικές για εφαρμογές υψηλής απαιτητικότητας, όπως ηλεκτρικά οχήματα, αποθήκευση ενέργειας από φωτοβολταϊκά και UPS συστήματα.

Ωστόσο, λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας, οι μπαταρίες LiFePO_4 δεν είναι η ιδανική επιλογή για συσκευές μικρού μεγέθους ή φορητές εφαρμογές όπου ο όγκος και το βάρος αποτελούν κρίσιμους παράγοντες. Παρ' όλα αυτά, η μη τοξική φύση των υλικών τους και η ανακυκλωσιμότητα τους τις καθιστούν πιο φιλικές προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες χημείες λιθίου. Στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της ανάγκης για ασφαλή, βιώσιμη αποθήκευση ενέργειας, οι μπαταρίες LiFePO_4 κερδίζουν συνεχώς έδαφος, ιδιαίτερα σε στατικές εφαρμογές και "πράσινες" τεχνολογίες.

3.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Η μετάδοση και λήψη δεδομένων απαιτούν υψηλή κατανάλωση ισχύος, ιδιαίτερα σε συσκευές που λειτουργούν απομακρυσμένα ή αυτόνομα. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας είναι κρίσιμη ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης, εμβέλειας, ρυθμού μετάδοσης και αξιοπιστίας. Τα πρωτόκολλα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος χωρίς να θυσιάζουν την απόδοση ή τη σταθερότητα του δικτύου.

Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών αποτελεί βασικό πυλώνα στη λειτουργία των IoT συστημάτων, ωστόσο είναι επίσης και μια από τις πιο ενεργοβόρες λειτουργίες. Η ανάγκη για συνεχές ή περιοδικό διαμοιρασμό δεδομένων, σε συνδυασμό με τους περιορισμένους ενεργειακούς πόρους που διαθέτουν οι περισσότερες IoT συσκευές, καθιστά την επιλογή κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας καθοριστικής σημασίας (Διδασκάλου, 2021). Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία της μπαταρίας ή της αποθήκευσης ενέργειας, αλλά και από τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού (Σαλάι, 2025). Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για το IoT περιβάλλον επιδιώκουν να ελαχιστοποιήσουν την ενεργειακή κατανάλωση χωρίς να θυσιάζουν την αξιοπιστία, την ταχύτητα μετάδοσης ή την ασφάλεια των δεδομένων.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων είναι η δυνατότητα «ύπνου» ή αναστολής λειτουργίας της συσκευής όταν δεν απαιτείται μετάδοση. Αυτό επιτρέπει στις συσκευές να παραμένουν ανενεργές για μεγάλα χρονικά διαστήματα, καταναλώνοντας ελάχιστη ενέργεια, και να ενεργοποιούνται μόνο όταν είναι απαραίτητο για να συλλέγουν ή να αποσταλούν δεδομένα (Kozłowski & Sosnowski, 2019). Τεχνικές όπως η μετάδοση με γεγονότα ή η ασύρματη επικοινωνία με ελάχιστες ρουτίνες επιτρέπουν σε πολλές IoT πλατφόρμες να λειτουργούν για μήνες ή ακόμη και χρόνια με μία μόνο φόρτιση ή με χρήση μικρών φωτοβολταϊκών πηγών ενέργειας.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή πρωτοκόλλου επικοινωνίας δεν είναι μια απομονωμένη απόφαση, αλλά συνδέεται άρρηκτα με τον σχεδιασμό της συνολικής αρχιτεκτονικής του IoT συστήματος. Παράγοντες όπως η συχνότητα επικοινωνίας, ο όγκος δεδομένων, η τοποθεσία, οι δυνατότητες ενεργειακής αναπλήρωσης, η απαίτηση για ασφάλεια ή κρυπτογράφηση, και η μακροχρόνια αξιοπιστία επηρεάζουν καθοριστικά την τελική επιλογή. Οι πιο αποτελεσματικές λύσεις είναι εκείνες που επιτυγχάνουν ισορροπία ανάμεσα στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στις απαιτήσεις της εφαρμογής, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα μακρά διάρκεια ζωής, λειτουργική σταθερότητα και περιορισμένο κόστος συντήρησης.

3.3.1 BLE (Bluetooth Low Energy)

Το Bluetooth Low Energy (BLE) αποτελεί μια εξειδικευμένη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένη για εφαρμογές όπου η εξοικονόμηση ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας. Εισήχθη με το πρότυπο Bluetooth 4.0 και διαφέρει σημαντικά από το κλασικό Bluetooth, προσφέροντας τη δυνατότητα για χαμηλής ισχύος λειτουργία, χωρίς να θυσιάζει τη βασική ικανότητα μετάδοσης δεδομένων. Λειτουργεί στην ίδια συχνότητα (2.4 GHz), αλλά με διαφορετικό τρόπο επικοινωνίας – βασισμένο σε σύντομα, σποραδικά πακέτα – γεγονός που μειώνει δραστικά την κατανάλωση ενέργειας. Επιτρέπει σε μικροσυσκευές να παραμένουν λειτουργικές για μεγάλα χρονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας μια μικρή μπαταρία, κάτι που είναι καθοριστικό για τις εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT).

Το BLE είναι εξαιρετικά δημοφιλές σε φορητές συσκευές (wearables), όπως smartwatches και fitness trackers, αλλά και σε αισθητήρες υγείας, περιβαλλοντικούς αισθητήρες, έξυπνες κλειδαριές, φωτισμό και οικιακό αυτοματισμό. Χάρη στην ικανότητά του να παρέχει σύντομες, ασφαλείς συνδέσεις με ελάχιστη κατανάλωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιοδική ή εφάπαξ μετάδοση δεδομένων, κάτι που εξυπηρετεί εφαρμογές όπου δεν απαιτείται συνεχής ροή πληροφορίας. Παρά την περιορισμένη του εμβέλεια (συνήθως έως 50 μέτρα σε εσωτερικούς χώρους), το BLE παραμένει ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συσκευών.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του BLE είναι η υποστήριξη λειτουργιών χαμηλής ισχύος, όπως η δυνατότητα ύπνου (sleep mode), η γρήγορη επανασύνδεση και η αναμονή με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας. Ολόκληρη η αρχιτεκτονική του BLE είναι προσανατολισμένη στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, επιτρέποντας στις συσκευές να «ξυπνούν» μόνο όταν είναι απαραίτητο να αποστείλουν ή να λάβουν δεδομένα. Επιπλέον, η εξέλιξη των εκδόσεων του BLE, όπως το Bluetooth 5 και 5.2, έχει προσθέσει βελτιώσεις στην εμβέλεια, τον ρυθμό μετάδοσης και την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών συσκευών, διατηρώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα σε πολύ υψηλό επίπεδο. Ως εκ τούτου, το BLE αποτελεί σήμερα έναν από τους βασικότερους πυλώνες επικοινωνίας για έξυπνες, αυτόνομες και φορητές συσκευές στο οικοσύστημα του IoT.

3.3.2 Zigbee

Το Zigbee είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας σχεδιασμένο ειδικά για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, χαμηλού κόστους και μικρού εύρους μετάδοσης, όπως αυτές που συναντώνται σε δίκτυα αισθητήρων και συστήματα αυτοματισμού κατοικιών. Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί σε συχνότητες 2.4 GHz, 868 MHz ή 915 MHz, ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Το Zigbee έχει τη δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος (meshnetwork), το οποίο προσφέρει αυξημένη αξιοπιστία και ευελιξία στη δικτύωση, καθώς κάθε κόμβος μπορεί να αναμεταδώσει τα δεδομένα, επιτρέποντας την επικοινωνία ακόμη και σε απομακρυσμένα ή δύσβατα σημεία.

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του Zigbee επιτυγχάνεται μέσω του τρόπου λειτουργίας των συσκευών, που παραμένουν σε κατάσταση ύπνου για μεγάλα διαστήματα και ενεργοποιούνται μόνο όταν απαιτείται μετάδοση ή λήψη δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου οι συσκευές τροφοδοτούνται από μικρές μπαταρίες ή αυτόνομες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του Zigbee είναι τέτοια ώστε να υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ μεγάλου αριθμού κόμβων, κάτι που καθιστά τη τεχνολογία ιδανική για έξυπνα σπίτια, βιομηχανικές εφαρμογές και περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Σημαντικό πλεονέκτημα του Zigbee αποτελεί η ισορροπία μεταξύ εμβέλειας, ρυθμού δεδομένων και ενεργειακής αποδοτικότητας. Παρόλο που ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι σχετικά χαμηλός (μέχρι 250 kbps), επαρκεί για την πλειονότητα των IoT εφαρμογών που απαιτούν περιοδική ή σποραδική αποστολή μικρών πακέτων πληροφορίας. Η υποστήριξη πολλών τυποποιημένων προφίλ (homeautomation, smart energy, κ.λπ.) διευκολύνει την ενσωμάτωση του Zigbee σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συσκευές. Χάρη σε αυτά τα χαρακτηριστικά, το Zigbee παραμένει μία από τις πλέον αξιόπιστες και ενεργειακά αποδοτικές επιλογές για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή, ασφαλή και οικονομική επικοινωνία.

3.3.3 Z-Wave

Το Z-Wave είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας ειδικά σχεδιασμένο για εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού και έξυπνων συσκευών, όπως φωτιστικά, θερμοστάτες, αισθητήρες κίνησης και συστήματα ασφαλείας. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες που λειτουργούν στη συμφόρηση των 2.4 GHz, το Z-Wave λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες υπο-1 GHz συχνότητες (όπως 868.42 MHz στην Ευρώπη), μειώνοντας έτσι τις παρεμβολές και βελτιώνοντας τη σταθερότητα της σύνδεσης. Το πρωτόκολλο επιτρέπει τη δημιουργία πλέγματος (meshnetwork), όπου κάθε κόμβος μπορεί να επαναμεταδώσει τα δεδομένα, επεκτείνοντας την εμβέλεια και εξασφαλίζοντας επικοινωνία ακόμη και σε περιπτώσεις τοπικών παρεμβολών ή απώλειας σήματος.

Το Z-Wave δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην απλότητα χρήσης και στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι συσκευές που βασίζονται στο Z-Wave είναι σχεδιασμένες ώστε να

λειτουργούν με μικρές μπαταρίες για παρατεταμένες χρονικές περιόδους — συχνά για έως και 2-5 χρόνια χωρίς αντικατάσταση μπαταρίας. Η απόκριση των συσκευών είναι ταχύτερη, με ελάχιστη καθυστέρηση κατά την αποστολή εντολών, ενώ υποστηρίζεται και ασφαλής επικοινωνία με χρήση κρυπτογράφησης AES-128. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το Z-Wave ιδιαίτερα κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου απαιτείται αξιοπιστία, ενεργειακή αποδοτικότητα και ευκολία εγκατάστασης.

Αν και το Z-Wave διαθέτει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (μέχρι περίπου 100 kbps), είναι απόλυτα επαρκές για τις απαιτήσεις των περισσότερων IoT εφαρμογών που βασίζονται στην αποστολή σύντομων εντολών ή σημάτων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η αυστηρή πιστοποίηση συσκευών από τη Z-WaveAlliance, κάτι που διασφαλίζει την διαλειτουργικότητα μεταξύ προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών. Με πάνω από 4.000 συμβατές συσκευές στην αγορά, το Z-Wave έχει καθιερωθεί ως μία από τις πλέον ώριμες και αξιόπιστες επιλογές για ενεργειακά αποδοτική, ασφαλή και μακροχρόνια λειτουργία σε οικιακά και επαγγελματικά IoT περιβάλλοντα.

3.3.4 LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

Το LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας σχεδιασμένο ειδικά για ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN – Low Power Wide Area Networks). Βασίζεται στην τεχνολογία LoRa (Long Range) για τη φυσική μετάδοση και επεκτείνει τις δυνατότητες με ένα ανοικτό πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου. Χάρη στην εξαιρετική εμβέλειά του, το LoRaWAN επιτρέπει την επικοινωνία αισθητήρων και συσκευών σε αποστάσεις που φτάνουν έως και 15–20 χιλιόμετρα σε ανοιχτό πεδίο, καθιστώντας το ιδανικό για απομακρυσμένες περιοχές, αγροτικές εφαρμογές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, επιτρέποντας στις συσκευές να λειτουργούν με μικρές μπαταρίες για πολλά χρόνια (5–10 έτη) χωρίς ανάγκη συντήρησης.

Η αρχιτεκτονική του LoRaWAN βασίζεται σε ασύμμετρη επικοινωνία, με τις συσκευές να στέλνουν δεδομένα περιστασιακά και μόνο όταν χρειάζεται. Αυτό ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος και μειώνει την ανάγκη για συνεχή σύνδεση. Οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν σε διάφορες “τάξεις” (A, B, C) ανάλογα με το προφίλ ενεργειακής

κατανάλωσης και επικοινωνίας που απαιτείται. Η τάξη A είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική, με τις συσκευές να ξυπνούν μόνο όταν στέλνουν δεδομένα, ενώ οι τάξεις B και C επιτρέπουν περισσότερη αλληλεπίδραση σε βάρος της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Αυτή η ευελιξία καθιστά το LoRaWAN ιδιαίτερα προσαρμόσιμο σε διαφορετικές απαιτήσεις εφαρμογών, όπως παρακολούθηση υγρασίας, ποιότητας αέρα, κατανάλωσης ενέργειας ή κατάστασης μηχανημάτων.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του LoRaWAN είναι η δυνατότητα δημιουργίας ιδιωτικών ή δημόσιων δικτύων, γεγονός που μειώνει το κόστος και επιτρέπει την ανεξαρτησία από παραδοσιακούς παρόχους τηλεπικοινωνιών. Επιπλέον, το LoRaWAN προσφέρει βασική ασφάλεια επικοινωνίας μέσω ενσωματωμένης κρυπτογράφησης σε επίπεδο εφαρμογής και δικτύου. Αν και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι περιορισμένος (συνήθως 0.3–50 kbps), το πρωτόκολλο είναι εξαιρετικά αποδοτικό για εφαρμογές που απαιτούν μόνο περιοδική αποστολή μικρών πακέτων. Συνολικά, το LoRaWAN αποτελεί μια κορυφαία επιλογή για μακροχρόνια, ενεργειακά αποδοτική λειτουργία σε κατανεμημένα συστήματα IoT που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις με χαμηλό κόστος.

3.3.5 Sigfox

Το Sigfox είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας σχεδιασμένο ειδικά για δίκτυα χαμηλής ισχύος και ευρείας περιοχής (LPWAN), με έμφαση στην εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την απλότητα λειτουργίας. Λειτουργεί σε ανοιχτές συχνότητες (όπως η βιομηχανική ζώνη 868 MHz στην Ευρώπη) και επιτρέπει τη μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, φτάνοντας έως και 10-50 χιλιόμετρα σε ανοιχτό πεδίο. Η σχεδιάσή του στοχεύει στη μείωση της πολυπλοκότητας των συσκευών, επιτρέποντας την κατασκευή φθηνών και ενεργειακά αποδοτικών αισθητήρων και κόμβων IoT, ιδανικών για εφαρμογές με περιορισμένες απαιτήσεις δεδομένων.

Η λειτουργία του Sigfox βασίζεται σε ένα απλοποιημένο μοντέλο μετάδοσης όπου οι συσκευές στέλνουν πολύ μικρά μηνύματα (συνήθως μέχρι 12 bytes) σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς να απαιτείται συνεχής σύνδεση ή αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την

ενεργειακή κατανάλωση, επιτρέποντας στις συσκευές να λειτουργούν με μπαταρίες για χρόνια, χωρίς ανάγκη συχνής αντικατάστασης ή φόρτισης. Παρά τη χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης (περίπου 100 bps), το Sigfox εξυπηρετεί αποτελεσματικά εφαρμογές όπως μετρητές νερού, παρακολούθηση αποθεμάτων, γεωργικές αισθητήρες και έξυπνους μετρητές ενέργειας.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του Sigfox είναι η υιοθέτηση ενός κεντρικού δικτύου υποδομής, που διευκολύνει την ανάπτυξη και διαχείριση των υπηρεσιών IoT από παρόχους χωρίς την ανάγκη δημιουργίας ιδιωτικών δικτύων. Η ασφάλεια διασφαλίζεται μέσω κρυπτογράφησης δεδομένων και πιστοποίησης των συσκευών. Παρότι το πρωτόκολλο περιορίζει την πολυπλοκότητα και τον όγκο των δεδομένων, η αξιοπιστία και η μεγάλη διάρκεια ζωής των μπαταριών το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα και το χαμηλό κόστος αποτελούν πρωταρχικούς στόχους.

3.3.6 NB-IoT (Narrowband IoT)

Το NB-IoT (Narrowband Internet of Things) αποτελεί μια εξελιγμένη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένη ειδικά για τις ανάγκες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με έμφαση στην υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και την ευρεία κάλυψη. Χρησιμοποιεί στενή ζώνη συχνοτήτων (περίπου 180 kHz), γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικό στην μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Η τεχνολογία NB-IoT βασίζεται σε υφιστάμενες τηλεπικοινωνιακές υποδομές 4G/LTE, επιτρέποντας την ενσωμάτωση IoT συσκευών σε υπάρχοντα δίκτυα με σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης και διαχείρισης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του NB-IoT είναι η εξαιρετική ενεργειακή απόδοση, η οποία επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών όπως το PowerSaving Mode (PSM) και το extendedDiscontinuousReception (eDRX). Αυτές οι λειτουργίες επιτρέπουν στις συσκευές να εισέρχονται σε κατάσταση ύπνου για μεγάλα χρονικά διαστήματα, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση μπαταρίας και επιτρέποντας τη λειτουργία τους για χρόνια με μια μόνο φόρτιση. Επιπλέον, το NB-IoT υποστηρίζει χιλιάδες συσκευές ανά κυψέλη, καθιστώντας το ιδανικό για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές όπως

έξυπνες πόλεις, βιομηχανική παρακολούθηση, και διαχείριση δικτύων κοινής ωφέλειας.

Η αξιοπιστία και η ασφάλεια αποτελούν επίσης σημαντικά χαρακτηριστικά του NB-IoT. Χρησιμοποιώντας τα πρότυπα ασφάλειας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, εξασφαλίζεται η προστασία των δεδομένων από παραβιάσεις και η ακεραιότητα της επικοινωνίας. Επίσης, η ευρεία κάλυψη και η ικανότητα διείσδυσης σε εσωτερικούς χώρους καθιστούν το NB-IoT ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου οι συσκευές βρίσκονται σε δυσπρόσιτα σημεία, όπως υπόγεια, αποθήκες ή υπαίθριες περιοχές με δυσμενείς συνθήκες. Συνολικά, το NB-IoT προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση για ενεργειακά αποδοτική, αξιόπιστη και μακροχρόνια συνδεσιμότητα στον τομέα του IoT.

3.3.7 LTE-M (LTE Cat-M1)

Το LTE-M (Long Term Evolution for Machines), επίσης γνωστό ως LTE Cat-M1, είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που αναπτύχθηκε ειδικά για εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και της μηχανικής επικοινωνίας (M2M). Βασίζεται στο πρότυπο LTE και προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με το NB-IoT, επιτρέποντας ταχύτερη μετάδοση δεδομένων και υποστήριξη πιο απαιτητικών εφαρμογών όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση, η τηλεμετρία και τα wearables. Το LTE-M συνδυάζει υψηλή αξιοπιστία με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το ιδανικό για συσκευές που απαιτούν συνεχή ή συχνή σύνδεση στο δίκτυο με μέτρια έως υψηλή ροή δεδομένων.

Μία από τις βασικές καινοτομίες του LTE-M είναι η δυνατότητα υποστήριξης κινητικότητας σε υψηλές ταχύτητες (π.χ. σε οχήματα) και η υποστήριξη φωνητικών υπηρεσιών μέσω VoLTE (Voiceover LTE). Αυτό το καθιστά κατάλληλο όχι μόνο για σταθερές IoT συσκευές αλλά και για κινητές εφαρμογές που χρειάζονται συνεχή επικοινωνία. Παράλληλα, το LTE-M υιοθετεί τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, όπως το PowerSaving Mode (PSM) και το extendedDiscontinuousReception (eDRX), επιτρέποντας στις συσκευές να παραμένουν σε κατάσταση ύπνου για μεγάλο χρονικό διάστημα και να εξοικονομούν σημαντική ποσότητα ενέργειας, γεγονός που επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών τους.

Το LTE-M προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα όπως μεγαλύτερη εμβέλεια και καλύτερη διείσδυση σε κτίρια σε σύγκριση με τα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη συνδεσιμότητα σε εσωτερικούς χώρους και απομακρυσμένες περιοχές. Επιπλέον, ενσωματώνει προηγμένα μέτρα ασφάλειας και κρυπτογράφησης, διασφαλίζοντας την προστασία των δεδομένων και την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Λόγω των χαρακτηριστικών αυτών, το LTE-M αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση για πολλές εφαρμογές IoT, όπως έξυπνες πόλεις, βιομηχανικό αυτοματισμό, υγειονομική περίθαλψη και διαχείριση στόλων οχημάτων.

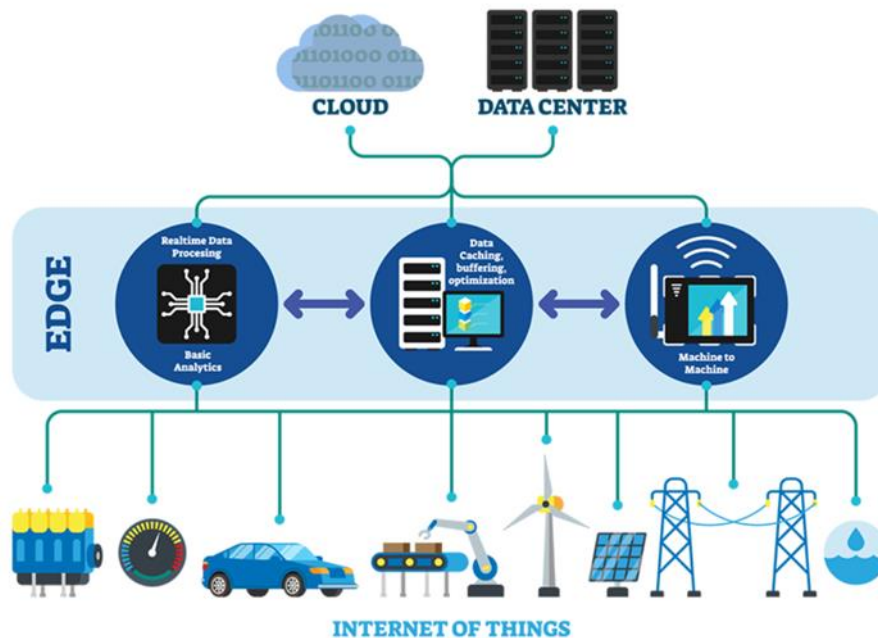
3.4 Edge Computing και τοπική επεξεργασία δεδομένων

Το Edge Computing είναι ένα αρχιτεκτονικό πρότυπο για την κατανομημένη επεξεργασία δεδομένων, στο οποίο η ανάλυση και η λήψη αποφάσεων πραγματοποιούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη φυσική πηγή παραγωγής των δεδομένων, δηλαδή στις ίδιες τις συσκευές ή σε κοντινούς κόμβους (Satyanarayanan, 2017). Σε αντίθεση με τη συμβατική προσέγγιση του cloud computing, όπου όλα τα δεδομένα αποστέλλονται σε απομακρυσμένους κεντρικούς servers για επεξεργασία και αποθήκευση, στο edge computing η πλειοψηφία της υπολογιστικής διαδικασίας μεταφέρεται σε τοπικό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω έξυπνων αισθητήρων με ενσωματωμένη επεξεργαστική ισχύ είτε μέσω ενδιάμεσων συσκευών που συνδυάζουν συλλογή, επεξεργασία και δρομολόγηση δεδομένων (Vo et al., 2022). Η στρατηγική αυτή επιτρέπει την αποκέντρωση των υπολογιστικών φορτίων, μειώνοντας τη συμφόρηση των δικτύων και ενισχύοντας τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της τοπικής επεξεργασίας είναι η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης κατά τη μετάδοση και επεξεργασία των δεδομένων (Vrontis et al., 2021). Σε εφαρμογές όπου οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο, όπως στα αυτόνομα οχήματα, στους αυτοματισμούς παραγωγής, στα έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, ή σε ιατρικές συσκευές παρακολούθησης, ακόμη και μια καθυστέρηση μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες (Alwahedi et al., 2024).

Η δυνατότητα εκτέλεσης αναλύσεων και λήψης άμεσης δράσης σε επίπεδο edge μειώνει την εξάρτηση από την ταχύτητα και αξιοπιστία της σύνδεσης με το cloud (Nain,

Pattanaik & Sharma, 2022). Για παράδειγμα, ένα ρομποτικό σύστημα σε γραμμή παραγωγής μπορεί να ανιχνεύσει άμεσα μια ανωμαλία ή σφάλμα και να διακόψει τη διαδικασία χωρίς την ανάγκη αποστολής δεδομένων και λήψης εντολών από απομακρυσμένο κέντρο ελέγχου.



Εικόνα 12 Αρχιτεκτονική IoT Edge Computing

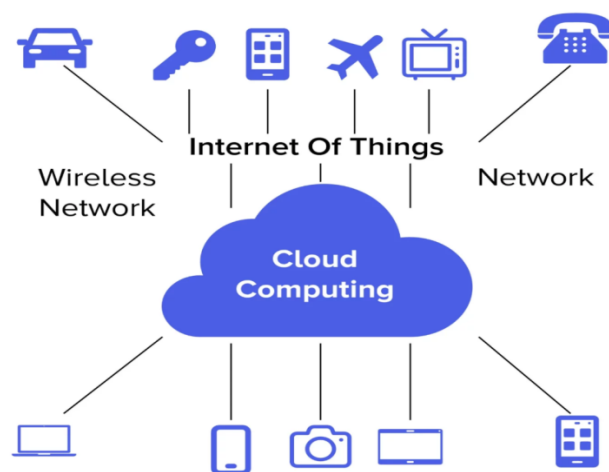
Παράλληλα, το edge computing προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η συνεχής μετάδοση δεδομένων, ειδικά μέσω κυψελοειδών δικτύων ή δορυφορικής σύνδεσης, είναι από τις πιο ενεργοβόρες λειτουργίες για μια IoT συσκευή (Algarni & El-Samie, 2025). Με τη λογική του edge, η συσκευή επεξεργάζεται τα δεδομένα τοπικά και αποστέλλει μόνο χρήσιμα συμπεράσματα ή ειδοποιήσεις, μειώνοντας το συνολικό φόρτο επικοινωνίας (Kelly, 2024). Επιπλέον, πολλές συσκευές υποστηρίζουν "event-driven" λογική, δηλαδή ενεργοποιούνται μόνο όταν εντοπιστεί κάποια κρίσιμη αλλαγή, όπως υπέρβαση ορίων θερμοκρασίας, κίνησης ή υγρασίας (Κωτσάκη, 2024). Αυτό, σε συνδυασμό με τεχνικές όπως η συμπίεση, η συσσώρευση δεδομένων σε πακέτα και τα διαστήματα χαμηλής ισχύος, επιτρέπει εξαιρετική εξοικονόμηση ενέργειας και αυξάνει τη διάρκεια λειτουργίας ακόμα και για χρόνια χωρίς ανάγκη συντήρησης.

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι η βελτιωμένη ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικότητας που προσφέρει το edge computing (Στεφανάκης, 2024). Δεδομένα που

παραμένουν τοπικά, χωρίς να διακινούνται συνεχώς σε δημόσια ή απομακρυσμένα δίκτυα, εκτίθενται λιγότερο σε κινδύνους όπως υποκλοπή, αλλοίωση ή μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν ευαίσθητες πληροφορίες η δυνατότητα να αναλύονται και να φιλτράρονται τοπικά μειώνει σημαντικά το αποτύπωμα των δεδομένων στο cloud και συμβάλλει στη συμμόρφωση με κανονισμούς όπως ο GDPR. Επίσης, πολλές πλατφόρμες edge υποστηρίζουν τοπική κρυπτογράφηση, ελεγχόμενη πρόσβαση και πολιτικές ασφάλειας σε επίπεδο συσκευής.

Επιπρόσθετα, η τοπική επεξεργασία ενισχύει τη λειτουργική αυτονομία των συστημάτων σε συνθήκες αποκοπής από το διαδίκτυο ή σε περιοχές με χαμηλή ή διαλείπουσα συνδεσιμότητα (Li et al., 2024). Σε γεωργικές εγκαταστάσεις, υπόγειες εγκαταστάσεις εξόρυξης, πετρελαϊκές πλατφόρμες ή απομονωμένα νησιά, η αξιοπιστία της δικτυακής σύνδεσης δεν μπορεί να θεωρείται δεδομένη. Το edge computing επιτρέπει στα συστήματα να συνεχίσουν να λειτουργούν, να συλλέγουν δεδομένα, να αναλύουν καταστάσεις και να αντιδρούν κατάλληλα χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κρίσιμο για τη διασφάλιση της επιχειρησιακής συνέχειας και την αποφυγή δαπανηρών διακοπών λειτουργίας.

Το edge computing αναδεικνύεται σε θεμελιώδη παράγοντα για τη βιώσιμη ανάπτυξη των IoT υποδομών, συνδυάζοντας τεχνικά πλεονεκτήματα όπως η χαμηλή καθυστέρηση, η ενεργειακή αποδοτικότητα, η ιδιωτικότητα και η αξιοπιστία (Kashani et al., 2021). Η υιοθέτησή του επιτρέπει τη δημιουργία πιο ευέλικτων και ανθεκτικών συστημάτων, τα οποία ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του σύγχρονου ψηφιακού περιβάλλοντος, εξυπηρετώντας τόσο το επιχειρησιακό συμφέρον όσο και τις αρχές της τεχνολογικής υπευθυνότητας.

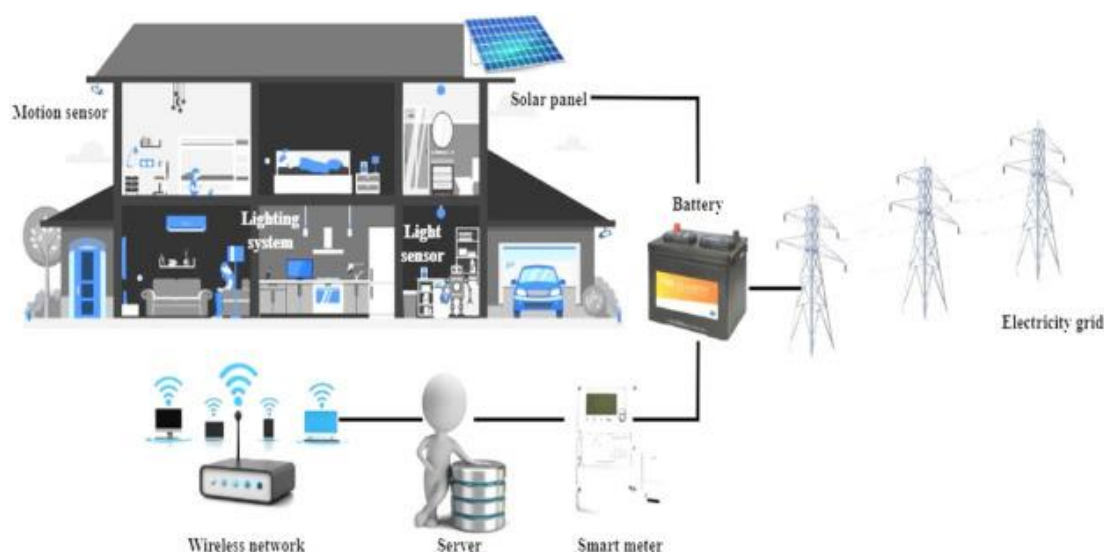


Εικόνα 13 Αρχιτεκτονική IoT Cloud

4. Σύγχρονες Εξελίξεις και Μελλοντικές Τάσεις

Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς, επιφέροντας διαρκώς νέες δυνατότητες, τόσο σε επίπεδο συσκευών όσο και στην ευρύτερη αρχιτεκτονική των συστημάτων. Καθώς οι IoT εφαρμογές επεκτείνονται σε κρίσιμους τομείς, όπως οι έξυπνες πόλεις, η υγειονομική περίθαλψη, η βιομηχανική παραγωγή και η γεωργία ακριβείας, η ανάγκη για συστήματα υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική.

Οι σύγχρονες εξελίξεις εστιάζουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης χωρίς να θυσιάζεται η υπολογιστική ισχύς, η αξιοπιστία ή η ασφάλεια των συσκευών. Οι νεότερες τεχνολογίες περιλαμβάνουν εξελιγμένους μικροελεγκτές χαμηλής ισχύος, αποδοτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, μηχανισμούς συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον, καθώς και τη σταδιακή ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για την προληπτική και προσαρμοστική διαχείριση των πόρων.



Εικόνα 14 Έξυπνη διαχείριση ενέργειας με το IoT

Παράλληλα, οι προκλήσεις που συνδέονται με τη βιωσιμότητα των IoT συστημάτων - όπως η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών, η αδυναμία λειτουργίας σε απομακρυσμένα περιβάλλοντα χωρίς συνεχή πρόσβαση σε πηγή ενέργειας, καθώς και οι απαιτήσεις για ασφάλεια και αυτονομία - οδηγούν την έρευνα στην ανάπτυξη

καινοτόμων λύσεων. Οι εξελίξεις αυτές επιδιώκουν την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων ισχύος σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας, από τη συλλογή δεδομένων έως την αποστολή και επεξεργασία.

Οι πρόσφατες ερευνητικές προσεγγίσεις και τεχνολογικές λύσεις στοχεύουν στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των IoT συσκευών, καθώς και τις μελλοντικές τάσεις που διαμορφώνουν το πεδίο. Σε σύγχρονες μελέτες και πειραματικές εφαρμογές σχετικές με την εξοικονόμηση ενέργειας, συγκριτικές αναλύσεις κόστους και αποδοτικότητας των υλοποιήσεων. Μέσα από την ανάλυση αυτών των θεματικών, επιδιώκεται η κατανόηση των προϋποθέσεων που θα διασφαλίσουν ένα βιώσιμο και αποδοτικό IoT οικοσύστημα στο μέλλον.

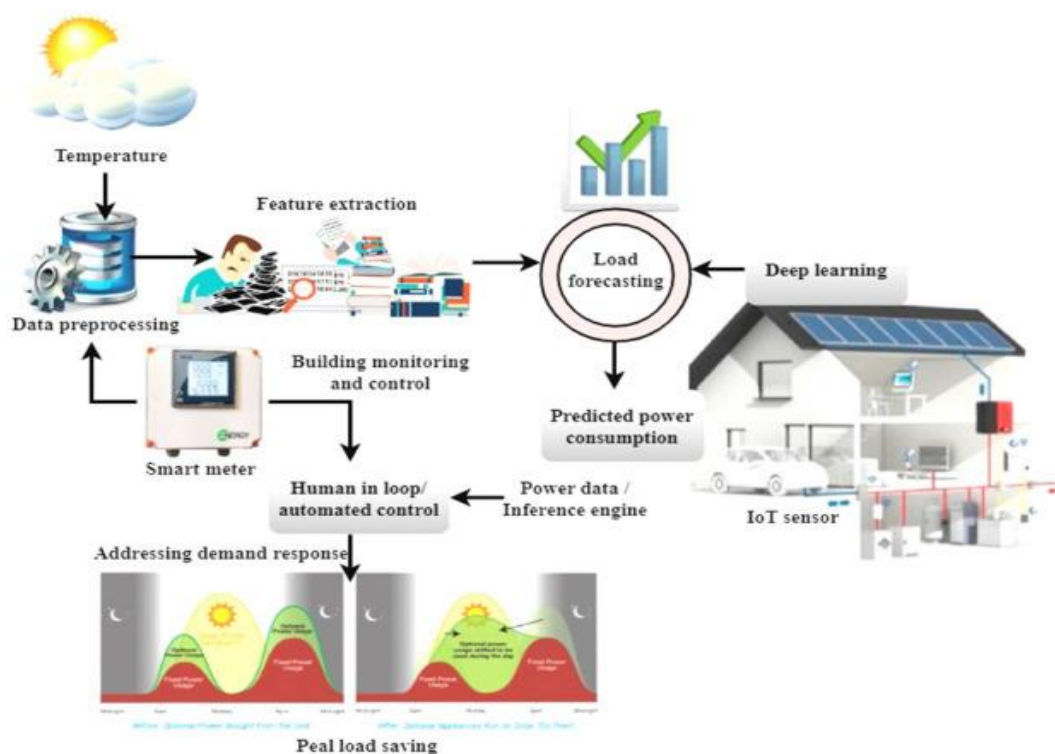
Η στρατηγική ενσωμάτωση τεχνολογιών συλλογής ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά μικρής κλίμακας και οι μηχανισμοί ανάκτησης ενέργειας από την κίνηση ή τη θερμότητα, προσφέρει νέες δυνατότητες για την αυτονομία των συσκευών. Ταυτόχρονα, τα ευφυή αλγοριθμικά μοντέλα διαχείρισης ενέργειας συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης, προσαρμόζοντας δυναμικά τις λειτουργίες των συσκευών ανάλογα με τις διαθέσιμες πηγές και τις ανάγκες επεξεργασίας.

Η έρευνα στην αποδοτικότητα πρωτοκόλλων, όπως το 6LoWPAN, το BLE και το Zigbee Green Power, δείχνει τη σημαντική πρόοδο που έχει συντελεστεί στην κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης της ενέργειας που απαιτείται για την επικοινωνία. Επιπλέον, η εμφάνιση αρχιτεκτονικών που βασίζονται σε Edge και Fog Computing μειώνει την εξάρτηση από απομακρυσμένους διακομιστές, περιορίζοντας έτσι τις απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων και την ενεργειακή κατανάλωση σε ολόκληρο το δίκτυο.

Συνολικά, οι τεχνολογικές καινοτομίες και οι νέες ερευνητικές κατευθύνσεις υποδεικνύουν ότι το μέλλον του IoT δεν βασίζεται μόνο στην αύξηση των δυνατοτήτων των συσκευών, αλλά και στη δυνατότητά τους να λειτουργούν αποδοτικά, με ελάχιστο οικολογικό αποτύπωμα και υψηλό επίπεδο αυτονομίας. Η επιτυχία αυτών των προσπαθειών θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των μελλοντικών IoT οικοσυστημάτων.

4.1 Πρόσφατες έρευνες για ενεργειακή απόδοση στις IoT συσκευές

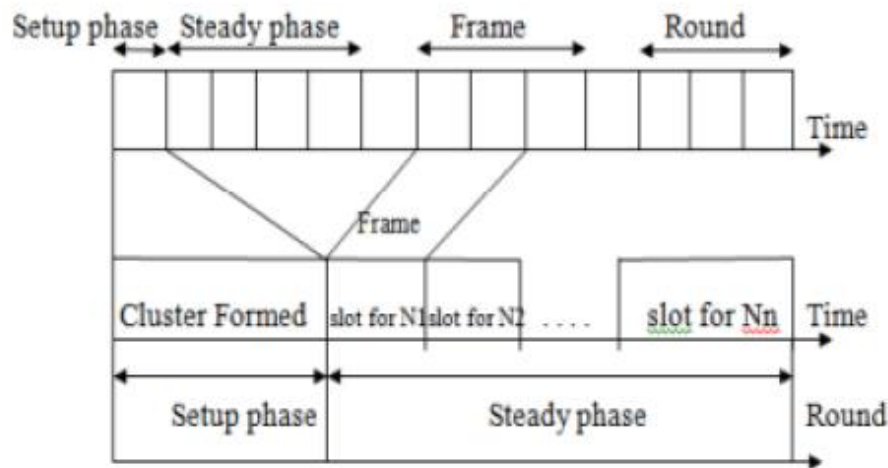
Σε έναν κόσμο όπου οι έξυπνες συσκευές γίνονται αναπόσπαστο μέρος της καθημερινότητάς μας, η ανάγκη για έξυπνη και ενεργειακά αποδοτική επεξεργασία δεδομένων είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Έρευνες προτείνουν (Jiang et al., 2025) μια πρωτοποριακή προσέγγιση για την αποτελεσματική εκτέλεση βαθιών νευρωνικών δικτύων μέσω συνεργασίας μεταξύ συσκευών IoT και edge servers. Με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να θυσιάζεται η ακρίβεια, αναπτύσσεται ένα ευέλικτο μοντέλο DNN με πολλαπλούς κλάδους που επιτρέπει την επιλογή διαφορετικών μονοπατιών επεξεργασίας, ανάλογα με τις δυνατότητες της συσκευής και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η πρόταση συνοδεύεται από μια έξυπνη ιεραρχική μέθοδο βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη τόσο τους υπολογιστικούς όσο και τους επικοινωνιακούς πόρους. Η μετάδοση δεδομένων συμβάλλει στην αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος και σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Πειράματα και εφαρμογή σε πραγματικό πρωτότυπο αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, επιτυγχάνοντας έως και 65% μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σύγκριση με υπάρχουσες τεχνικές.



Εικόνα 15 Σύστημα προγνωστικής διαχείρισης ενέργειας

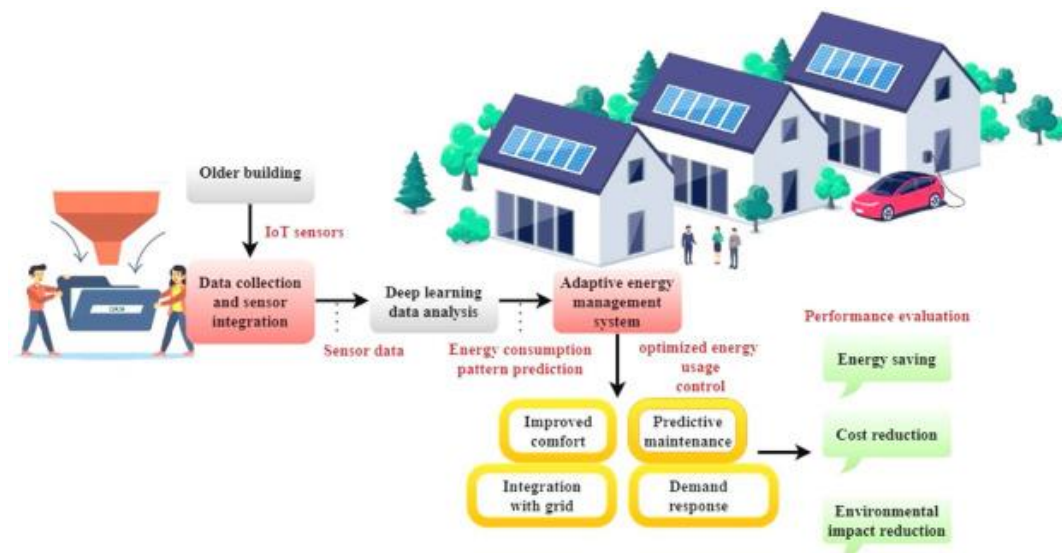
Καθώς οι συσκευές IoT εξελίσσονται ραγδαία προς μικρότερες και ενεργειακά πιο αποδοτικές λύσεις, η ανάγκη για χαμηλής ισχύος κυκλώματα γίνεται επιτακτική. Ορισμένες έρευνες (Jiang et al, 2025) εισάγουν έναν καινοτόμο, αναστρέψιμο πολλαπλασιαστή βασισμένο στην τεχνολογία QCA (Quantum-dot Cellular Automata), σχεδιασμένο ειδικά για να καλύψει τις απαιτήσεις των νανοκλίμακας IoT συστημάτων. Με τη χρήση αναστρέψιμης λογικής και απλών κυψελών quantum-dot, προτείνονται νέες δομές που ενσωματώνονται σε έναν ενεργειακά αποδοτικό πολλαπλασιαστή, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση ισχύος, την καθυστέρηση και τον χώρο που καταλαμβάνεται. Μέσω προσομοιώσεων με το εργαλείο QCADesigner-E, αποδεικνύεται πως ο προτεινόμενος πολλαπλασιαστής ξεπερνά προηγούμενα σχέδια σε απόδοση, επιτυγχάνοντας έως και 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας. Με την ενσωμάτωσή του σε τυπωμένες IoT συσκευές, ενισχύεται η αυτονομία, η ακρίβεια επεξεργασίας και η συνολική απόδοση, καθιστώντας τον ένα βασικό δομικό στοιχείο για την επόμενη γενιά έξυπνων συστημάτων.

Σε ένα περιβάλλον όπου οι δικτυακές υποδομές γίνονται ολοένα και πιο περίπλοκες και αναξιόπιστες, αυτή η εργασία προτείνει έναν προσαρμοστικό μηχανισμό ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων για το IoT που συνδυάζει ελαφριά κρυπτογράφηση, δυναμική διαχείριση κλειδιών και ανίχνευση εισβολών βασισμένη σε ανωμαλίες. Το προτεινόμενο σύστημα (Veeramachaneni, 2025) ενισχύει την ακεραιότητα και την εμπιστευτικότητα των δεδομένων χωρίς να επιβαρύνει σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση, πετυχαίνοντας 28% μείωση στην ενέργεια, 34% αύξηση της διακίνησης δεδομένων και 20% μείωση της καθυστέρησης σε σχέση με υπάρχουσες τεχνικές. Επιπλέον, παρουσιάζει ακρίβεια ανίχνευσης εισβολών έως 97%, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές σε υγειονομική περίθαλψη, έξυπνες πόλεις και βιομηχανικό αυτοματισμό. Το σύστημα αποδεικνύει ισχυρή κλιμάκωση και αποτελεσματικότητα ακόμη και σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό συσκευών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη δημιουργία πιο ασφαλών και βιώσιμων IoT οικοσυστημάτων.



Εικόνα 16 Μηχανισμός ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων για το IoT

Η ενεργειακή αποδοτικότητα των παλαιών κτιρίων αποτελεί κρίσιμο ζητούμενο στη σύγχρονη εποχή της βιωσιμότητας, και η παρούσα μελέτη (Arun et al, 2024) εισάγει μια καινοτόμα προσέγγιση που συνδυάζει τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων με βαθιά μάθηση για την παρακολούθηση και διαχείριση της ενέργειας. Μέσω ενός εξελιγμένου μοντέλου Predictive Energy Modeling (DL-PEM), συλλέγονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με θερμοκρασία, φωτισμό, παρουσία ανθρώπων και χρήση εξοπλισμού, τα οποία αναλύονται για να προβλεφθούν μοτίβα κατανάλωσης και να εφαρμοστούν βέλτιστες στρατηγικές εξοικονόμησης. Η προσέγγιση ενσωματώνεται με φωτοβολταϊκά πάνελ και σύστημα διαχείρισης κατανάλωσης, αξιοποιώντας επίσης αλγορίθμους πρόβλεψης για βελτιστοποίηση της άνεσης, της συντήρησης και της διασύνδεσης με έξυπνα δίκτυα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν την ικανότητα του συστήματος να μειώνει σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση, να βελτιώνει την απόδοση των κτιρίων και να ενισχύει τη βιωσιμότητα, καθιστώντας το κατάλληλο εργαλείο για αναβάθμιση της ενεργειακής συμπεριφοράς ιστορικών και παλαιών κατασκευών.

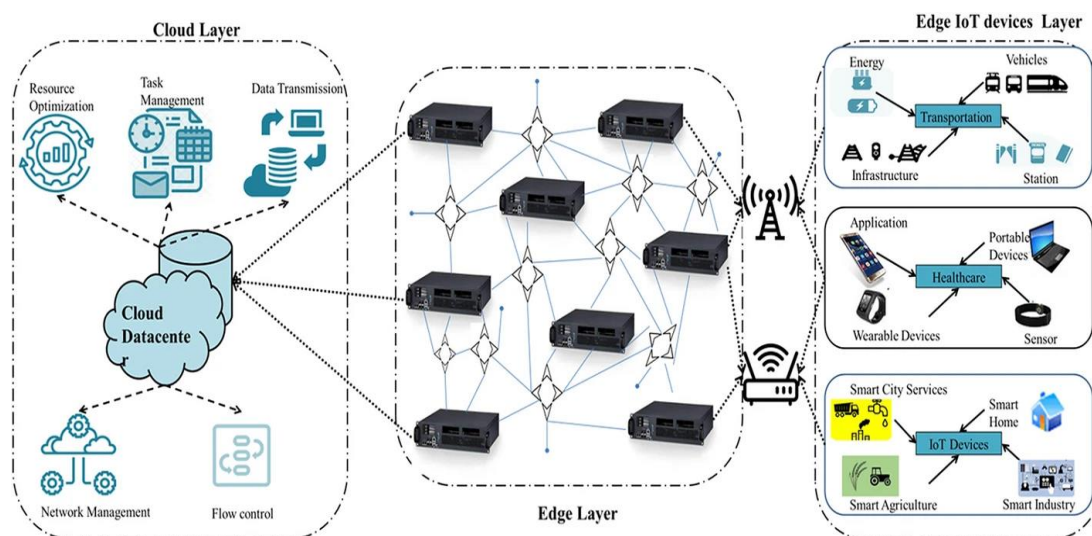


Εικόνα 17 Απεικόνιση του μοντέλου Predictive Energy Modeling

Πρόσφατες έρευνες (Qian, 2025) αναφέρουν τρόπους βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας σε επιταχυντές βαθιάς μάθησης (DL) με βάση FPGA για εφαρμογές IoT, επικεντρώνοντας στη φάση ρύθμισης που αποτελεί κύρια πηγή κατανάλωσης ενέργειας. Αντί να επικεντρώνεται μόνο στη φάση επεξεργασίας, η συγκεκριμένη μελέτη (Qian, 2025) παρουσιάζει τεχνικές βελτιστοποίησης παραμέτρων συχνότητα ρολογιού και συμπίεση, επιτυγχάνοντας μείωση κατά 40 φορές στην απαιτούμενη ενέργεια για ρύθμιση. Παράλληλα, εισάγει την στρατηγική "Idle-Waiting", η οποία, σε συνθήκες συχνών αιτημάτων, διατηρεί το FPGA σε κατάσταση αναμονής αντί να το απενεργοποιεί, εξοικονομώντας ενέργεια αποφεύγοντας συνεχείς επαναρυθμίσεις. Τέλος, προτείνει ένα προσαρμοστικό σύστημα εναλλαγής στρατηγικών για περιπτώσεις ακανόνιστων αιτημάτων, το οποίο βελτιώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του συστήματος, προσφέροντας ένα ευέλικτο και αποδοτικό μοντέλο για μελλοντικές εφαρμογές ενεργειακά βιώσιμου IoT.

Συγκεκριμένες έρευνες παρουσιάζουν ένα καινοτόμο σύστημα διαχείρισης πόρων για ετερογενείς συσκευές IoT, εστιάζοντας στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της επεκτασιμότητας. Το προτεινόμενο σύστημα (Gupta et al., 2024) Multi-Edge-IoT βασίζεται σε μια τριεπίπεδη αρχιτεκτονική και αξιοποιεί τον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης για την επιλογή διαδρομών μετάδοσης, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση. Μέσω εκτενών προσομοιώσεων, το σύστημα επιδεικνύει ανώτερη απόδοση σε σχέση με υπάρχουσες λύσεις,

επιτυγχάνοντας χαμηλότερη καθυστέρηση, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερη αξιοπιστία στη μετάδοση δεδομένων.

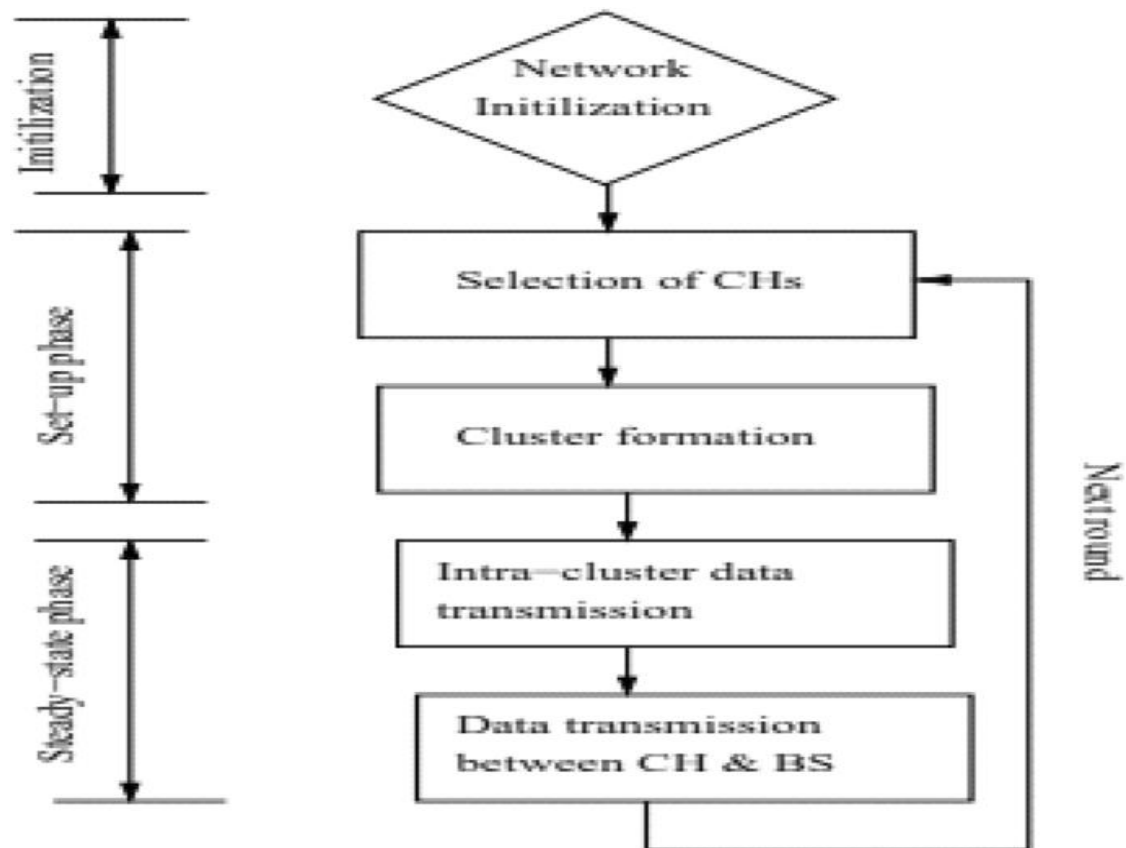


Εικόνα 18 Αρχιτεκτονική δικτύου του συστήματος Edge-IoT

Ορισμένες εργασίες (Fettes et al., 2025) προτείνουν μια προσέγγιση για ενεργειακά αποδοτικές οπτικές δορυφορικές καθόδους στο περιβάλλον του Internet of Things (IoT), χρησιμοποιώντας Deep Reinforcement Learning (DRL) και δεδομένα πρόβλεψης καιρού. Οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς εξυπηρετούν απομακρυσμένες IoT συσκευές, αλλά οι οπτικές επικοινωνίες επηρεάζονται έντονα από τη νεφοκάλυψη. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν έναν αλγόριθμο βασισμένο σε Deep Q-Networks (DQN), που αποφασίζει αν θα χρησιμοποιηθεί μια επικοινωνιακή ευκαιρία με βάση μετεωρολογικά δεδομένα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας και να διατηρηθεί υψηλός λόγος επιτυχούς παράδοσης πακέτων. Συγκριτικά με απλούστερες προσεγγίσεις βασισμένες σε κατώφλια νεφοκάλυψης, η DRL μέθοδος επιτυγχάνει καλύτερη ενεργειακή απόδοση χωρίς σημαντική απώλεια στην απόδοση παράδοσης. Η μελέτη (Fettes et al., 2025) περιλαμβάνει και δοκιμές με πραγματικά ιστορικά δεδομένα καιρού, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα και την ευελιξία της προτεινόμενης λύσης ακόμα και σε μη εκπαιδευμένα σενάρια.

Περισσότερες σύγχρονες έρευνες (Khan et al., 2024) επικεντρώνονται στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας σε δίκτυα Internet of Things (IoT), προτείνοντας ένα υβριδικό πρωτόκολλο βασισμένο στο LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy). Η παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου μέσω της έξυπνης επιλογής

αρχηγών ομάδων, λαμβάνοντας υπόψη την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και την απόστασή τους από τον σταθμό βάσης. Η ερευνητική προσέγγιση περιλαμβάνει δύο ενισχυμένες εκδοχές του LEACH, τα LEACH-CE και BSLEACH-CE, οι οποίες εφαρμόζονται με τη βοήθεια προσομοιώσεων στο περιβάλλον NS-2. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αύξηση του αριθμού των ενεργών κόμβων και βελτιωμένη σταθερότητα του δικτύου. Παράλληλα, επισημαίνεται ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης και των ψηφιακών διδύμων ως εργαλεία για την περαιτέρω ενίσχυση της απόδοσης σε συστήματα IoT.



Εικόνα 19 Μια γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας LEACH

4.2 Συγκριτική ανάλυση κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας

Η συγκριτική ανάλυση κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας αποτελεί κρίσιμο βήμα για την αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογιών και στρατηγικών στον τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Η ανάγκη για βέλτιστη χρήση των πόρων και μείωση του λειτουργικού κόστους καθιστά επιτακτική τη συστηματική μελέτη της σχέσης μεταξύ οικονομικής επένδυσης και ενεργειακής απόδοσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζονται αναλυτικά διάφορες τεχνολογίες επικοινωνίας, τύποι μπαταριών και αρχιτεκτονικές επεξεργασίας, προκειμένου να προσδιοριστούν οι πλέον ενδεδειγμένες λύσεις για διαφορετικά σενάρια εφαρμογής.

Η σχέση μεταξύ κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας σε ένα σύστημα IoT μπορεί να προσεγγιστεί ως μια εξισορρόπηση ανάμεσα σε επενδυτικούς και λειτουργικούς παράγοντες. Η επιλογή μιας τεχνολογίας επικοινωνίας ή αποθήκευσης ενέργειας δεν εξαρτάται μόνο από την αρχική της τιμή, αλλά και από τον μακροπρόθεσμο αντίκτυπό της στη διάρκεια ζωής της συσκευής, τις ανάγκες συντήρησης και την ενεργειακή της κατανάλωση. Έτσι, ακόμη και μια τεχνολογία με υψηλότερο αρχικό κόστος μπορεί να είναι πιο αποδοτική σε βάθος χρόνου αν συμβάλλει στη μείωση της συχνότητας επαναφορτίσεων ή αντικαταστάσεων. Επιπλέον, η θεωρητική αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη μεταβλητές όπως το ενεργειακό προφίλ της εφαρμογής, οι κύκλοι μετάδοσης, οι συνθήκες περιβάλλοντος και η δυνατότητα ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάλυση, συνεπώς, δεν αφορά μόνο την άμεση οικονομική σύγκριση αλλά και τη συστημική απόδοση στο πλαίσιο ενός πολυπαραγοντικού ενεργειακού και τεχνολογικού περιβάλλοντος.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση τριών ευρέως χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών επικοινωνίας στο οικοσύστημα του IoT – WiFi, LoRa και ZigBee – με βάση την ενεργειακή κατανάλωση και τη συνεπαγόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα που προσομοιώνουν τη μετάδοση 60 πακέτων ανά ώρα, με μέγεθος 128 byte το καθένα, υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

Πίνακας 1 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας

Πρωτόκολλο	Tx ενέργεια/ώρα (mWh)	Rx ενέργεια/ώρα (mWh)	Idle ενέργεια/ώρα (mWh)	Συνολική ενέργεια/ώρα (mWh)	Διάρκεια ζωής μπαταρίας (ώρες)
WiFi	0.0001	0.0001	99.9999	100.0001	10.0
LoRa	0.1707	0.0683	4.9659	5.2048	192.1
ZigBee	0.0024	0.0017	2.9996	3.0037	332.9

Πίνακας 2 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας με βάση τα Πακέτα

Πρωτόκολλο	Tx ενέργεια/ώρα (mWh)	Rx ενέργεια/ώρα (mWh)	Idle ενέργεια/ώρα (mWh)	Συνολική ενέργεια/ώρα (mWh)	Διάρκεια ζωής μπαταρίας (ώρες)
WiFi	0.00001	0.00001	999.997	999.999	100.0
LoRa	624.001	249.420	18,339.614	19,213.034	5.2
ZigBee	0.26566	0.18718	33,247.138	33,292.424	3.0

Πίνακας 3 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας με βάση την Ώρα

Πρωτόκολλο	Tx ενέργεια/ώρα (mWh)	Rx ενέργεια/ώρα (mWh)	Idle ενέργεια/ώρα (mWh)	Συνολική ενέργεια/ώρα (mWh)	Διάρκεια ζωής μπαταρίας (ώρες)
WiFi	0.00001	0.00001	999.996	999.997	100.0
LoRa	3199.323	1283.117	14003.216	18485.655	5.4
ZigBee	0.26501	0.18621	33206.493	33251.614	3.0

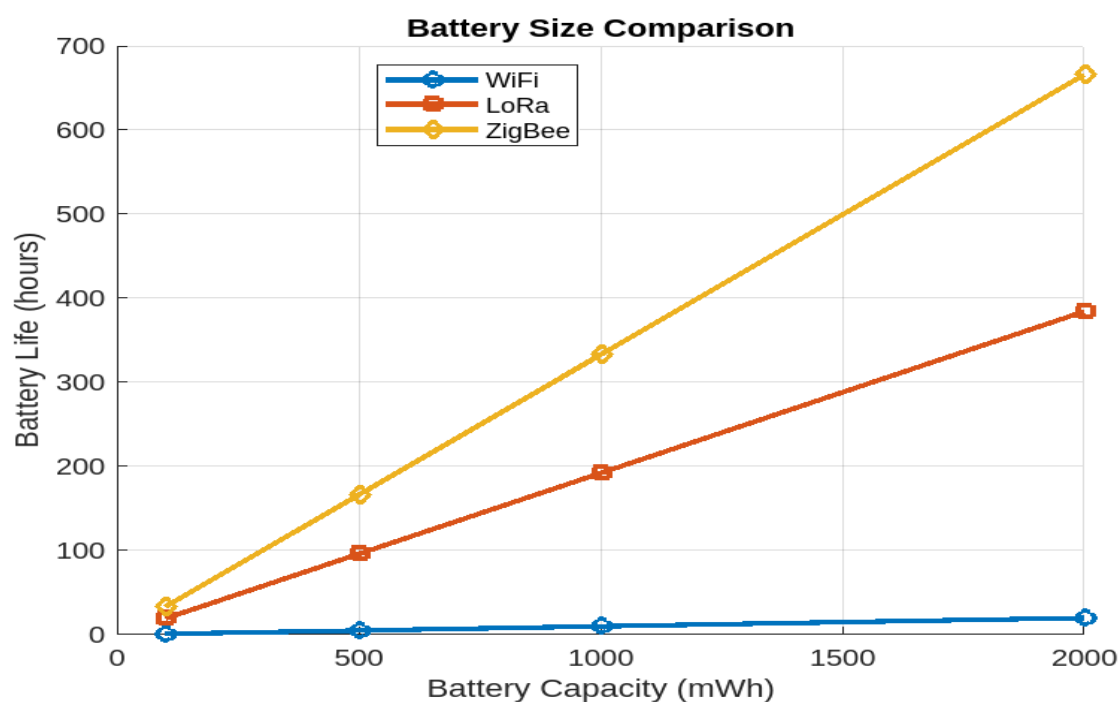
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι :

1. Το WiFi έχει πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ιδανικό για υψηλής ταχύτητας μεταδόσεις όμως με εξαιρετικά υψηλή κατανάλωση σε κατάσταση αναμονής, που περιορίζει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, με διάρκεια ζωής μόλις 10 ώρες, καθιστώντας το ακατάλληλο για σποραδική επικοινωνία σε IoT περιβάλλοντα και

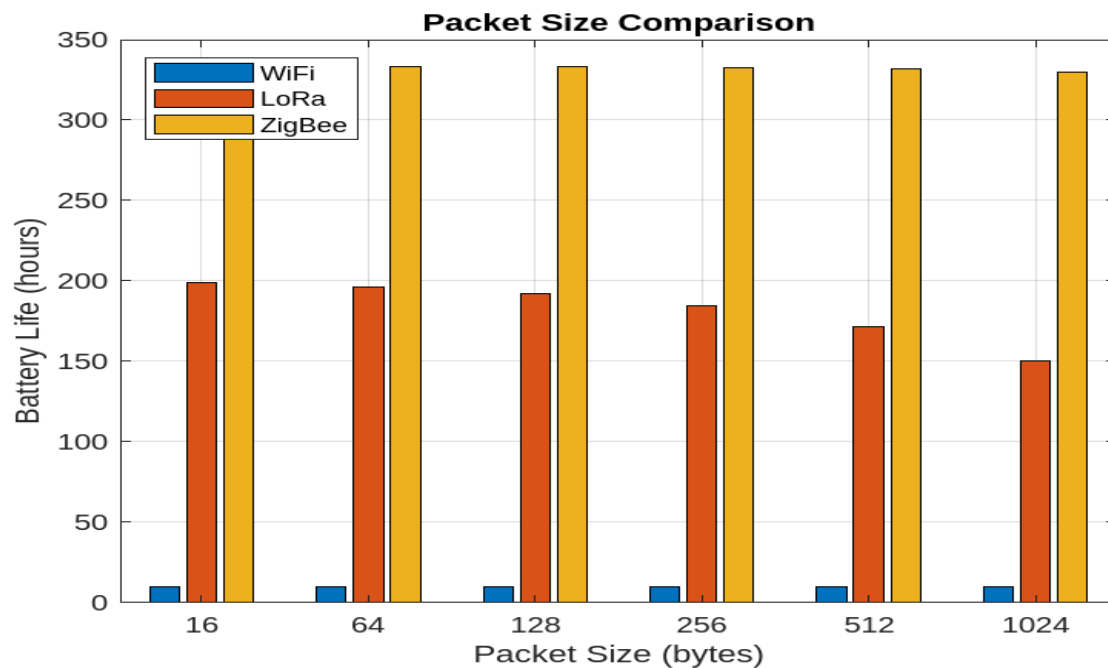
Κατάλληλο για εφαρμογές με συνεχή μετάδοση και σταθερή παροχή ενέργειας (π.χ. κάμερες ασφαλείας, routers).

2. Το LoRa έχει αυξημένη κατανάλωση σε Tx και Rx, αλλά πολύ χαμηλή κατανάλωση σε Idle, πολύ ικανοποιητική διάρκεια μπαταρίας, ιδανική για συσκευές σε απομακρυσμένα σημεία. με μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας, κατάλληλη για περιοχές χωρίς πυκνή δικτύωση. Και κατάλληλο για γεωργικές εφαρμογές, αισθητήρες περιβάλλοντος, έξυπνες πόλεις, υποδομές χωρίς συχνή συντήρηση.

3. Το ZigBee έχει πολύ χαμηλή κατανάλωση σε όλες τις λειτουργικές με την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας από όλα τα πρωτόκολλα (332.9 ώρες), είναι σχεδιασμένο για τοπικά δίκτυα μικρής εμβέλειας με πολλές συσκευές και κατάλληλο για έξυπνα σπίτια, βιομηχανικούς αυτοματισμούς, εσωτερικά δίκτυα με υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα.



Εικόνα 20 Γραφική Απεικόνιση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας Κατανάλωση Μπαταρίας



Εικόνα 21 Γραφική Απεικόνιση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας με βάση τα Πακέτα

Καταλήγοντας γίνεται σαφές ότι :

1. Η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πρωτοκόλλου είναι κρίσιμος παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός IoT συστήματος.
2. Το WiFi, παρά τη μεγάλη του ταχύτητα, δεν είναι κατάλληλο για ενεργειακά αυτόνομες εφαρμογές λόγω υπερβολικής κατανάλωσης σε αναμονή.
3. Το LoRa προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ κατανάλωσης και απόδοσης και είναι κατάλληλο για απομακρυσμένες ή χαμηλής συντήρησης εφαρμογές.
4. Το ZigBee είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική λύση, ιδανική για εφαρμογές σε δίκτυα μικρής εμβέλειας με περιοδική επικοινωνία.
5. Η τελική επιλογή εξαρτάται από τη γεωγραφική κατανομή των κόμβων, τις απαιτήσεις μετάδοσης και το ενεργειακό προφίλ της εφαρμογής.

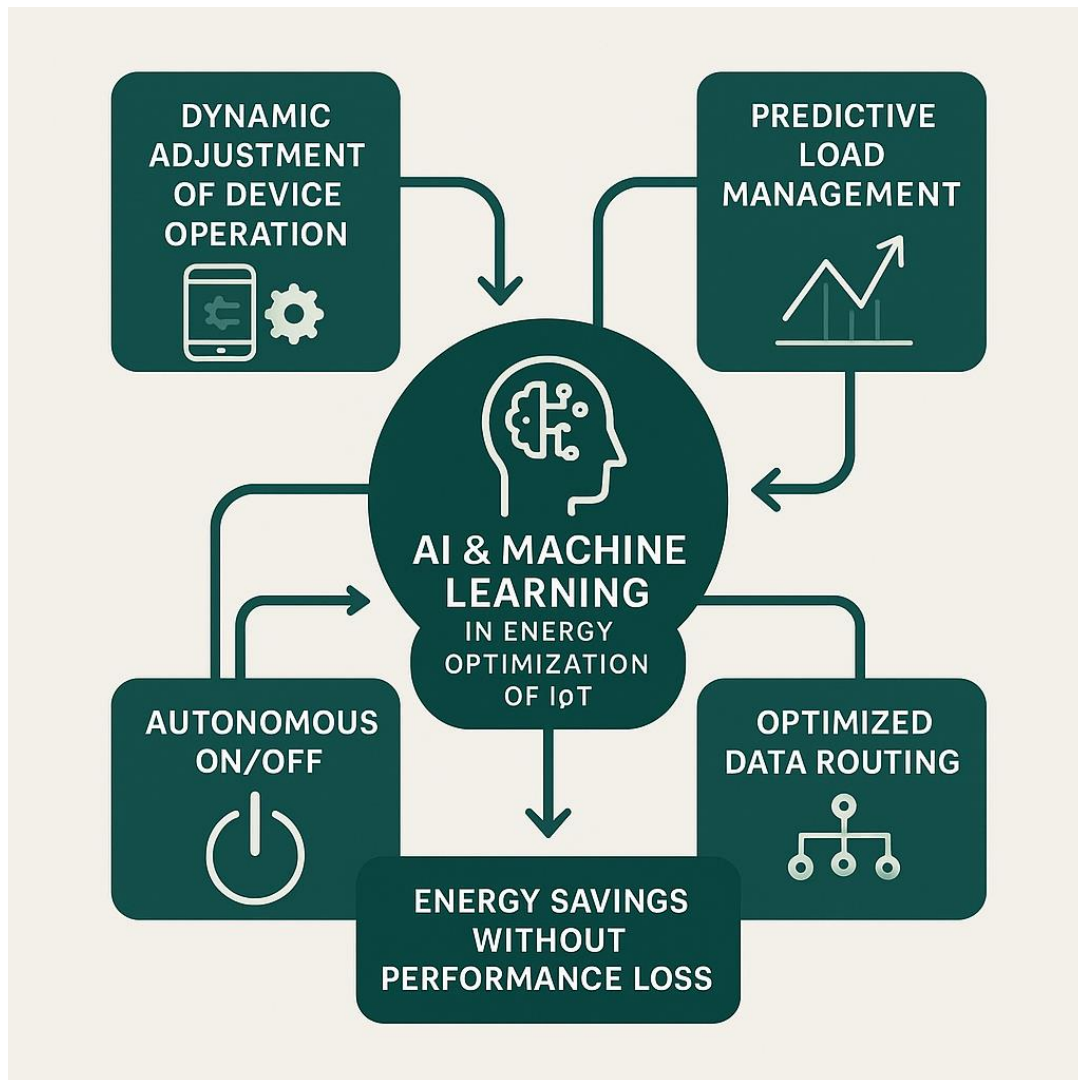
4.3 Μελλοντικές εξελίξεις και προοπτικές

Η διαρκής εξέλιξη του οικοσυστήματος του Διαδικτύου των Πραγμάτων προδιαγράφει σημαντικές αλλαγές τόσο σε επίπεδο τεχνολογιών όσο και στρατηγικών διαχείρισης

κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας. Καθώς οι ανάγκες για πιο αποδοτικές και βιώσιμες λύσεις εντείνονται, αναμένεται η εμφάνιση καινοτομιών που θα μετασχηματίσουν τις τρέχουσες πρακτικές και θα επεκτείνουν τις δυνατότητες των συστημάτων IoT.

Η ενσωμάτωση τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης αναμένεται να παίξει καταλυτικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης. Έξυπνοι αλγόριθμοι θα είναι σε θέση να προσαρμόζουν δυναμικά τη λειτουργία των συσκευών με βάση το προφίλ χρήσης, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις ανάγκες επικοινωνίας, επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς συμβιβασμούς στην απόδοση. Η πρόβλεψη φορτίων, η αυτόνομη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση υποσυστημάτων, καθώς και η βελτιστοποιημένη δρομολόγηση δεδομένων αναμένεται να γίνουν κεντρικά στοιχεία στις μελλοντικές αρχιτεκτονικές IoT.

Σε επίπεδο αποθήκευσης ενέργειας, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μπαταριών, όπως οι νάτριο-ιοντικές και οι solid-state μπαταρίες νέας γενιάς, υπόσχεται να προσφέρει εναλλακτικές λύσεις με χαμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη ασφάλεια και βελτιωμένη ενεργειακή πυκνότητα. Οι νάτριο-ιοντικές μπαταρίες, λόγω της αφθονίας και του χαμηλού κόστους του νατρίου σε σύγκριση με το λίθιο, αναμένεται να μειώσουν το συνολικό κόστος των συσκευών IoT, καθιστώντας βιώσιμες ακόμα και εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε αναπτυσσόμενες αγορές. Παράλληλα, η εξέλιξη της τεχνολογίας solid-state υπόσχεται μεγαλύτερη αντοχή στον χρόνο και καλύτερη ανθεκτικότητα σε ακραίες συνθήκες, στοιχεία κρίσιμα για βιομηχανικές και απομακρυσμένες εγκαταστάσεις.



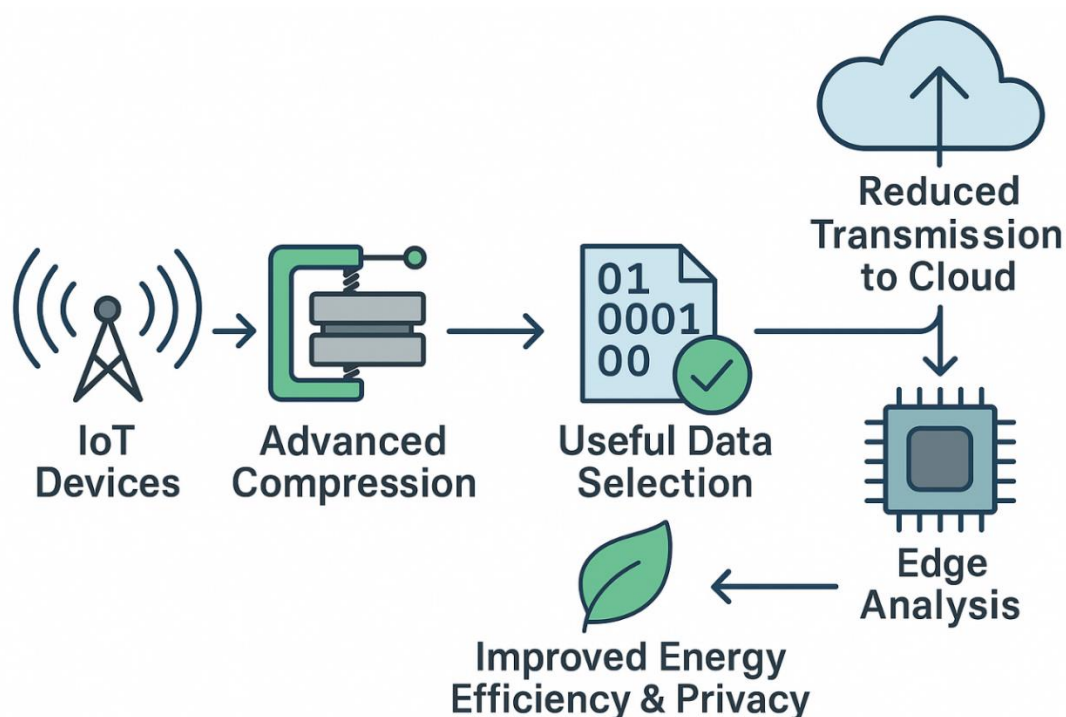
Εικόνα 22 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση για ενεργειακή βελτιστοποίηση στο IoT

Οι εξελίξεις στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, με την ευρεία διάδοση του 5G και τη μελλοντική έλευση του 6G, θα επιφέρουν ριζικές αλλαγές στο πεδίο του IoT. Η αυξημένη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και η δυνατότητα σύνδεσης τεράστιου αριθμού συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο αναμένεται να ανοίξουν τον δρόμο για νέες κατηγορίες εφαρμογών. Από την αυτοματοποιημένη γεωργία και τη βιομηχανία 4.0 μέχρι τις έξυπνες πόλεις και τα συστήματα υγειονομικής παρακολούθησης, τα νέα δίκτυα θα υποστηρίξουν απαιτητικές εφαρμογές με μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Παράλληλα, το Edge AI, δηλαδή η ενσωμάτωση τεχνικών AI σε τοπικές συσκευές και κόμβους επεξεργασίας, αναμένεται να μειώσει ακόμη περισσότερο την ανάγκη για μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων προς απομακρυσμένα κέντρα, περιορίζοντας

έτσι την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας. Η ανάπτυξη μικροελεγκτών και επεξεργαστών με εξειδίκευση στην τοπική εκτέλεση νευρωνικών δικτύων αναμένεται να υποστηρίξει αυτή την τάση, δίνοντας νέα ώθηση στη δημιουργία πιο έξυπνων και ενεργειακά αυτόνομων συσκευών.

Σε ό,τι αφορά τη διαχείριση δεδομένων, τεχνικές όπως η προηγμένη συμπίεση, η επιλογή χρήσιμων δεδομένων και η αποκεντρωμένη ανάλυση θα παίξουν σημαντικό ρόλο στη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και στην αύξηση της ιδιωτικότητας των χρηστών. Η σταδιακή μετάβαση σε μοντέλα που περιορίζουν τη ροή ευαίσθητων δεδομένων προς το cloud αναμένεται να εδραιώσει την εμπιστοσύνη στα IoT οικοσυστήματα και να επιτρέψει τη δημιουργία πιο αποδοτικών και ασφαλών εφαρμογών.



Εικόνα 23 Διαχείριση δεδομένων για ενεργειακή αποδοτικότητα και ιδιωτικότητα στα IoT

Τέλος, οι προσπάθειες για την υιοθέτηση πράσινων τεχνολογιών και κυκλικής οικονομίας θα ενταθούν, οδηγώντας σε λύσεις με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ανάπτυξη ανακυκλώσιμων και βιοδιασπώμενων υλικών για τη δημιουργία αισθητήρων και συσκευών IoT, σε συνδυασμό με την προώθηση πολιτικών για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής προϊόντων και ανακυκλωσιμότητα μπαταριών,

αναμένεται να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό των μελλοντικών λύσεων.

Συνολικά, η επόμενη γενιά τεχνολογιών IoT διαμορφώνεται υπό το πρίσμα της ενεργειακής αποδοτικότητας, του μειωμένου κόστους, της τεχνητής νοημοσύνης και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Οι εξελίξεις αυτές αναμένεται να ενισχύσουν την ευρεία διάδοση του IoT σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, μετατρέποντάς το σε αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής και της βιομηχανικής παραγωγής.

Συμπεράσματα

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αναπτύσσεται ραγδαία, αλλά η επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών παραμένει κρίσιμη για την ισορροπία μεταξύ κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας. Για επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας, πρωτόκολλα όπως το LoRaWAN και το NB-IoT προσφέρουν βέλτιστη κάλυψη με ελάχιστη ενεργειακή δαπάνη, ενώ για μικρότερες εφαρμογές, το BLE και το Zigbee ξεχωρίζουν για την εξαιρετική τους απόδοση. Παράλληλα, οι μπαταρίες Li-Ion και Li-Po εξακολουθούν να είναι η πρώτη επιλογή λόγω υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, ενώ οι solid-state μπαταρίες αναμένεται να επαναπροσδιορίσουν τα στάνταρ αξιοπιστίας και διάρκειας ζωής.

Η βέλτιστη διαχείριση δεδομένων αποτελεί επίσης καίριο ζήτημα, με το Edge και Fog Computing να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του παραδοσιακού Cloud Computing σε ό,τι αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα και το κόστος λειτουργίας. Η τοπική επεξεργασία δεδομένων μειώνει δραματικά τόσο την κατανάλωση ενέργειας όσο και τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, καθιστώντας αυτές τις τεχνολογίες ιδανικές για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ταυτόχρονα, η έλευση του 5G/6G και η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης για δυναμική διαχείριση πόρων υπόσχονται να βελτιώσουν περαιτέρω την απόδοση των συστημάτων.

Προβλέπεται ότι η εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) θα χαρακτηρίζεται από αυξημένη εστίαση σε βιώσιμες και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις. Επιγενόμενες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των νατριο-ιοντικών συσσωρευτών και βιοδιασπώμενων υλικών, αναμένεται να συμβάλουν σημαντικά στην ανάπτυξη οικολογικότερων συστημάτων. Παράλληλα, η εφαρμογή προηγμένων αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης θα επιτρέψει βελτιστοποιημένη διαχείριση πόρων, ενισχύοντας την αποδοτικότητα λειτουργίας. Αυτές οι τεχνολογικές προόδους θα διευκολύνουν την ευρύτερη υιοθέτηση του IoT σε ποικίλους τομείς εφαρμογών, από αστικές έξυπνες υποδομές έως βιομηχανικές εφαρμογές τέταρτης γενιάς, ορίζοντας νέα κριτήρια απόδοσης και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

- Δασυγένης, Μ. & Σούντρης, Δ. (2024). *Υπολογιστική Διαδικτύου των Αντικειμένων-Υπολογισμός από την άκρη μέχρι το σύννεφο*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-984>
- Διδασκάλου, Α. (2021). Αποτύπωση των γεωλογικών αλλαγών στην γεωργία με χρήση ασύρματων δικτύων. Ειδική περίπτωση: Σχεδιασμός και υλοποίηση ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης του μικροκλίματος θερμοκηπίων με τεχνολογίες IoT. Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
- Ελευθεριάδου, Χ. (2023). Clustering algorithm for data network in planning Smart Grid. *Πτυχιακή Εργασία*. Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
- Ευθυμίου, Β. (2024). Smart cities και βιώσιμες σύγχρονες λύσεις. (*Μεταπτυχιακή Διατριβή*). Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Ζιώγου, Α. (2023). Τεχνητή Νοημοσύνη στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (*Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία*). Πανεπιστήμιο Μακεδονίας - Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Καστρινός, Δ., (2018). Το Internet of Things και οι εφαρμογές του στην εφοδιαστική αλυσίδα & τα logistics. *Μεταπτυχιακή Διατριβή*, Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Κατωμέρη, Σ. (2025). Τεχνητή νοημοσύνη και βιωσιμότητα. (*Μεταπτυχιακή Εργασία*). Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Κίκιλας, Ι. (2025). Βιβλιογραφική έρευνα σε Digital Forensic Analysis σε δίκτυα και συστήματα IoT. (*Διπλωματική Εργασία*). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κονδύλης, Κ. (2024). Ανάπτυξη πληροφοριακού συστήματος παρακολούθησης ηλεκτρικής ενέργειας και νερού σε μεγάλες κτιριακές εγκαταστάσεις (*Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κωτσάκη, Γ. (2024). Βιώσιμη αστική κινητικότητα: σύγχρονες τάσεις & μελλοντικές προκλήσεις (*Μεταπτυχιακή Διατριβή*). Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Μπουλογεώργος, Ρ. & Τσαμπουνάρης, Μ., (2022). Εφαρμογή τεχνολογιών διαδικτύου των πραγμάτων και βαθιάς μηχανικής μάθησης για την υλοποίηση συστήματος αναγνώρισης πτώσεων ηλικιωμένων σε έξυπνα περιβάλλοντα. (*Διπλωματική Εργασία*). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μπουρίκης, Π. (2025). Σχεδιασμός και υλοποίηση ενός προηγμένου συστήματος εντοπισμού περιουσιακών στοιχείων με χρήση IoT τεχνολογιών (TrackIT) (*Μεταπτυχιακή Διατριβή*). Πανεπιστήμιο Πειραιά.

- Σαλάι, Α. (2025). Διερεύνηση αξιοποίησης της τεχνολογίας BIM και ανοιχτών δεδομένων για τη δημιουργία κτηριακής γεωχωρικής υποδομής αστικού περιβάλλοντος. (Διπλωματική Εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σαμαράς, Χ., (2020). Σχεδίαση συσκευής για το διαδίκτυο των αντικειμένων για συλλογή δεδομένων περιβάλλοντος με τη χρήση Lora. (Μεταπτυχιακή Εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Στεφανάκης, Φ. (2024). Ενίσχυση και έλεγχος της ποιότητας εφαρμογής μέσω UnitTesting. (Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Ξενόγλωσση

- Ahmed, M. M., Qays, M. O., Abu-Siada, A., Muyeen, S. M., & Hossain, M. L. (2021). Cost-Effective Design of IoT-Based Smart Household Distribution System. *Designs*, 5(3), 55. <https://doi.org/10.3390/designs5030055>
- Ali, A., Shaukat, H., Elahi, H., Taimur, S., Manan, M., Altabey, W., Kouritem, S. & Noori, M., (2025). Advancements in Energy Harvesting Techniques for Sustainable IoT Devices. *Results in Engineering*. 26. 104820. 10.1016/j.rineng.2025.104820.
- Al-Obaidi, K. M., Hossain, M., Alduais, N. A. M., Al-Duais, H. S., Omrany, H., & Ghaffarianhoseini, A. (2022). A Review of Using IoT for Energy Efficient Buildings and Cities: A Built Environment Perspective. *Energies*, 15(16), 5991. <https://doi.org/10.3390/en15165991>
- Al-Sammak, K. A., Al-Gburi, S. H., Marghescu, I., Drăgulescu, A.-M. C., Marghescu, C., Martian, A., Al-Sammak, N. A. H., Suciu, G., & Alheeti, K. M. A. (2025). Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart Meters with LoRaWAN and NB-IoT. *Energies*, 18(4), 987. <https://doi.org/10.3390/en18040987>
- Alwahedi, F., Aldaheri, A., Ferrag, M. A., Battah, A., & Tihanyi, N. (2024). Machine learning techniques for IoT security: Current research and future vision with generative AI and large language models. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 4, 167-185.
- Arun, M., Gopan, G., Vembu, S., Ozsahin, D. U., Ahmad, H., & Alotaibi, M. F. (2024). Internet of things and deep learning-enhanced monitoring for energy efficiency in older buildings. *Case studies in thermal engineering*, 61, 104867.
- Aslam, M. M., Irshad, M. N., & Azeem, H. (2020). Cost Effective & Energy Efficient Intelligent Smart Home System Based on IoT. *International Journal of Engineering Technology and Applied Science*, 3(1), 10-20.
- Faid, A., Sadik, M., & Sabir, E. (2021). An agile AI and IoT-augmented smart farming: a cost-effective cognitive weather station. *Agriculture*, 12(1), 35.

- Fettes, E., Madoery, P. G., Yanikomeroglu, H., Karabulut-Kurt, G., Naik, A., Bellinger, C., ... & Siddiqui, S. (2025). Energy-Efficient Satellite IoT Optical Downlinks Using Weather-Adaptive Reinforcement Learning. *arXiv preprint arXiv:2501.11198*.
- Gupta, S., Patel, N., Kumar, A., Jain, N. K., Dass, P., Hegde, R., & Rajaram, A. (2024). Intelligent resource optimization for scalable and energy-efficient heterogeneous IoT devices. *Multimedia Tools and Applications*, 83(35), 82343-82367.
- Habibullah, S. M., Alam, S., Ghosh, S., Dey, A., & De, A. (2024). Blockchain-based energy consumption approaches in IoT. *Scientific Reports*, 14(1), 28088.
- Hassan, N., Gillani, S., Ahmed, E., Yaqoob, I., & Imran, M. (2018). The Role of Edge Computing in Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 56(11), 110– 115. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700906>
- Jiang, W., Han, H., Feng, D., Qian, L., Wang, Q., & Xia, X. G. (2025). Energy-efficient and accuracy-aware DNN inference with IoT device-edge collaboration. In *IEEE Transactions on Services Computing*, vol. 18, no. 2, pp. 784-797, doi: 10.1109/TSC.2025.3536311
- Kaftantzis, N., Kogias, D. G., & Patrikakis, C. Z. (2024). Exploring the Impact of Resource Management Strategies on Simulated Edge Cloud Performance: An Experimental Study. *Network*, 4(4), 498-522. <https://doi.org/10.3390/network4040025>
- Kashani, M. H., Madanipour, M., Nikravan, M., Asghari, P., & Mahdipour, E. (2021). A systematic review of IoT in healthcare: Applications, techniques, and trends. *Journal of Network and Computer Applications*, 192, 103164.
- Kelly, B., (2024). The Impact of Edge Computing on Real-Time Data Processing. *International Journal of Computing and Engineering*. 5. 44-58. 10.47941/ijce.2042.
- Khan, S. B., Kumar, A., Mashat, A., Pruthviraja, D., Imam Rahmani, M. K., & Mathew, J. (2024). Artificial Intelligence in next-generation networking: energy efficiency optimization in IoT networks using hybrid LEACH protocol. *SN Computer Science*, 5(5), 546.
- Kozłowski, A. & Sosnowski, J. (2019). Energy Efficiency Trade-Off Between Duty-Cycling and Wake-Up Radio Techniques in IoT Networks. *Wireless Pers Commun* 107, 1951–1971. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06368-0>
- Liu, C., Tan, R., Wu, Y. et al., (2024). Dissecting zero trust: research landscape and its implementation in IoT. *Cybersecurity* 7, 20. <https://doi.org/10.1186/s42400-024-00212-0>

- Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetzel, J., Dobbs, R., Bughin, J., & Aharon, D. (2015). *The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype*. McKinsey & Company.
- Mishra, M., Gupta, G. S., & Gui, X. (2021). Network Lifetime Improvement through Energy-Efficient Hybrid Routing Protocol for IoT Applications. *Sensors*, 21(22), 7439. <https://doi.org/10.3390/s21227439>
- Modarress Fathi, B., Ansari, A., & Ansari, A. (2022). Threats of Internet-of-Thing on Environmental Sustainability by E-Waste. *Sustainability*, 14(16), 10161. <https://doi.org/10.3390/su141610161>
- Nain, G., Pattanaik, K. K. & Sharma, G. K., (2022). Towards edge computing in intelligent manufacturing: Past, present and future. *Journal of Manufacturing Systems*,. 62: 588-611.
- Qian, C., Ling, T., Cichowskyj, C., & Schiele, G. (2025). Configuration-aware approaches for enhancing energy efficiency in FPGA-based deep learning accelerators. *Journal of Systems Architecture*, 103410.
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30-39
- Tekin. N., Aris, A., Acar, A., Uluagac, S. & Gungor, V.G., (2024). A review of on-device machine learning for IoT: An energy perspective. *Ad Hoc Networks*, 152, 103348.
- Veeramachaneni, V. (2025). Fortified Data Transmission for IoT: Leveraging Trustless Networks with Adaptive Security and Energy Efficiency. *Journal of Advance Research in Mobile Computing*, 7(1), 22-32.
- Vo, T., Dave, P., Bajpai, G. & Kashef, R., (2022). Edge, Fog, and Cloud Computing: An Overview on Challenges and Applications. 10.48550/arXiv.2211.01863.
- Vrontis, D., Christofi, M., Pereira, V., Tarba, S., Makrides, A., Trichina, E., (2021). Artificial intelligence, robotics, advanced technologies and human resource management: a systematic review. *The International Journal of Human Resource Management*. 33. 1-30. 10.1080/09585192.2020.1871398.