



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



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

**Τεχνοοικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση Μεθόδων Χρήσης
IoT Αισθητήρων για την Ενίσχυση της Ενεργειακής Αυτονομίας
στην Ελλάδα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία, Π. Θεοδωρακοπούλου

Επιβλέπων:

Δημήτριος Ασκούνης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



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

**Τεχνοοικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση Μεθόδων Χρήσης IoT
Αισθητήρων για την Ενίσχυση της Ενεργειακής Αυτονομίας στην
Ελλάδα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία, Π. Θεοδωρακοπούλου

Επιβλέπων:

Δημήτριος Ασκούνης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6^η Νοεμβρίου 2025

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ευάγγελος Σπηλιώτης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος, 2025

Γεωργία, Π. Θεοδωρακοπούλου
Πτυχιούχος Οικονομικών Επιστημών
Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Τεχνοοικονομικά συστήματα» της Σχολής
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεωργία, Π. Θεοδωρακοπούλου, 2025
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυνατότητα επίτευξης ενεργειακής αυτονομίας μέσω της αξιοποίησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), με ενσωμάτωση τεχνολογιών Internet of Things (IoT), για την παραγωγή, κατανάλωση και αποδοτική διαχείριση ενέργειας στην Ελλάδα. Στόχος είναι η αξιολόγηση της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συνδυασμό με τεχνολογίες IoT, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της εποπτείας σε πραγματικό χρόνο.

Στο θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της τεχνολογίας IoT καθώς και η βιβλιογραφική επισκόπηση του όρου της ενεργειακής αυτονομίας. Παράλληλα, αναφέρονται σχετικά ευρωπαϊκά και ελληνικά παραδείγματα στα οποία έχει εφαρμοστεί με απόλυτη επιτυχία ένα σύστημα ΑΠΕ με ενσωμάτωση IoT. Πιο συγκεκριμένα, στην ανάλυση αναφέρονται οι περιπτώσεις της νήσου Bornholm στην Δανία, της νήσου Τήλου στην Ελλάδα, και το διευρωπαϊκό πρόγραμμα InterConnected H2020. Οι ενεργειακές νήσοι αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα ενεργειακής μετάβασης, καθώς τα υβριδικά μικροσυστήματα που εγκαταστάθηκαν εκεί, συνέβαλαν σημαντικά στην μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των περιοχών ενώ παράλληλα αύξησαν σημαντικά την αυτονομία τους. Αντίστοιχα, το έργο InterConnected H2020 προωθεί την ανάπτυξη διασυνδεδεμένων ενεργειακών συστημάτων που ενσωματώνουν τεχνολογίες αιχμής για την αύξηση της αποδοτικότητας και της αυτονομίας των εμπλεκόμενων μερών.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται το έργο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπου αναφέρεται στην τεχνοοικονομική ανάλυση εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε υπαίθριους χώρους στάθμευσης της στάσης του σταθμού του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας. Το έργο συνδυάζει την παραγωγή, αποθήκευση και διαχείριση ενέργειας μέσω ΑΠΕ, της τεχνολογίας IoT και συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (EMS). Στόχος είναι να αξιοποιηθούν οι σύγχρονες τεχνολογίες για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας του σταθμού, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις για την ενέργεια και τη διαχείρισή της. Η μελέτη αξιολογεί τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, το κόστος υλοποίησης και συντήρησης καθώς και τα οικονομικά οφέλη που προσδίδει η ενσωμάτωση αισθητήρων IoT, μέσω συνεχούς παρακολούθησης της παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ευρήματα της ανάλυσης καταδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση συστημάτων IoT σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, καθώς συμβάλλει στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας και στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος της χώρας. Η υλοποίηση τέτοιων λύσεων σε αστικά περιβάλλοντα –όπως, για παράδειγμα, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στεγάστρων στάθμευσης (solar carports)– αποτελεί μια βιώσιμη στρατηγική για την προώθηση της πράσινης ενέργειας και την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής.

Λέξεις-κλειδιά: Ενεργειακή αυτονομία, Internet of Things (IoT), Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Φωτοβολταϊκά συστήματα, Αποθήκευση Ενέργειας

ABSTRACT

This thesis explores the potential for achieving energy autonomy in Greece through the utilization of Renewable Energy Sources (RES), combined with the integration of Internet of Things (IoT) technologies for energy production, consumption, and efficient management. The main objective is to evaluate the technical and economic viability of installing photovoltaic (PV) systems integrated with IoT technologies, aiming to optimize energy performance and enable real-time monitoring and control.

The theoretical framework of the study outlines the fundamental principles of IoT technology and includes a literature review on the concept of energy autonomy. Additionally, relevant European and Greek case studies are presented, where RES systems integrated with IoT technologies have been successfully implemented. Specifically, the analysis highlights the cases of Bornholm Island in Denmark, Tilos Island in Greece, and the European InterConnected H2020 project. These "energy islands" serve as notable examples of the energy transition, as the hybrid microgrid systems deployed there have significantly contributed to reducing the local carbon footprint while simultaneously enhancing energy independence. Similarly, the InterConnected H2020 project promotes the development of interconnected energy systems that incorporate cutting-edge technologies to improve both efficiency and autonomy among participating entities.

The thesis then focuses on the main case study, which involves a techno-economic analysis of installing a photovoltaic system in the outdoor parking areas of the Doukissis Plakentias metro station in Athens. The project combines energy production, storage, and management using RES, IoT technology, and Energy Management Systems (EMS). The goal is to leverage modern technologies to enhance the energy efficiency and sustainability of the station while offering innovative solutions for energy use and management.

The study evaluates the technical specifications of the installation, the implementation and maintenance costs, and the financial benefits resulting from the integration of IoT sensors, which enable continuous monitoring of electricity production and consumption. The findings demonstrate that the combination of IoT systems with renewable energy sources can provide significant environmental and economic advantages. It contributes to strengthening energy autonomy and reducing the country's energy footprint. The implementation of such solutions in urban environments — such as the installation of solar carports — represents a viable strategy for promoting green energy and improving quality of life.

Keywords: Energy autonomy, Internet of Things (IoT), Renewable Energy Sources (RES), Photovoltaic systems, Energy storage

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών μου και αποτελεί το αποτέλεσμα μιας προσπάθειας που συνοψίζει την ακαδημαϊκή μου προσέγγιση. Η επιλογή του θέματος προέκυψε από την ανάγκη για διερεύνηση λύσεων που αποσκοπούν σε ενεργειακή αυτονομία μέσω χρήσης τεχνολογιών IoT, και πως θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν παρόμοιες τακτικές στην ελληνική πραγματικότητα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μου, κ. Δημήτρη Πανόπουλο και κ. Δημήτρη Ασκούνη, για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ευχαριστίες οφείλω και στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για τη στήριξή τους, αλλά και σε όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Πίνακας περιεχομένων

1.Εισαγωγή.....	14
2. Βασικές έννοιες και θεωρητικό υπόβαθρο.....	16
2.1 Internet of Things - Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων	16
2.1.1 Ορισμός του Internet of Things (IoT).....	16
2.1.2. Ιστορική εξέλιξη του IoT και των τεχνολογιών του.....	17
2.1.3 Βασικά θεμελιώδη χαρακτηριστικά του IoT.....	18
2.1.4. Απαιτήσεις IoT.....	19
2.1.5 IoT: Οφέλη και προκλήσεις	21
2.1.6 Σύγκριση IoT με παραδοσιακά δίκτυα.....	22
2.1.7 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα IoT συστήματα	24
2.1.8 Τομείς εφαρμογής IoT συστημάτων.....	28
2.2 Ενεργειακή αυτονομία και στρατηγικές επιτεύγματος στην Ελλάδα.....	30
2.2.1 Ορισμός της ενεργειακής αυτονομίας.....	30
2.2.2 Κριτήρια εφικτότητας μετάβασης ενεργειακής αυτονομίας.....	31
2.2.3. Οφέλη και προκλήσεις ενεργειακής αυτονομίας	33
2.1.4. Παράγοντες επιρροής ενεργειακής αυτονομίας και στρατηγικές επίτευξης	34
2.2.5 Η συμβολή των αισθητήρων στις υπηρεσίες και υποδομές ενέργεια.....	35
3. Εφαρμογές IoT για ενεργειακή αυτονομία	37
3.1 Δανία: Οι Ενεργειακές Νήσοι της Βαλτικής και Βόρειας Θάλασσας	37
3.1.1. Η αρχιτεκτονική του συστήματος	38
3.1.2. Τεχνικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά	38
3.1.3 Παρακολούθηση και ανάλυση λειτουργικών δεδομένων παραγωγής και μεταφοράς.....	39
3.1.4 Αποθήκευση και διαχείριση ενέργειας.....	40
3.1.5 Ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα	42
3.2 Ελλάδα: Project Tilos - Ο πρώτος υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	43
3.2.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά και αποτελέσματα του Project TILOS	43
3.2.2 Τεχνικά στοιχεία και περιγραφή της υποδομής.....	44
3.2.3 Λειτουργία μικροδικτύου	46
3.2.4 Ανάλυση έργου και συμπεράσματα	46
3.3 Διερωπαϊκό πρόγραμμα InterConnect H2020 – Ψηφιακή IoT πλατφόρμα για αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας.....	47
3.3.1 Τομείς ανάπτυξης υποδομής έργου	48
3.3.3 Αρχιτεκτονική του συστήματος.....	48
3.3.4 Αποτελέσματα και επιτεύγματα του προγράμματος	49

4. Τεχνοοικονομική ανάλυση ανάπτυξης δικτύου solar carport σε υπαίθριους χώρους στάθμευσης της Αθήνας.....	50
4.1 Εισαγωγή και αναγνώριση της παρούσας κατάστασης	50
4.2 Αντικείμενο της ανάλυσης.....	52
4.3 Σκοπός και στόχοι του έργου	52
4.4 Γενική περιγραφή του έργου	53
4.4.1 Φωτοβολταϊκός χώρος στάθμευσης (solar carport)	53
4.4.2 Ενσωμάτωση IoT σε δίκτυο solar carport	54
4.4.3 Παρουσίαση υπαρκτών παραδειγμάτων στην Ελλάδα	56
4.5 Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωματωμένο σύστημα IoT στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας	57
4.5.1 Μεθοδολογική προσέγγιση	58
4.6 Ανάλυση των Τεχνικών Απαιτήσεων	58
4.6.2 Επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ.....	61
4.6.3 Επιλογή μετατροπέων (inverters).....	61
4.6.4 Επιλογή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας	64
4.6.5 Επιλογή τύπου φόρτισης σταθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	66
4.6.6 Επιλογή αισθητήρων IoT	69
4.6.7 Επιλογή υποδομής δικτύου	72
4.7 Εκτίμηση παραγωγής ενέργειας.....	75
4.8 Ανάλυση οικονομικών απαιτήσεων.....	77
Σενάριο 1: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT χωρίς αποθήκευση ενέργειας	78
Σενάριο 2: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT με μερική αποθήκευση ενέργειας	83
Σενάριο 3: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT με μεγάλη αποθήκευση ενέργειας για ενεργειακή αυτονομία.....	88
5. Συμπεράσματα	93
6. Βιβλιογραφία	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	99

Κατάλογος γραφημάτων

Γράφημα 1 - Χαρακτηριστικά IoT συστήματος, ίδια επεξεργασία	21
Γράφημα 2- Bornholm and the projected Energy Island project in the Baltic Sea. © Energistyrelsen.	39
Γράφημα 3 - Απεικόνιση μετατροπής ανανεώσιμης ενέργειας σε ηλεκτρικό καύσιμο μέσω ηλεκτρόλυσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον τομέα των μεταφορών. (Kany et al., 2022).	41

Γράφημα 4 – Λειτουργία Merit-Order - (Callum & Bradley, 2018)	42
Γράφημα 5 – Λειτουργία μικροδικτύου νήσου Τήλου - (Zafirakis & Kaldellis, 2020)	45
Γράφημα 6 - Αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων ανά 1.000 κατοίκους, EUROSTAT 2024	50
Γράφημα 7 - Κατανομή παραγωγής ενέργειας ανά μήνα - PVGIS-SARAH3	77

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 - Χάρτης νήσου Τήλου	44
Εικόνα 2 - Motorisation rate - Map.....	51
Εικόνα 3 - Προσομοίωση slar carport με σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	56
Εικόνα 4 - Περιοχή ελέγχου, Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο	57
Εικόνα 5 - Design and Optimization of Solar Carport Canopies for Maximum Power Generation and Efficiency at Bahawalpur.....	59
Εικόνα 6 - Βάση στήριξης H2700 MAX DUOPITCH, Πηγή Alumil SOLAR.....	60
Εικόνα 7 - JA SOLAR panel.....	61
Εικόνα 8 - Μετατροπέας Huawei SUN2000.....	64
Εικόνα 9 - Μπαταρία Huawei LUNA2000-200KWH-2H1	66
Εικόνα 10 - Μπαταρία Tesla Megapack 2 XL.....	66
Εικόνα 11 - Μαχαίρας, Ε. Χ. (2025). Προσομοίωση της διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Master's thesis).	67
Εικόνα 12 - Μαχαίρας, Ε. Χ. (2025). Προσομοίωση της διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Master's thesis).	68
Εικόνα 13 - Μαχαίρας, Ε. Χ. (2025). Προσομοίωση της διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Master's thesis).	68
Εικόνα 14 - Τύποι σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	69
Εικόνα 15 - Αισθητήρας ανίχνευσης θέσης Milesight WS202 (LoRa IoT Sensor).....	70
Εικόνα 16 - Αισθητήρας μέτρησης φόρτισης - Eastron SDM230-LoRa.....	70
Εικόνα 17 - Αισθητήρας string/module SDM630MCT-LoRaWAN-MID	71
Εικόνα 18 - Αισθητήρας κατάστασης μπαταρίας/μετατροπέα NKE Watteco Battery Charge/Usage Sensor.....	71
Εικόνα 19 - Μετεωρολογικός σταθμός Eleven Parameter Weather Station for LoRaWAN	72
Εικόνα 20 - LoRaWAN gateway	73
Εικόνα 21 - Προσομοίωση συστήματος EMS - ThingsBoard	74
Εικόνα 22 - Προσομοίωση συστήματος EMS - ThingsBoard Mobile App for Users.....	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Λειτουργικές διαφορές συστημάτων μετατροπέων, ιδία επεξεργασία	64
Πίνακας 2 - Τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης, ιδία επεξεργασία	65
Πίνακας 3 - Εκτίμηση ετήσιας παραγωγής ενέργειας - PVGIS-SARAH3	76
Πίνακας 4 - Υπολογισμός κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX σεναρίου 1	79
Πίνακας 5 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 1: Κόστος συντήρησης εξοπλισμού	80
Πίνακας 6 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 1: Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης	80
Πίνακας 7 - Σύνολο Λειτουργικών εξόδων OPEX σεναρίου 1	80
Πίνακας 8 - Δεδομένα σεναρίου 1 για υπολογισμό ΚΠΑ.....	81
Πίνακας 9 - Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) & IRR σεναρίου 1 με Συντελεστή Προεξόφλησης 3% για Χρονικό Ορίζοντα 20 Ετών.....	82

Πίνακας 10 - Υπολογισμός έτους απόσβεσης σεναρίου 1 (Payback Period)	83
Πίνακας 11 - Υπολογισμός κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX σεναρίου 2.....	84
Πίνακας 12 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 2: Κόστος συντήρησης εξοπλισμού	85
Πίνακας 13 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 2: Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης	85
Πίνακας 14 - Σύνολο Λειτουργικών εξόδων OPEX σεναρίου 2	85
Πίνακας 15 - Δεδομένα σεναρίου 2 για υπολογισμό ΚΠΑ.....	86
Πίνακας 16 - Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) & IRR σεναρίου 2 με Συντελεστή Προεξόφλησης 3% για Χρονικό Ορίζοντα 20 Ετών.....	87
Πίνακας 17 - Υπολογισμός έτους απόσβεσης σεναρίου 2 (Payback Period)	88
Πίνακας 18 - Υπολογισμός κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX σεναρίου 3.....	89
Πίνακας 19 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 3: Κόστος συντήρησης εξοπλισμού	89
Πίνακας 20 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 3: Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης	90
Πίνακας 21 - Σύνολο Λειτουργικών εξόδων OPEX σεναρίου 3	90
Πίνακας 22 - Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) & IRR σεναρίου 3 με Συντελεστή Προεξόφλησης 3% για Χρονικό Ορίζοντα 20 Ετών.....	91
Πίνακας 23 - Υπολογισμός έτους απόσβεσης σεναρίου 3 (Payback Period)	92

1.Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, οι κοινωνικο-οικονομικές αναταραχές, οι γεωπολιτικές εντάσεις και η επιτακτική ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη, θίγουν όλο και περισσότερο θέματα βελτιστοποίησης ενεργειακής κατανάλωσης και ενεργειακής αυτονομίας, καθώς με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των σοβαρών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμια κλίμακα. Έτσι, ενισχύεται η ενεργειακή ασφάλεια των χωρών στην προσπάθειά τους για ενεργειακή αυτονομία, μιας και η αυξανόμενη εξάρτηση από εξωτερικές ενεργειακές πηγές εκθέτει τις χώρες σε κινδύνους όπως οι διακυμάνσεις των τιμών και οι ελλείψεις σε κρίσιμες περιόδους. Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργειακή αυτονομία – η ικανότητα ενός συστήματος να καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες χωρίς εξωτερική εξάρτηση – καθίσταται βασικός στόχος για μια βιώσιμη και ανθεκτική ενεργειακή πραγματικότητα (Motlagh, Mohammadrezaei, & Hunt, 2020). Παράλληλα η έντονη ανάπτυξη των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ΤΠΕ), έχουν μεταβάλει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται η ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) τόσο σε οικιακό και βιομηχανικό περιβάλλον, όσο και σε ενεργειακό, καθίσταται ο πιο σημαντικός παράγοντας της ενεργειακής μετάβασης, χάρη στη δυνατότητα διασύνδεσης φυσικών συσκευών και αισθητήρων σε ένα ενιαίο δίκτυο, όπου εκεί συλλέγονται και αναλύονται δεδομένα πραγματικού χρόνου, τα οποία βελτιστοποιούν τη λήψη αποφάσεων.

Είναι ευρέως διαδεδομένο το γεγονός, πως η Ελλάδα αποτελεί μια χώρα με υψηλή εξάρτηση από τρίτες χώρες αναφορικά με τα ενεργειακά προϊόντα που εισάγει. Για τον λόγο αυτό, η ενεργειακή αυτονομία συνιστά πλέον έναν από τους σημαντικότερους στόχους της ενεργειακής της πολιτικής. Η επιδίωξη της μείωσης των εκπομπών του CO₂, η σπανιότητα των ορυκτών καυσίμων και οι πιέσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για βιώσιμη ανάπτυξη, έχει οδηγήσει τα κράτη να αναζητήσουν εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, κυρίως μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Ωστόσο, παρά το γεγονός των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η παραγωγή πράσινης ενέργειας μέσω ΑΠΕ, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή σε ζητήματα που αφορούν τόσο την σταθερότητα όσο και την διαχείριση των δικτύων. (Buschmann & Leidreiter, 2015). Τα εμπόδια αυτά, δύναται να επιλυθούν με την ενσωμάτωση των τεχνολογιών IoT, καθώς προσφέρουν μια ολοκληρωμένη λύση μέσω της τεχνικής εποπτείας και της βελτιστοποίησης των λειτουργιών που οδηγούν σε οικονομική και ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τεχνοοικονομική ανάλυση χρήσης αισθητήρων IoT για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας στην Ελλάδα. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε συνδυάζει την θεωρητική διερεύνηση των τεχνολογιών IoT και των δυνατοτήτων που προσφέρουν στον ενεργειακό κλάδο, με την πρακτική ανάλυση κόστους οφέλους (CAPEX/OPEX) σε τρία διαφορετικά επίπεδα αυτονομίας μέσω αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και χρηματοοικονομική αξιολόγηση με την βοήθεια δεικτών όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) και η περίοδος απόσβεσης (Payback Period). Επιπλέον, για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση της μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν ευρωπαϊκά παραδείγματα όπου έχουν υλοποιήσει την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ με ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT, όπως η ενεργειακή νήσος της Δανίας, το πιλοτικό έργο της Ελλάδας στην Τήλο και το διευρωπαϊκό πρόγραμμα InterConnect H2020.

Τέλος πραγματοποιήθηκε μελέτη σκοπιμότητας σε υποθετικό σενάριο, το οποίο αφορά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος τύπου solar carport, με ενσωματωμένο σύστημα IoT στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας. Το συγκεκριμένο έργο

διακρίνεται σε τρία διαφορετικά σενάρια στα οποία μεταβάλλεται το επίπεδο ενεργειακής αποθήκευσης και συνεπώς το επίπεδο της ενεργειακής αυτονομίας. Με αυτόν τον τρόπο αξιολογείται τόσο τεχνικό όσο και οικονομικό επίπεδο η βιωσιμότητα ενός αυτόνομου πάρκου με παράλληλη δυνατότητα φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων για προώθηση της ηλεκτροκίνησης.

Η αναγκαιότητα της παρούσας μελέτης διακρίνεται στον συνδυασμό των τεχνικοοικονομικών παραγόντων στο περιβαλλοντικό επίπεδο, καθώς γίνεται μια ανάλυση της αλληλεπίδρασης των αισθητήρων, των ενεργειακών συστημάτων και των οικονομικών αποτελεσμάτων, παρέχοντας έτσι ολιστική πληροφόρηση για την αξιολόγηση παρόμοιων επενδύσεων που να μπορούν να εφαρμοστούν στην ελληνική πραγματικότητα. Οι στόχοι που θέτονται μέσω της μελέτης είναι μεταξύ άλλων οι εξής:

1. Διερεύνηση των τρεχουσών τεχνολογικών λύσεων IoT που ενισχύουν την ενεργειακή αυτονομία
2. Πραγματοποίηση τεχνοοικονομικής ανάλυσης των εφαρμογών IoT στον κλάδο της ενέργειας
3. Η αξιολόγηση των προοπτικών και των προκλήσεων υιοθέτησης IoT αισθητήρων στην Ελλάδα

Δομή του τόμου

Η δομή του τόμου διακρίνεται σε τέσσερα κεφάλαια τα οποία οργανώνονται σε μια συνεκτική ακολουθία θεωρητικής τεκμηρίωσης και εφαρμοσμένης ανάλυσης.

- **Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή:** Παρουσιάζεται το αντικείμενο, η σημασία, οι στόχοι και η μεθοδολογία της μελέτης.
- **Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Πλαίσιο:** Αναλύεται η βιβλιογραφία για τις τεχνολογίες του IoT, και η συμβολή τους στον ενεργειακό τομέα.
- **Κεφάλαιο 3 –Εφαρμογές Ενεργειακής Αυτονομίας:** Παρουσιάζονται μελέτες περίπτωσης από τη Δανία, την Τήλο και άλλα έργα που συνδυάζουν IoT και ΑΠΕ.
- **Κεφάλαιο 4 – Τεχνοοικονομική Ανάλυση Solar Carport:** Περιγράφεται ο σχεδιασμός, τα σενάρια και τα αποτελέσματα της εφαρμογής ενός τέτοιου δικτύου.
- **Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα:** Συνοψίζονται τα ευρήματα, αναδεικνύεται τη συμβολή της μελέτης και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και πολιτική δράση.

2. Βασικές έννοιες και θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Internet of Things - Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Το *Διαδίκτυο των Πραγμάτων* ή αλλιώς *IoT (Internet of Things)*, αντικατοπτρίζει μια διαφορετική ολιστική προσέγγιση στην τεχνολογία, μιας και αφορά την αλληλεπίδραση των συσκευών με διαδικτυακά μέσα. Έτσι, το IoT έχει αναδειχθεί ως μια καινοτόμα τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα σύγχρονο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ωστόσο, παρά το γεγονός της ευρείας χρήσης των εργαλείων και λογισμικών IoT, δεν υπάρχει ένας ενιαία παγκόσμια αποδεκτός ορισμός του, μιας και οι ποικίλες προσεγγίσεις εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές, όπως η συνδεσιμότητα, η ανάλυση και η διαχείριση των δεδομένων.

2.1.1 Ορισμός του Internet of Things (IoT)

Η φράση Internet of Things (IoT) αποτελείται από δύο λέξεις: διαδίκτυο και πράγματα. Το *διαδίκτυο* είναι ένα παγκόσμιο σύστημα διασυνδεδεμένων υπολογιστικών δικτύων, τα οποία χρησιμοποιούν ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας (TCP/IP), με σκοπό να εξυπηρετήσουν δισεκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως (Madakam, Ramaswamy, & Tripathi, 2015). Αναφορικά με τον όρο *πράγματα*, υπονοείται οποιοδήποτε φυσικό αντικείμενο ή ακόμη και άτομο, το οποίο μπορεί να διακριθεί στον πραγματικό κόσμο.

Η πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού του IoT έγινε από τον Kevin Ashton το 1999, κατά τον οποίο οι συσκευές θα μπορούσαν να συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω αισθητήρων. Για την περιγραφή της παραπάνω ιδέας, χρησιμοποίησε τον ορισμό Internet of Things, ο οποίος φαίνεται ότι χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Σύμφωνα με την *Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU - International Telecommunication Union)*, το IoT ορίζεται ως μία παγκόσμια δυναμική δικτυακή υποδομή με ικανότητα αυτοδιαμόρφωσης. Βασίζεται σε βασικά και διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, μέσω των οποίων τα φυσικά και εικονικά αντικείμενα έχουν ταυτότητες, φυσικά χαρακτηριστικά και εικονικές προσωπικότητες. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούν ευφυείς διεπιφάνειες και εντάσσονται απρόσκοπτα στο δίκτυο της πληροφορίας.

Βέβαια, ο επικρατέστερος ορισμός, σύμφωνα με την έρευνα των Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015) είναι: «Ένα ανοιχτό και ολοκληρωμένο δίκτυο έξυπνων αντικειμένων που έχουν την ικανότητα να αυτοοργανώνονται, να μοιράζονται πληροφορίες, δεδομένα και πόρους, αντιδρώντας και ενεργώντας απέναντι σε καταστάσεις και αλλαγές στο περιβάλλον», ενώ οι Aggarwal, R. and Lal Das, M. (2012) ορίζουν το IoT ως ένα παγκόσμιο δίκτυο που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ ανθρώπου-προς-άνθρωπο (human-to-human), ανθρώπου-προς-αντικείμενα (human-to-things) και αντικειμένων-προς-αντικείμενα (things-to-things), το οποίο περιλαμβάνει οτιδήποτε στον κόσμο, παρέχοντας μοναδική ταυτότητα σε κάθε αντικείμενο. Συμπληρωματικά, το IoT περιγράφει έναν κόσμο όπου σχεδόν οτιδήποτε μπορεί να συνδεθεί και να επικοινωνεί με έξυπνο τρόπο, όπως ποτέ στο παρελθόν.

Κατά τινά τρόπο, το IoT μπορεί και επιτρέπει σε φυσικές συσκευές —οι οποίες κατέχουν μια δυναμική δικτυακή υποδομή— να επικοινωνούν και να συνδέονται μεταξύ τους μέσω του διαδικτύου. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται σε ένα ευρύ δίκτυο συσκευών που διαθέτουν αισθητήρες (sensors), λογισμικό (software) και υλικολογισμικό (firmware), με σκοπό την επιδίωξη συλλογής και ανταλλαγής δεδομένων διαδικτυακά. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι από απλές καθημερινές (όπως οικιακές και φορητές συσκευές), μέχρι και πιο σύνθετα βιομηχανικά συστήματα και ενεργειακές υποδομές (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013). Για την επίτευξη του παραπάνω μηχανισμού, απαιτείται η συνέργεια ποικίλων υπηρεσιών τόσο εφαρμογών επικοινωνίας όσο και τεχνολογικής ανάπτυξης αισθητήρων, μικροϋπολογιστών και γενικότερων περιφερειακών εξοπλισμών.

2.1.2. Ιστορική εξέλιξη του IoT και των τεχνολογιών του

Η βασική ιδέα του IoT ήταν η προώθηση της επικοινωνίας μεταξύ αντικειμένων, ανεξαρτήτως χρόνου και τοποθεσίας. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών της δεκαετίας του 1990 ήρθε για να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο κόσμος σήμερα, καθώς χρησιμοποιείται ευφύως ένα σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ο καταλύτης για την εισαγωγή του IoT σε οικιακό, βιομηχανικό και ενεργειακό περιβάλλον ήταν η ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας TCP/IP το 1982. Τότε δημιουργήθηκαν βιομηχανικές και επιχειρησιακές λύσεις M2M (machine-to-machine) για έλεγχο και εποπτεία λειτουργίας του εξοπλισμού των οντοτήτων.

Το 1991, ο επιστήμονας Mark Weiser έκανε λόγο για τον οραματισμό του σχετικά με το μέλλον του διαδικτύου, χρησιμοποιώντας τον όρο *Ubiquitous Computing*, υπογραμμίζοντας τον τρόπο δημιουργίας ενός έξυπνου περιβάλλοντος με χρήση τεχνολογίας κινητών τηλεφώνων, για παροχή ενός ισχυρού πολυμεσικού συστήματος. Μερικά χρόνια αργότερα, ο Neil Gershenfeld από το MIT Media Lab (1999) έκανε λόγο για παρόμοιες έννοιες με αυτές του Kevin Ashton, στο βιβλίο του *When Things Start to Think* (1999).

Την ίδια χρονική περίοδο, το εργαστήριο Auto-ID και το πανεπιστήμιο MIT κατάφεραν να αναπτύξουν το σύστημα EPC (Electronic Product Code)· στην ουσία, είναι μια μέθοδος ηλεκτρονικής αναγνώρισης προϊόντων σε παγκόσμια κλίμακα. Παράλληλα, κατάφεραν να χρησιμοποιήσουν ευρέως το σύστημα RFID (Radio Frequency Identification), δηλαδή μια τεχνολογία ενσωμάτωσης χρήσης ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης στο τμήμα ραδιοσυχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, προκειμένου να αναγνωριστεί μοναδικά ένα αντικείμενο.

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, άρχισαν να εμφανίζονται και τα πρώτα δημοσιεύματα τα οποία υποστήριζαν την ιδέα του IoT όπως: The Disappearing Computer, Cooltown, Internet0, ενώ την ίδια περίοδο για πρώτη φορά ο όρος πρωταγωνιστούσε και σε τίτλους βιβλίων. Πιο συγκεκριμένα, το 2005, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) δημοσίευσε την πρώτη της αναφορά για το IoT, σε μια προσπάθεια προσδιορισμού του όρου. Εν συνεχεία, το 2008, μια ομάδα εταιρειών, συμπεριλαμβανομένων των κολοσσών Cisco, Intel και SAP, δημιούργησαν τη Συμμαχία IPSO (IPSO Alliance), με στόχο την προώθηση της χρήσης του Πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP) και την έναρξη της έννοιάς του, εγκαθιδρύοντάς το στην αγορά μέχρι και σήμερα.

2.1.3 Βασικά θεμελιώδη χαρακτηριστικά του IoT

Η έλευση τεχνολογιών και υπηρεσιών πληροφορικής έχει συμβάλλει δραματικά στην αλλαγή της καθημερινότητας, τόσο των ανθρώπων, όσο και των επιχειρήσεων. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του IoT ήρθε ως απόρροια της επιτακτικής ανάγκης των μεγάλων εταιρειών για εποπτεία όλων των αντικειμένων τους, αρχικά στις αλυσίδες εφοδιαστικής αλυσίδας, ενώ στη συνέχεια υπήρξε εκτενής διείσδυση σε ολόκληρο τον βιομηχανικό τομέα, καθώς και στον τομέα της ενέργειας (Elijah, Rahman, Orikumhi, & Leow, 2018). Έτσι, μέσω του IoT, δίνεται πλέον η δυνατότητα κωδικοποίησης και ανίχνευσης αντικειμένων, παρέχοντας μια πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως βελτιστοποίηση διαδικασιών, μείωση χρόνων απόκρισης, ελαχιστοποίηση σφαλμάτων, αποτροπή κλοπών και εφαρμογή πολυκριτηριακών και ευέλικτων οργανωτικών συστημάτων. Η επιστημονική κοινότητα θεωρεί πως το IoT αποτελεί μια τεχνολογική επανάσταση, η οποία μπορεί και προσεγγίζει τις τηλεπικοινωνίες με έναν πολύ διαφορετικό πλέον τρόπο. Η εξέλιξη του βασίζεται κυρίως σε διαρκείς καινοτόμες τεχνολογίες αιχμής, οι οποίες έχουν εύρος από την ανάπτυξη ασύρματων αισθητήρων έως και νανοτεχνολογία. Οι παραπάνω τεχνολογίες επιτρέπουν την αναγνώριση, την αυτοματοποίηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο αντικειμένων μέσω του διαδικτύου, δημιουργώντας έτσι καινούργιες δυνατότητες ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων.

Τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται στα IoT συστήματα εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή ετερογένεια, ιδιαίτερα στους υπολογιστικούς πόρους που χρησιμοποιούν. Η επεξεργασία των δεδομένων, η αποθήκευσή τους, η συνδεσιμότητά τους, τα πρωτόκολλα και πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν σε συνδυασμό με την ανάπτυξη λογισμικού, είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά παραδείγματα που αποδεικνύουν την πολυπλοκότητα των συγκεκριμένων συστημάτων. Για να μπορέσει, όμως, να εδραιωθεί το IoT, είναι σημαντικό να ορίσουμε τα βασικά θεμελιώδη χαρακτηριστικά που το διέπουν.

1. Διασυνδεσιμότητα (*Interconnectivity*)

Με τον συγκεκριμένο ορισμό, εννοούμε την δυνατότητα διασύνδεσης των αντικειμένων μεταξύ τους μέσω κεντρικών ενσύρματων ή ασύρματων δικτύων, σε ένα παγκόσμιο σύστημα επικοινωνιών και πληροφορικής. Χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα πρωτόκολλα όπως Wi-Fi, Zigbee, LoRa, Bluetooth & NB-IoT και δίκτυα 5G ή LPWAN (Low Power Wide Area Network).

2. Ετερογένεια (*Heterogeny*)

Το IoT είναι ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα που θίγουν το ζήτημα της ετερογένειας, καθώς περιέχει μια εκ φύσεως πληθώρα διαφορετικών συσκευών. Ο κύριος στόχος του IoT είναι η δημιουργία ενός κοινού τρόπου εξάλειψης της ετερογένειας αυτών των συσκευών και την επίτευξη της βέλτιστης εκμετάλλευσης της λειτουργικότητάς τους. Είναι γνωστό πως η ετερογένεια αυτή εντοπίζεται όχι μόνο στο δίκτυο στο οποίο συνδέονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αλλά και ως προς το υλικό τους. Έτσι, συσκευές οι οποίες προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές, χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Τα πρότυπα MQTT, CoAP, HTTP/REST API επιτυγχάνουν τη συμβατότητα μεταξύ των ετερόκλητων αυτών συσκευών.

3. Ευφυΐα (Intelligence)

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των IoT συστημάτων είναι το γεγονός ότι τα αντικείμενα διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες και ελεγκτές. Με αυτόν τον τρόπο, τους δίνεται η δυνατότητα να διενεργούν αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων και λήψη αποφάσεων. Για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιούνται τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning) και τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence) για την επίτευξη των ανωτέρω, χωρίς ανθρώπινες παρεμβάσεις.

4. Συλλογή και ανάλυση δεδομένων (Data collection and analysis)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα αντικείμενα διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες οι οποίοι συλλέγουν, επεξεργάζονται και αποθηκεύουν αδιάλειπτα δεδομένα. Για την επίτευξη του παραπάνω μηχανισμού, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη συστημάτων με ισχυρή υπολογιστική ισχύ. Έτσι, οι αισθητήρες έχουν την δυνατότητα να στέλνουν τα δεδομένα σε cloud περιβάλλοντα ή edge computing πλατφόρμες, προκειμένου να υλοποιηθούν οι περίπλοκες αυτές αναλύσεις.

5. Ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Efficiency)

Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες και μικροελεγκτές που διαθέτουν τα αντικείμενα μπορούν και στέλνουν σε υποδομές cloud συνεχώς δεδομένα. Αυτό έχει ως φυσικό επακόλουθο τη διαρκή κατανάλωση ενέργειας. Για να μπορέσει να γίνει εφικτή η αποστολή και η λήψη δεδομένων με βιώσιμο τρόπο, απαιτείται να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές IoT χρησιμοποιούν χαμηλής ισχύος δίκτυα LPWAN για να εξοικονομείται ενέργεια. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η συλλογή ενέργειας, εξασφαλίζουν την ενεργειακή αυτονομία με ηλιακή ή περιβαλλοντική ενέργεια. Η παραπάνω τεχνολογία είναι γνωστή στην επιστημονική κοινότητα ως *Energy Harvesting*.

6. Ασφάλεια και ιδιωτικότητα (Security and privacy)

Το IoT, λόγω ότι προσφέρει υψηλά επίπεδα αυτονομίας, το καθιστά «ελκυστικό» σε κυβερνοεπιθέσεις. Εξαιτίας αυτού, η κρυπτογράφηση των δεδομένων γίνεται επιτακτική ανάγκη. Το παραπάνω υλοποιείται με χρήση τόσο AES (Advanced Encryption Standard), όσο και με TLS/SSL (Transport Layer Security/Secure Sockets Layer), ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται και ταυτοποίηση μέσω Blockchain, καθώς τηρούνται όλα τα απαραίτητα πρότυπα προστασίας προσωπικών δεδομένων GDPR, ISO/IEC 27001.

7. Δυναμικές αλλαγές (Dynamic Changes)

Οι συσκευές πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν δυναμικά την κατάσταση λειτουργίας τους.

8. Επεκτασιμότητα (Scalability)

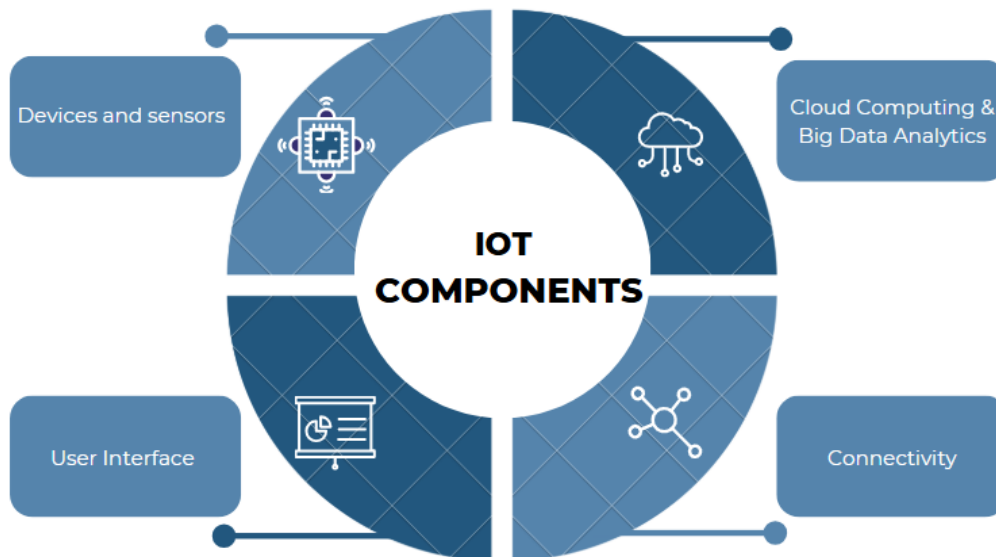
Τα IoT συστήματα από τη φύση τους καλούνται να διαχειριστούν εκατομμύρια συσκευές. Έτσι, θα πρέπει να μπορούν να είναι επεκτάσιμα μέσω cloud computing.

2.1.4. Απαιτήσεις IoT

Η έλευση των συστημάτων IoT, ως μια νέα επαναστατική τεχνολογία, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων θεμάτων που χρήζουν επίλυση. Η τόσο εκτεταμένη διασύνδεση ολόκληρου του

οικοσυστήματος των συσκευών αναπόφευκτα εγείρει ανησυχίες σχετικά με την τροφοδοσία του. Οι IoT συσκευές, μιας και λειτουργούν με δίκτυα, χρησιμοποιούν εξοπλισμό ο οποίος δεν συνδέεται απευθείας σε κάποια πηγή (λόγου χάριν, το ηλεκτρικό ρεύμα), αλλά κατέχουν εξοπλισμό χαμηλής κατανάλωσης με ενσωματωμένη τροφοδότηση από μπαταρία. (Elijah, Rahman , Orikumhi, & Leow, 2018) Βέβαια, δεν είναι η πρώτη φορά που η επιστημονική κοινότητα καλείται να αντιμετωπίσει τέτοιας φύσεως ζητήματα. Οι αριθμομηχανές, τα τηλεχειριστήρια, τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί υπολογιστές αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα συσκευών με χρήση τροφοδοσίας που απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. (Boyle, Everett, & Ramage, Energ Systems and Sustainability, 2004) Η ειδοποιός διαφορά, όμως, των συσκευών που χρησιμοποιούνται στα IoT συστήματα με τις παραπάνω συσκευές, είναι σαφώς στο ότι τα πρώτα επικοινωνούν μεταξύ τους και στέλνουν αλληπάλληλα δεδομένα. Αποτελούν, λοιπόν, ένα συγκεκριμένο σύνολο συσκευών, όπου λειτουργούν χωρίς παρέμβαση χρήστη, και για τη λειτουργία τους απαιτούνται τα παρακάτω: (α) Δυναμική ζήτηση πόρων, (β) ανάγκες εκφρασμένες σε πραγματικό χρόνο, (γ) εκθετική αύξηση στη ζήτηση, (δ) προστασία προσωπικών δεδομένων χρήστη και διασφάλιση του απορρήτου του, (ε) διαθεσιμότητα εφαρμογών, (στ) αποτελεσματική κατανάλωση ενέργειας και (ζ) πρόσβαση σε ανοιχτό διαλειτουργικό σύστημα υποδομής cloud (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013).

Τα κύρια στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα προϋπόθεση για την απρόσκοπτη λειτουργία ενός IoT συστήματος είναι το hardware, middleware και η παρουσίαση στον τελικό χρήστη. Στο *hardware* (υλικό) περιλαμβάνονται αισθητήρες, ενεργοποιητές (actuators), κάμερες κ.λπ. Μέσα από αυτά, συλλέγονται τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν και καταγράφουν δεδομένα θερμοκρασίας, υγρασίας, κίνησης, κατανάλωσης κ.λπ. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν ενσωματωμένα διάφορα επικοινωνιακά υλικά, με σκοπό τη συνδεσιμότητα μεταξύ τους. Το *middleware* περιλαμβάνει εργαλεία αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων προς ανάλυση. Είναι ένα ενδιάμεσο λογισμικό και λειτουργεί ως «συνδετικός κρίκος» σε ποικιλόμορφα συστήματα, εφαρμογές και συσκευές. Μέσω αυτού, επιτυγχάνεται η συλλογή, η επεξεργασία και η αποθήκευση των δεδομένων, χρησιμοποιώντας cloud computing και Big Data Analytics. Τέλος, η παρουσίαση στον τελικό χρήστη αφορά εργαλεία οπτικοποίησης και ερμηνείας των δεδομένων. (Motlagh, Mohammadrezaei, & Hunt, 2020)



Γράφημα 1 - Χαρακτηριστικά IoT συστήματος, ιδία επεξεργασία

2.1.5 IoT: Οφέλη και προκλήσεις

Το IoT, όπως έχει γίνει αντιληπτό, είναι μια νέα πολλά υποσχόμενη τεχνολογία η οποία μπορεί να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση διεργασιών της καθημερινότητας, τόσο σε ατομικό, όσο σε επιχειρησιακό και κοινωνικό επίπεδο. Καθώς δεν περιορίζεται μόνο σε επικοινωνιακές βελτιστοποιήσεις μεταξύ συσκευών, αλλά διευρύνεται στην αποδοτική επικοινωνία ανθρώπων με συσκευές μέσω έξυπνων συστημάτων, το IoT προσφέρει ποικίλα πλεονεκτήματα σε διάφορους τομείς.

Πιο αναλυτικά, έχει αποδειχθεί πως οι παραδοσιακές αναλύσεις υποφέρουν σημαντικά από έλλειψη ακρίβειας και επικοινωνίας, με αποτέλεσμα τη μη ενεργή επικοινωνία μεταξύ επιχείρησης και πελάτη. Μέσω του IoT, η επικοινωνία διενεργείται πάντα και παντού, βελτιστοποιώντας τη διαδικασία αυτήν. Η μόνιμη ανατροφοδότηση που προσφέρεται μέσω της σύνδεσης των συσκευών με τους ανθρώπους παρέχει ένα τεράστιο όγκο δεδομένων και πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας έτσι στις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται, να αναλύουν και, τελικά, να κατανοούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις ανάγκες των πελατών τους, αντιδρώντας πιο άμεσα (Madakam, Ramaswamy, & Tripathi, 2015).

Επιπλέον, η δυνατότητα για σύνδεση και απομακρυσμένο έλεγχο των συσκευών αυξάνει την αποδοτικότητα και τον δείκτη αυτοματοποίησης, μειώνοντας σημαντικά την ανθρώπινη παρέμβαση. Κατά τινά τρόπο, η απομακρυσμένη σύνδεση επωφελεί και άλλους τομείς, όπως η ελαχιστοποίηση των λαθών και η μείωση του κόστους λειτουργίας των επιχειρήσεων, μέσω της εις βάθος ανάλυσης δεδομένων που προσφέρουν τα IoT συστήματα. Μερικοί ακόμα τομείς στους οποίους το IoT έχει ευεργετικές επιπτώσεις είναι σαφώς η ενίσχυση της ασφάλειας. Τα συστήματα παρακολούθησης και ανίχνευσης κινδύνων μέσω μηχανισμών προληπτικής συντήρησης ενισχύουν σημαντικά την αξιοπιστία και την ασφάλεια.

Σημαντικότερο όλων, όμως, είναι η συμβολή του IoT στη διαχείριση αλλά και τη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Διεξοδικότερα, τα έξυπνα δίκτυα ενέργειας (Smart Grids) και οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε αυτά βοηθούν στην επεξεργασία και την ανάλυση των δεδομένων κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται εποπτεία και ταχύτατη απόκριση σε διάφορες μεταβολές χρήσης, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση εκπομπών ρύπων στο περιβάλλον αλλά και σημαντική εξοικονόμηση φυσικών (και μη) πόρων. Κατά τινά τρόπο, μέσω των εργαλείων που είναι διαθέσιμα για ενημέρωση και παρέμβαση (όπως mobile applications), καθίσταται δυνατή η βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Στον αντίποδα, εγείρονται σημαντικά θέματα και προβληματισμοί οι οποίοι αφορούν —μεταξύ άλλων— ζητήματα ασφάλειας και προσωπικών δεδομένων. Η εκτεταμένη χρήση των διασυνδεδεμένων συσκευών, χωρίς την ύπαρξη των απαραίτητων μοντέλων κρυπτογράφησης και πρωτοκόλλων επικοινωνίας, αυξάνει τις πιθανότητες για ενδεχόμενες επιθέσεις. Τα IoT οικοσυστήματα, παρόλο τα μέτρα ασφαλείας που είναι απαραίτητα να λαμβάνονται, έχουν εξαιρετικά μικρό έλεγχο, αφήνοντας έτσι τα δεδομένα των χρηστών εκτεθειμένα.

Τέλος, τα IoT συστήματα χαρακτηρίζονται από τον υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας τους, καθώς χιλιάδες συσκευές διασυνδέονται με σκοπό να ανταλλάσσουν και να επεξεργάζονται δεδομένα. Ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και η συντήρηση ενός τέτοιου είδους οικοσυστήματος, απαιτεί χρήση πολλαπλών τεχνολογιών. Έτσι, ένα από τα πιο κοινά προβλήματα που καλείται να αντιμετωπιστεί είναι η έλλειψη των κοινών προτύπων μεταξύ των κατασκευαστών. (Zainab, Hesham, & Mahmoud, 2015). Επιπλέον, η εγκατάσταση τέτοιων υποδομών μπορεί να είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, κυρίως για μικρές επιχειρήσεις και οικιακούς χρήστες, κάτι που αυξάνει το κόστος της αρχικής επένδυσης και δυσχεραίνει την ευρεία υιοθέτησή τους.

2.1.6 Σύγκριση IoT με παραδοσιακά δίκτυα

Η νέα επαναστατική τεχνολογία του IoT περιβάλλοντος σηματοδότησε και την εναρκτήρια βάση μιας νέας εποχής στις τηλεπικοινωνίες. Παρόλο που τα παραδοσιακά δίκτυα όπως το *Διαδίκτυο των Ανθρώπων (Internet of People: IoP)* όσο και τα *Ασύρματα Αισθητηριακά Δίκτυα (Wireless Sensor Network: WSN)* αποτέλεσαν τα θεμέλια του IoT, παρουσιάζουν ομοιότητες, αλλά ταυτόχρονα και σημαντικές διαφορές σε αρκετούς τομείς, όπως στην αρχιτεκτονική αλλά και τη λειτουργία τους.

Κατά την πρώτη φάση του, το IoT ήρθε σε μεγάλη αντιπαράθεση με τις έως τότε γνωστές παραδοσιακές αντιλήψεις που αφορούσαν τα δίκτυα. Σίγουρα μπορεί να θεωρηθεί ως μια εξελικτική επέκταση του κλασικού δικτύου που είχε ως βάση το διαδίκτυο, αλλά διαφέρει σημαντικά από το IoP και από τα WSN, παρόλο που το IoT τα είχε ως εναρκτήρια βάση του. Έτσι, πολύ συνοπτικά, το IoT μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$IoT = \text{Διαδίκτυο} + WSN$$

Ωστόσο, με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία που αναφέρεται στο περιβάλλον του IoT, υποστηρίζεται το γεγονός ότι η παραπάνω θεώρηση είναι εσφαλμένη για δύο βασικούς λόγους:

1. Το IoT δεν απαιτεί απαραίτητα τη χρήση της διευθυνσιοδότησης IP σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς από τη φύση του IoT χρησιμοποιούνται ελαφριά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Έτσι, η πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου TCP/IP δεν είναι η βέλτιστη, ειδικά όταν το IoT λειτουργεί με μικρές έξυπνες συσκευές.
2. Το περιβάλλον του IoT βασίζεται κυρίως στη σύνδεση έξυπνων αντικειμένων, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα. Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά κάτι περισσότερο από μια απλή επέκταση του Διαδικτύου, καθώς η λειτουργία του IoT εξαρτάται από τη δημιουργία διαλειτουργικών συστημάτων.

Με βάση τα ανωτέρω επιχειρήματα, η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να διορθωθεί ως εξής:

$$IoT = \text{Διαδίκτυο} + WSN + \text{Έξυπνα Αντικείμενα περικυκλωμένα από Έξυπνο Περιβάλλον}$$

Παρόλο που το IoT, το Διαδίκτυο και τα WSN μοιράζονται ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, διαφέρουν σημαντικά ως προς την αρχιτεκτονική, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τη λειτουργία τους (Kumar & Smys, 2018).

1. Πρωτόκολλα επικοινωνίας (*Communication Protocols*)

Τα συστήματα IoT και WSN χρησιμοποιούν *ελαφριά πρωτόκολλα επικοινωνίας (lightweight protocols)* τα οποία αποφέρουν τη μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα και είναι ιδανικά για συσκευές με περιορισμένους πόρους. Εν αντιθέσει, το διαδίκτυο βασίζεται στο σύνολό του, κατά κύριο λόγο, σε πρωτόκολλα TCP/IP.

2. Εμβέλεια Κάλυψης (*Scale of degree area*)

Τα WSN δίκτυα, επειδή αποτελούνται από κόμβους αισθητηρίων, επικοινωνούν κυρίως τοπικά, με αποτέλεσμα να εξυπηρετούν περιορισμένη εμβέλεια. Στον αντίποδα, το δίκτυο IoT και το διαδίκτυο καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών περιοχών.

3. Δικτυακή προσέγγιση και ταυτοποίηση αντικειμένων (*Networking Approach*)

Η λειτουργία των συστημάτων IoT και WSN βασίζονται στην ταυτοποίηση των αντικειμένων. Πιο συγκεκριμένα, η ταυτοποίηση αυτή για τα IoT συστήματα, αποτελεί βασική προϋπόθεση, ενώ τα δίκτυα WSN λειτουργούν αυτο-οργανωτικά και έχουν εξίσου τη δυνατότητα ταυτοποίησης αντικειμένων. Από την άλλη, το διαδίκτυο δεν προϋποθέτει κάποιου είδους ταυτοποίηση.

4. Τύπος κόμβων και σχεδιασμός δικτύου (*Type of nodes*)

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ διαδικτύου και IoT συστήματος είναι η λειτουργία των κόμβων. Στο διαδίκτυο οι κόμβοι είναι ενεργοί και περιέχουν σταθερά αντικείμενα, ενώ στο IoT μπορούν εκτός από ενεργοί να είναι και παθητικοί, καθώς περιλαμβάνει αισθητήρες WSN και δυναμικές συσκευές ενσωματωμένα σε ένα ευφύες περιβάλλον.

5. Συμπεριφορά και Χρόνος Δικτύωσης (*Behavior and Networking Time*)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το διαδίκτυο περιλαμβάνεται από σταθερά αντικείμενα, άρα εμφανίζει και σταθερή συμπεριφορά. Αντίθετα, τα δίκτυα IoT και WSN έχουν μια πιο δυναμική

συμπεριφορά. Τέλος, σχετικά με τη χρονική διάρκεια δικτύωσης και τα τρία μοντέλα θεωρούνται απεριόριστα, όμως το IoT σύστημα απαιτεί συγχρονισμό χρονισμού για την μέγιστη αποτελεσματική λειτουργία του.

2.1.7 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα IoT συστήματα

RFID (Radio Frequency Identification)

Ως RFID (Radio Frequency Identification) ορίζουμε την τεχνολογία κατά την οποία τα αντικείμενα μπορούν να αναγνωρίζονται, να ταυτοποιούνται και να παρακολουθούνται μέσω του διαδικτύου. Η αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα IoT συστήματα, μιας και διευκολύνει την αυτόματη μετάδοση των μοναδικών χαρακτηριστικών και στοιχείων ενός φυσικού αντικείμενου (π.χ. SN/Serial Number), μέσω ραδιοκυμάτων. Το RFID είναι η πιο εύκολη τεχνολογία μεταφοράς φυσικών αντικείμενων στον Κυβερνοχώρο, καθώς περιλαμβάνει τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες υπολογιστών και επικοινωνιών, όπως υποστήριξη απομακρυσμένης επικοινωνίας και μετάδοσης δεδομένων. Η ευρεία ενσωμάτωση των τεχνολογιών RFID σε έξυπνα δίκτυα (smart grids) και αισθητήρες επιτρέπει την εποπτεία των δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποστέλλονται στο σύστημα και γίνονται αρωγοί στην προσπάθεια αποδοτικότερης χρήσης των διαθέσιμων πόρων και εξοικονομώντας ενέργεια, οδηγώντας τελικά σε ενεργειακή αυτονομία. Η τεχνολογία RFID, όμως, εκτείνεται και σε βιομηχανικό επίπεδο, όπου εκεί βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε υποδομές smart city, μετρητές ενέργειας και σε συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας, βελτιώνοντας έτσι τόσο την ποιότητα ζωής, όσο και την ενεργειακή κατανάλωση, μιας και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα ενεργειακά αυτόνομο οικοσύστημα (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013).

Η ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων διέπεται από ένα πληροφοριακό σύστημα το οποίο έχει τέσσερα βασικά στοιχεία:

1. Ετικέτα (tag)
2. Αναγνώστη (reader)
3. Ενδιάμεσο λογισμικό (middleware)
4. Εκτυπωτής (printer)

Ετικέτες (tags)

Οι ετικέτες (tags) συνήθως είναι τοποθετημένες επάνω στο φυσικό αντικείμενο που θέλουμε να παρακολουθήσουμε/αναγνωρίσουμε. Η αναγνώριση αυτή επιτυγχάνεται μέσω κεραίας από την οποία εκπέμπεται ένας μοναδικός κωδικός αναγνώρισης EPC (Electronic Product Code). Ο κωδικός αυτός έχει μια συχνότητα η οποία περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτείται να γνωρίζουμε για το αντικείμενο που παρακολουθούμε. Ανάλογα με τον τρόπο που ολοκληρώνεται η επικοινωνία των αναγνώστών και των ετικετών, υπάρχουν τρεις διακριτές κατηγορίες ετικέτας

1. Ενεργές ετικέτες: Μεταδίδουν την πληροφορία χωρίς κάποια περαιτέρω ενέργεια από τον πομποδέκτη, καθώς διαθέτει τη δική της μπαταρία για να επιτρέπει την επικοινωνία
2. Παθητικές ετικέτες: Μεταδίδουν την πληροφορία μόνο όταν βρίσκονται στο πεδίο του πομποδέκτη και αντλούν ενέργεια από το σήμα του αναγνώστη

3. Ημι-ενεργή ετικέτα: Μεταδίδουν την πληροφορία όπως οι παθητικές ετικέτες, απλώς κατέχουν μπαταρία με σκοπό να διαχέουν σήματα με μεγαλύτερη ισχύ από την πληροφορία που περιέχουν.

Αναγνώστες (readers)

Η λειτουργία του αναγνώστη αποτελείται κυρίως από την εκπομπή κυμάτων ραδιοσυχνότητας, η οποία λαμβάνεται από τις ετικέτες που έχουν τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται σε αυτήν τη συγκεκριμένη συχνότητα που εκπέμπεται. Η λήψη του σήματος ολοκληρώνεται μέσω της κεραίας, μεταδίδοντας κατά τινά τρόπο τις πληροφορίες που περιέχουν. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να «διαβάζουν» δεδομένα από τις ετικέτες, ακόμα και να καταγράφουν πληροφορίες σε κάρτες.

Ενδιάμεσο λογισμικό (middleware)

Το ενδιάμεσο λογισμικό IoT είναι λογισμικό που βρίσκεται μεταξύ του υλικού και των επιπέδων εφαρμογών σε ένα σύστημα IoT, παρέχοντας ένα σύνολο υπηρεσιών και λειτουργιών για τη διαχείριση της επικοινωνίας και της αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών συσκευών, πλατφορμών και εφαρμογών IoT. Το ενδιάμεσο λογισμικό IoT είναι ουσιαστικά ο συνδετικός κρίκος που συνδέει διαφορετικά στοιχεία ενός συστήματος IoT, επιτρέποντάς τους την αδιάλειπτη επικοινωνία και ανταλλαγή χρήσιμων πληροφοριών.

Εκτυπωτές

Στο σύστημα RFID οι εκτυπωτές αφορούν ειδικές εξειδικευμένες συσκευές οι οποίες μπορούν να εκτυπώνουν οπτικά δεδομένα πάνω στις ετικέτες RFID αλλά και να κάνουν εγγραφή όλων των απαραίτητων πληροφοριών στο ενσωματωμένο μικροτσίπ, ενώνοντας έτσι τον ψηφιακό με τον φυσικό κόσμο.

Πρωτόκολλο Διαδικτύου IP

Το πρωτόκολλο IP είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας που αφορά τη μετάδοση πακέτων δεδομένων μέσα σε ένα δίκτυο. Μέσω αυτού, επιτυγχάνεται η δρομολόγηση των πακέτων, ο καθορισμός της μορφής τους αλλά και οι μηχανισμοί προώθησης πακέτων από έναν υπολογιστή προς τους δρομολογητές. Για τον λόγο αυτόν, κύριο χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου IP είναι οι μέθοδοι διευθυνσιοδότησης και δομές για ενθυλάκωση πακέτων δεδομένων. Έτσι, η κυριότερη χρήση του είναι η απονομή διευθύνσεων σε κόμβους με σκοπό τη δρομολόγηση πακέτων από έναν υπολογιστή σε τελικό προορισμό κατά μήκος ενός ή περισσότερων δικτύων.

Υπάρχουν δύο εκδόσεις IP οι οποίες επικρατούν μέχρι και σήμερα: η IPv4 και η IPv6. Η IPv4 ήταν και η πρώτη έκδοση ευρείας κλίμακας όμως, εξαιτίας της μεγάλης ζήτησης των διευθύνσεων και της ολοένα και μεγαλύτερης ανάγκης για ταχύτερη ζώνη (bandwidth), αναπτύχθηκε η νέα έκδοση IPv6. Η δομή του κάθε πακέτου IP περιλαμβάνει μια κεφαλίδα και ύστερα τα δεδομένα. Έτσι, το πρωτόκολλο

IP παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του IoT, επιτρέποντας τη διασύνδεση εκατομμυρίων έξυπνων συσκευών σε παγκόσμια κλίμακα.

EPC (Electronic Product Code)

Το EPC αφορά τον ηλεκτρονικό κωδικό του προϊόντος ο οποίος αφορά στην ουσία την ηλεκτρονική καταγραφή μιας ετικέτας RFID. Αποτελείται από έναν κωδικό 64 ή 98 bit, και στοχεύει στη σχεδίαση βελτίωσης στο σύστημα του γραμμικού κώδικα EPC. Καταγράφει χρήσιμες πληροφορίες, οι οποίες προσδιορίζουν ένα αντικείμενο μοναδικά, όπως σειριακό αριθμό, προδιαγραφές, πληροφορίες κατασκευαστή κ.λπ.

Barcode

Το barcode αποτελεί έναν κώδικα «γραμμωτό», ο οποίος χρησιμοποιεί συνδυασμό ράβδων και διαστημάτων διαφορετικού πλάτους ώστε να ξεχωρίζει μοναδικά τα αντικείμενα. Είναι στην ουσία ετικέτες οι οποίες μπορούν να αναγνωστούν οπτικά από μηχανές οι οποίες έχουν τη δυνατότητα καταγραφής χρήσιμων πληροφοριών, οι οποίες αφορούν το εκάστοτε αντικείμενο.

WSN (Wireless Sensor Network)

Το WSN (Wireless Sensor Network), ή αλλιώς το Δίκτυο Ασύρματων Αισθητήρων, αποτελεί ίσως και την πιο σημαντική τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε IoT συστήματα. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από πολλούς κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν και αναγνωρίζουν αντικείμενα. Τα συγκεκριμένα αισθητήρια καλούνται να συλλέξουν ακατέργαστα δεδομένα από το πεδίο, να τα μεταδώσουν τα δεδομένα αυτά και να τα αναλύσουν. Από την άλλη μεριά, οι κόμβοι - οι οποίοι μπορούν και λειτουργούν αυτόνομα με μεταξύ τους αυτο-οργάνωση - προωθούν τα δεδομένα σε έναν σταθμό βάσης όπου εκεί αρχίζει και η παρακολούθηση των αντικειμένων. Για να επιτευχθεί το παραπάνω, τα κύρια χαρακτηριστικά που διέπουν το WSN είναι η μονάδα επεξεργασίας, επικοινωνίας και ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό του WSN περιέχει ποικίλες διεπαφές αισθητήρων, επεξεργαστές, πομποδέκτες και τροφοδοτικά.

Wi-Fi

Το δίκτυο WI-Fi (Wireless Fidelity), είναι μια τεχνολογία δικτύου η οποία επιτρέπει σε υπολογιστές να επικοινωνούν με άλλες συσκευές ασύρματα. Στις πρώιμες φάσεις του, τα αντικείμενα που χρησιμοποιήσουν τη συγκεκριμένα τεχνολογία καλούνται WaveLAN, και είχαν ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας με ταχύτητες 1-2 Mbps. Πλέον το WI-Fi δίνει τη δυνατότητα υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητας (WLAN) σε εκατομμύρια χρήστες, γι' αυτό άλλωστε και χρησιμοποιείται αρκετά σε δίκτυα IoT όπου είναι εφικτό.

Bluetooth

Η τεχνολογία Bluetooth, είναι μια ασύρματη εξαιρετικά χαμηλού κόστους τεχνολογία ραδιοφώνου με μικρή εμβέλεια. Χρησιμοποιεί προδιαγραφές προτύπων IEEE 802.15.1, το οποίο καθιστά δυνατή την

επικοινωνία των δεδομένων με λιγότερα από 1 Mbps, δημιουργώντας PANs (Personal Area Networks), μέσω του κοινού καναλιού επικοινωνίας των συσκευών - γνωστό και ως Piconet. Το παραπάνω, επιτρέπει την κοινή χρήση δεδομένων ανάμεσα σε 2-8 συσκευές ταυτόχρονα.

Πρωτόκολλο ZigBee

Το πρωτόκολλο ZigBee, δημιουργήθηκε με σκοπό να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά που διέπουν τα WSN. Προσφέρει χαμηλό κόστος, χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε μικρή εμβέλεια - περίπου τα 100 μέτρα και εύρος ζώνης 200- 250 kbps. Ωστόσο είναι αρκετά επεκτάσιμο και αξιόπιστο και δίνει την δυνατότητα ευέλικτης σχεδίασης του πρωτοκόλλου. Οι τομείς που βρίσκει ευρεία εφαρμογή είναι ο οικιακός αυτοματισμός, η γεωργία, οι βιομηχανικές παραγωγές και η ιατρική παρακολούθηση.

NFC (Near Field Communication)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπει την επικοινωνία δύο συσκευών οι οποίες όμως θα βρίσκονται πολύ κοντά ή μια στην άλλη. Με αυτό τον τρόπο μπορούν και αλληλεπιδρούν και ανταλλάσσουν πληροφορίες. Σε αντιπαράθεση με τις τεχνολογίες Bluetooth & Wi-Fi, οι οποίες είχαν τη σύζευξη ως απαραίτητη προϋπόθεση. συχνότητα λειτουργίας της τεχνολογίας NFC είναι τα 13.56 MHz ενώ υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως και 424 Kbps. Η απόσταση που μπορούν να αλληλεπιδράσουν δύο NFC συσκευές θεωρητικά είναι τα 20 εκατοστά.

Actuators - Ενεργοποιητές

Τα actuators είναι συσκευές οι οποίες οδηγούν τις κινήσεις σε μηχανικά συστήματα, μετατρέποντας την ενέργεια σε κίνηση. Για την χρήση τους απαιτείται ενέργεια είτε από υδραυλικό υγρό, ηλεκτρικό ρεύμα ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Έχουν την δυνατότητα να διενεργήσουν οποιαδήποτε κίνηση, και για τον λόγο αυτό βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στον βιομηχανικό και τον κατασκευαστικό τομέα. Έτσι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Ηλεκτρικοί ενεργοποιητές: κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος, βηματικοί κινητήρες, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες
- Υδραυλικοί: χρησιμοποιούν υδραυλικό υγρό για την ενεργοποίηση της κίνησης
- Πνευματικοί: χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα για την ενεργοποίηση της κίνησης.

Beacon

Εξίσου σημαντική είναι η τεχνολογία των beacon. Αποτελείται από μικρές ασύρματες συσκευές/μικροπομποί που μεταδίδουν συνεχώς ένα απλό ραδιοφωνικό σήμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το σήμα μπορεί να διαβαστεί από τα smartphones που χρησιμοποιούν τεχνολογία Bluetooth Low Energy (BLE). Όταν η κινητή συσκευή ανιχνεύει το σήμα Beacon, διαβάζει τον αριθμό αναγνώρισης του πομπού (ID), υπολογίζει την απόσταση από το πομπό και, με βάση αυτά τα δεδομένα, ενεργοποιεί την εφαρμογή του κινητού. Πρόκειται για μια Real-time επικοινωνία με τους χρήστες. Προσφέρει άμεση και σε πραγματικό χρόνο πρόσβαση στις παρεχόμενες υπηρεσίες οποιαδήποτε στιγμή.

Narrowband IoT (NB-IoT)

Η διασύνδεση των συσκευών στο IoT σύστημα, αρχικά έγινε μέσω κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη τεχνολογία είχε αρκετούς περιορισμούς σχετικά με την ταυτόχρονη υποστήριξη χιλιάδων συσκευών. Έτσι αναπτύχθηκε η τεχνολογία NarrowBand IoT, η οποία επιτρέπει τη ταυτόχρονη σύνδεση πολλών συσκευών μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας και υπόσχεται χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.

2.1.8 Τομείς εφαρμογής IoT συστημάτων

Η τεχνολογία του IoT στη σύγχρονη καθημερινότητα αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι, μιας και η ευρεία εφαρμογή του έχει κατακλύσει τους περισσότερους τομείς (Jindal & Jamar, 2018).

Βιομηχανία

Η συμβολή του IoT στην βιομηχανική παραγωγή, μεταφράζεται μέσω της αυτόματης αναγνώρισης προϊόντων χρησιμοποιώντας τεχνολογίες RFID, εποπτείας και συντήρησης μηχανημάτων με ενσωματωμένους αισθητήρες παρέχοντας έγκυρη και έγκαιρη παρακολούθηση των βιομηχανικών asset.

Εφοδιαστική αλυσίδα

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου εφαρμόζονται πρακτικές IoT είναι οι αλυσίδες εφοδιασμού. Εκεί δίνεται πλέον η δυνατότητα για έξυπνη και ασφαλή μεταφορά των προϊόντων, αφού επιτυγχάνεται η διαχείριση του στόλου, η παρακολούθηση εμπορεύματος, η εποπτεία των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν κατά τη διακομιδή, καθώς και ο έλεγχος των ευπαθών υλικών. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ποιότητα των προϊόντων καθώς και η ασφαλή μεταφορά τους, μιας και υπάρχουν δεδομένα πραγματικού χρόνου τα οποία βοηθούν σημαντικά στη βελτιστοποίηση αποφάσεων από τις εταιρείες.

Ιατρική

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρουν τα IoT συστήματα είναι η παρακολούθηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιου είδους πληροφορίες κρίνονται εξαιρετικά κρίσιμες στον ιατρικό κλάδο και στον τομέα της υγείας, καθώς η τεχνολογία των αισθητήρων παρέχει την απαραίτητη πληροφόρηση για δείκτες όπως καρδιακός σφυγμός, αρτηριακή πίεση, θερμοκρασία κ.λπ. Επίσης, μπορεί και γίνεται εύκολη η ταυτοποίηση της φαρμακευτικής αγωγής, γι' αυτό και χρησιμοποιείται κατά κόρον από νοσοκομεία, συστήματα παρακολούθησης υγείας από χρήστες αλλά και σε μονάδες φροντίδας ηλικιωμένων.

Γεωργία

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται ευρεία χρήση συστημάτων IoT και στον τομέα της γεωργίας. Μέσω αυτού καθίσταται δυνατή η εποπτεία των ζώων αλλά και των φυτών χρησιμοποιώντας τεχνικές precision agriculture για παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών στο πεδίο. Οι αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι εκεί, συλλέγουν τα δεδομένα και δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για την

ευημερία των οργανισμών. Έτσι, ο κάθε παραγωγός/ καλλιεργητής γνωρίζει ανά πάσα ώρα και στιγμή τι συνθήκες επικρατούν, και λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις ώστε να ελαχιστοποιήσει τις ζημιές.

Συγκοινωνιακό δίκτυο

Οι τεχνολογίες RFID που χρησιμοποιούνται μέσα στο IoT σύστημα, θα παρέχει real-time πληροφόρηση στους οδηγούς, που θα βελτιώνουν την συνολική εμπειρία του και θα τον βοηθούν στην αποτροπή σοβαρών τροχαίων ατυχημάτων.

Smart Grids

Ο συγκεκριμένος τομέας περιλαμβάνει ένα έξυπνο οικόσυστημα και αποτελείται από δίκτυα, μετρητές κλ.π. Ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να συλλέξει δεδομένα και με τους κατάλληλους αλγορίθμους να συμβάλει στην βελτιστοποίηση των αποφάσεων, χαρίζοντας πιο αποδοτική καθημερινότητα στους ανθρώπους που αποτελούν μέρος του συγκεκριμένου συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι έξυπνοι μετρητές, που βοηθούν την επικοινωνία μεταξύ χρήστη και προμηθευτών ενέργειας. Έτσι επιτυγχάνεται η αποτελεσματική και οικονομικότερη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, αφού σκοπεύει στην έξυπνη παραγωγή, διανομή και χρήση της ενέργειας.

Περιβαλλοντική προστασία

Η χρήση IoT συστημάτων μπορεί και δίνει τη δυνατότητα για αδιάκοπη συλλογή και ανάλυση δεδομένων, όπως για παράδειγμα στην παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών, την καταγραφή των επιπέδων της ακτινοβολίας, την εποπτεία της κατάστασης των ακτών και των θαλάσσιων κυμάτων καθώς και τον έλεγχο της στάθμης των ποταμών. Επίσης δίνει τη δυνατότητα ανίχνευσης της ρύπανσης τόσο στα υδάτινα συστήματα όσο και στο έδαφος, και συμβάλλει στην έγκαιρη πρόβλεψη των δασικών πυρκαγιών.

Smart Cities - Έξυπνες Πόλεις

Οι έξυπνες πόλεις χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) για να προσφέρουν βελτιωμένες υπηρεσίες και αυξημένη ασφάλεια στους πολίτες, μειώνοντας παράλληλα το ενεργειακό κόστος. Μέσω αισθητήρων σε οχήματα, φωτιστικά σώματα και κάδους απορριμμάτων, συλλέγονται δεδομένα που διευκολύνουν την καθημερινότητα και ενισχύουν την αποδοτικότητα των υποδομών. Παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν τον έξυπνο φωτισμό, ο οποίος ρυθμίζεται αυτόματα ανάλογα με το φως, την κίνηση ή τις καιρικές συνθήκες, καθώς και την παροχή προσωποποιημένων υπηρεσιών σε άτομα με αναπηρίες μέσω τεχνολογιών όπως τα beacon. Επιπλέον, οι "έξυπνες" στάσεις προσφέρουν σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες για τις δημόσιες συγκοινωνίες, αναδεικνύοντας τη συμβολή του IoT στη δημιουργία πιο λειτουργικών και προσβάσιμων αστικών περιβαλλόντων.

2.2 Ενεργειακή αυτονομία και στρατηγικές επιτεύγματος στην Ελλάδα

Τα τελευταία χρόνια, οι κοινωνικο-οικονομικές αναταραχές, οι γεωπολιτικές εντάσεις και η επιτακτική ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη, θίγουν όλο και περισσότερο θέματα βελτιστοποίησης ενεργειακής κατανάλωσης και ενεργειακής αυτονομίας, καθώς με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των σοβαρών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμια κλίμακα. Έτσι, ενισχύεται η ενεργειακή ασφάλεια των χωρών στην προσπάθειά τους για ενεργειακή αυτονομία, μιας και η αυξανόμενη εξάρτηση από εξωτερικές ενεργειακές πηγές εκθέτει τις χώρες σε κινδύνους όπως οι διακυμάνσεις των τιμών και οι ελλείψεις σε κρίσιμες περιόδους. Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργειακή αυτονομία – η ικανότητα ενός συστήματος να καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες χωρίς εξωτερική εξάρτηση – καθίσταται βασικός στόχος για μια βιώσιμη και ανθεκτική ενεργειακή μετάβαση (Motlagh, Mohammadrezaei, & Hunt, 2020).

2.2.1 Ορισμός της ενεργειακής αυτονομίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα ζητήματα ενεργειακής αυτονομίας είναι από τα πιο φλέγοντα ζητήματα που ταλανίζουν τις σύγχρονες κοινωνίες, γι' αυτό και πασχίζουν με κάθε δυνατό τρόπο και μέσο να ενισχύουν την κατάσταση αυτή μιας και η τόσο μεγάλη συνεξάρτηση των χωρών δημιουργεί μεγάλα προβλήματα - ιδιαίτερα στις πιο μικρές οικονομίες.

Η ενεργειακή αυτονομία αφορά την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας για ηλεκτρισμό, θέρμανση και μεταφορές από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε συνδυασμό με την εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και μείωση της ζήτησης. Με έναν πολύ σύντομο ορισμό, η ενεργειακή αυτονομία αφορά την ολοκληρωτική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός μέρους, υπό την προϋπόθεση ότι η παραγόμενη ενέργεια προέρχεται από ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) έτσι ώστε να μην υφίσταται πλέον η συνεξάρτηση από άλλες χώρες. Μια ενεργειακά αυτόνομη τοπική κοινότητα καλύπτει την ενεργειακή της ζήτηση εξ' ολοκλήρου με ΑΠΕ στους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας, της θέρμανσης, της ψύξης και της μεταφορών.

Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετοί άλλοι ορισμοί, όπως αυτός που αναρτήθηκε από το ινστιτούτο Wuppertal (2008) όπου αναφέρει: *“Η ενεργειακή αυτονομία αφορά την αναλογία των πλεονεκτημάτων ως προς τα έξοδα. Περιγράφει δηλαδή τα οφέλη που αποκτήθηκαν σχετικά με την ενέργεια που καταναλώθηκε”*, ενώ το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο το 2015 όρισε την ενεργειακή αυτονομία ως εξής: *“Η ενεργειακή αυτονομία είναι η ποσότητα παραγωγής που μπορεί να παραχθεί με δεδομένη ενέργεια εισόδου και μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό της ενεργειακής απόδοσης μια δεδομένης κατανάλωσης ενέργειας”*. Από την άλλη μεριά, η ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή αυτονομία την ορίζει ως την αναλογία της απόδοσης, της υπηρεσίας, των αγαθών ή της ενέργειας στη συνολική παροχή ενέργειας (η θερμική άνεση ενός κτιρίου είναι παράδειγμα απόδοσης, η μεταφορά ατόμων ή πληροφοριών αποτελεί υπηρεσία, ένα κινητό τηλέφωνο είναι αγαθό) (European Parliament, 2015).

2.2.2 Κριτήρια εφικτότητας μετάβασης ενεργειακής αυτονομίας

Έχει παρατηρηθεί ότι μέχρι στιγμής δεν υπάρχει ένα ενιαίο σχέδιο το οποίο θα οδηγήσει στην επίτευξη ενός επιτυχημένου μοντέλου συστήματος το οποίο θα είναι 100% αυτόνομο από ΑΠΕ. Για τον λόγο αυτό η δυναμικότητα και η ανθεκτικότητα μιας τέτοια μετάβασης πηγάζει ακριβώς από τις ιδιαιτερότητες των προσεγγίσεων που την αντιμετωπίζουν (Buschmann & Leidreiter, 2015).

Τα κριτήρια που παρατίθενται στη συνέχεια προέκυψαν στο πλαίσιο μιας οργανωμένης και συστηματικής συνεργασίας, η οποία ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2014. Η συνεργασία αυτή περιλάμβανε έναν ευρύ φάσμα οργανισμών σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο, οι οποίοι δραστηριοποιούνται στην προώθηση της ενεργειακής αυτονομίας μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και συμμετέχουν στην πλατφόρμα Global 100% RE.

Κριτήριο 1: Εκτίμηση επιπέδου υλοποίησης

Η εξ' ολοκλήρου ενεργειακή αυτονομία μέσω καθολικής χρήσης ΑΠΕ, σε μια τοπική κοινότητα, απαιτεί την συλλογή τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα αξιοποιούνται δεδομένα ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης σε κιλοβατώρες (kWh), ποσοστό εξ' αυτών που καλύπτεται από ΑΠΕ αλλά και η ανάλυση του ενεργειακού μίγματος στους βασικούς τομείς. Επιπροσθέτως ενσωματώνεται και η κοινωνικοοικονομική αξία που δημιουργείται στην τοπική κοινότητα η οποία βασίζεται σε ορισμένα δομικά στοιχεία όπως η τοπική ιδιοκτησία των εγκαταστάσεων, οι περιφερειακές αλυσίδες αξίας και η λειτουργία τοπικών αγορών ενέργειας.

Κριτήριο 2 – Στόχευση για 100% αυτονομία μέσω ΑΠΕ

Το συγκεκριμένο κριτήριο εξετάζει τους στόχους που πρέπει να τεθούν ώστε να γίνει εφικτή η ενεργειακή αυτονομία μιας τοπικής κοινότητας χρησιμοποιώντας εξ' ολοκλήρου ΑΠΕ. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ενεργειακά αυτόνομη είναι μια περιοχή στην οποία η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ είναι ίση ή και μεγαλύτερη από την ετήσια ενεργειακή της κατανάλωση. Για να μπορέσει να επιτευχθεί το παραπάνω, θα πρέπει να υπάρχουν χρονικοί βραχυπρόθεσμοι ή μακροπρόθεσμοι ενεργειακοί στόχοι οι οποίοι θα αφορούν τομείς όπως για παράδειγμα παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, μεταφορές, θέρμανση/ ψύξη κ.α.

Κριτήριο 3 – Σχεδιασμός και Προσανατολισμός

Για να μπορέσει να υλοποιηθεί το σχέδιο περί ενεργειακής αυτονομίας, θα πρέπει να εξεταστεί η υπάρχουσα παραγωγή και ζήτηση ενέργειας, οι δυνατότητές κάλυψής τους από ΑΠΕ και οι περιπτώσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό η τοπική αυτοδιοίκηση θα πρέπει να έχει προβεί σε συζητήσεις στρατηγικών συνεργασιών με γειτονικές περιοχές, ώστε να υπάρξει μια κοινή πολιτική για την ανάπτυξη ενός ενιαίου σχεδίου δράσης.

Κριτήριο 4 - Θεσμοθέτηση

Η μετάβαση σε ένα σύστημα πλήρους κάλυψης ενεργειακών αναγκών από ΑΠΕ, χρειάζεται να είναι σαφώς ορισμένη και κατάλληλα θεσμοθετημένη με επίσημες πρακτικές κανόνων και προτύπων.

Κριτήριο 5 - Συμμετοχή τοπικών φορέων

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η μετάβαση μιας κοινότητας σε πλήρη ενεργειακά αυτόνομη, απαιτεί την συνέργεια πολλών παραγόντων όπως τοπικών φορέων και πολιτών, καθώς η συγκεκριμένη αλλαγή θα επιφέρει μεταβολές στους περισσότερους τομείς της καθημερινότητας τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο. Έτσι η κατάλληλη ενημέρωση και η ενεργή συμμετοχή των πολιτών θα διευκολύνουν σημαντικά τις παραπάνω προσπάθειες περί ενεργειακής μετάβασης.

Κριτήριο 6 - Τεχνολογίες ΑΠΕ

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση ΑΠΕ σε μια περιοχή έχουν μείζον σημασία στην προσπάθεια ενεργειακής μετάβασης. Είναι αναγκαίο να ολοκληρωθεί μια ενδελεχή ανάλυση σχετικά με το ποιες τεχνολογίες είναι οι καταλληλότερες να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός πως ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ιδιομορφία της κάθε περιοχής και από τους φυσικούς πόρους που διατίθενται σε εκείνη. Οπότε για να μπορέσει να ληφθεί η πιο βέλτιστη απόφαση, είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν όλοι οι παράγοντες που το επηρεάζουν.

Κριτήριο 7 - Κτίρια

Η ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων μπορεί να επιτευχθεί μέσω στοχευμένων δράσεων ευαισθητοποίησης και ενημέρωσης των πολιτών και των επαγγελματιών του κλάδου, καθώς διαδραματίζει καίριο ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Κριτήριο 8 - Μεταφορές

Οι υφιστάμενες τεχνολογίες που υπάρχουν στον τομέα των μεταφορών περιορίζονται κυρίως σε ηλεκτροκίνηση, αυτοκίνητα υδρογόνου ή και λύσεις με χρήση βιοκαυσίμων. Για τον λόγο αυτό, ο συγκεκριμένος τομέας αποτελεί ίσως και την μεγαλύτερη πρόκληση που θα πρέπει να αντιμετωπίσει η εκάστοτε τοπική κοινωνία, μιας και οι περιορισμένες τεχνολογίες δεν επιτρέπουν την 100% ανεξαρτητοποίηση από τους παραδοσιακούς τρόπους μεταφορών και κινητικότητας τόσο πολιτών όσο και προϊόντων.

Κριτήριο 9 - Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας

Οι πρακτικές και οι πολιτικές που εξετάζονται από την τοπική αυτοδιοίκηση για την επίτευξη του στόχου περί ενεργειακής αυτονομίας, δεν θα μπορέσει σε καμία περίπτωση να καταστεί δυνατή εάν δεν υπάρξουν μέτρα και τακτικές μείωσης της ήδη υπάρχουσας κατανάλωσης ενέργειας και κατά συνέπεια η μείωση της ενεργειακής ζήτησης.

Κριτήριο 10 - Επιμόρφωση

Η μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο αποκλειστικά σε ΑΠΕ απαιτεί διαρκή παραγωγή και ανταλλαγή γνώσης. Η συνεργασία μεταξύ ερευνητικών και πρακτικών φορέων είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη τεχνολογικών και κοινωνικών καινοτομιών που θα στηρίξουν αυτή τη μετάβαση.

Κριτήριο 11 - Συμμετοχή των πολιτών

Η κοινωνική συμμετοχή αποτελεί θεμέλιο για την ενεργειακή μετάβαση, καθώς χωρίς τη στήριξη και ενημέρωση των πολιτών δεν μπορεί να υπάρξει ουσιαστική πρόοδος. Η διαβούλευση και η συνδιαμόρφωση στρατηγικής ενισχύουν τη συναίνεση για ένα μέλλον βασισμένο εξ ολοκλήρου σε ΑΠΕ.

Κριτήριο 12 - Συμμετοχή σε δίκτυα πληροφόρησης

Η συμμετοχή σε δίκτυα και η εμπλοκή σε δίκτυα συνεργασίας μπορεί να αποφέρει σημαντικά, οφέλη. Μέσα από τέτοιου είδους πλατφόρμες, μια τοπική κοινότητα έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει τη δημόσια εικόνα και την αναγνωρισιμότητά της, ενώ παράλληλα αποκτά μεγαλύτερη πολιτική επιρροή στο πλαίσιο ενός συλλογικού οράματος – όπως είναι η μετάβαση σε 100% Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Επιπλέον, τα δίκτυα λειτουργούν ως καταλύτες για τη δημιουργία συνεργασιών μεταξύ φορέων με κοινές αντιλήψεις και στόχους, διευκολύνοντας την υλοποίηση του σχεδίου της.

2.2.3. Οφέλη και προκλήσεις ενεργειακής αυτονομίας

Η ροπή των σύγχρονων κοινωνιών στην εξάλειψη των εξαρτήσεων που αφορούν θέματα ενέργειας, παρατηρούμε πως γίνεται ολοένα και πιο συχνή. Πράγματι, η ενεργειακή αυτονομία μπορεί να προσφέρει ποικίλα οφέλη τόσο στην ίδια την κοινωνία όσο και στο ευρύτερο περιβάλλον.

Πιο συγκεκριμένα, απαραίτητο στοιχείο μετάβασης προς την ενεργειακή αυτονομία είναι η χρήση ΑΠΕ. Οι τελευταίες, προσφέρουν μια πληθώρα ευεργετικών ιδιοτήτων όπως η συμβολή τους μείωση της ατμοσφαιρικής, εδαφικής και υδάτινης ρύπανσης. Έχει αποδειχθεί πως οι ΑΠΕ, κατά την διαδικασία παραγωγής ενέργειας δεν απελευθερώνουν ρυπογόνες ουσίες εν αντιθέσει με τα ορυκτά καύσιμα. Κατά τινά τρόπο δεν ζημιώνεται ούτε το περιβάλλον αλλά ούτε κινδυνεύει η βιοποικιλότητα της περιοχής, μιας και δεν εκτίθεται σε μεγάλες εκπομπές ρύπων. Έτσι η πίεση στα οικοσυστήματα περιορίζεται σημαντικά διασφαλίζοντας την φυσική ισορροπία (Callum & Bradley, 2018).

Τα οφέλη όμως της ενεργειακής αυτονομίας δεν περιορίζονται μόνο στον τομέα του περιβάλλοντος. Η κοινωνική και οικονομική συμβολή τους είναι εξαιρετικά σημαντική. Είναι γεγονός πως οι περισσότερες κοινότητες υποφέρουν από το φαινόμενο της ενεργειακής φτώχειας - Ένα νοικοκυριό θεωρείται ότι βρίσκεται σε ενεργειακή φτώχεια όταν χρειάζεται να δαπανά πάνω από το 10% του εισοδήματός του για να διατηρήσει ένα επαρκές επίπεδο θέρμανσης *Boardman, B. (1991)*. Οι αξιοποίηση των ΑΠΕ δίνουν τη δυνατότητα προσφοράς ενεργειακών προϊόντων σε χαμηλότερες τιμές (ή ακόμη και δωρεάν σε νοικοκυριά), αμβλύνοντας έτσι το παραπάνω φαινόμενο.

Στον οικονομικό τομέα, η χρήση ΑΠΕ για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας ενισχύει όχι μόνο την τοπική κοινωνία, βοηθώντας τους ιδιοκτήτες γης να εκμισθώνουν την ιδιοκτησία τους για εκμετάλλευση και εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ, αλλά και την γενικότερη εγχώρια οικονομία, μιας και δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίες σε τεχνολογικά καινοτόμους τομείς. Επίσης, εξαιτίας της αξιοποίησης των ΑΠΕ για οικονομικότερη ενέργεια, δίνεται η δυνατότητα ύπαρξης οικονομικών κλίμακας, οι οποίες θα διατηρούν χαμηλές τις τιμές και θα διανέμουν αποδοτικά τα παραγόμενα ενεργειακά προϊόντα.

Στον αντίποδα, η διαδικασία επίτευξης της ενεργειακής αυτονομίας ενός τόπου, καλείται να αντιμετωπίσει και ορισμένες προκλήσεις. Το ισχύον νομοθετικό και οικονομικό πλαίσιο δεν είναι ικανό να υποστηρίξει τέτοιου είδους εγχειρήματα. Οι αρχές και οι άξονες λειτουργίας τους, μέχρι στιγμής είναι αρκετά ασαφείς, γεγονός που δυσχεραίνει την ευρεία ανάπτυξή τους. Συνεπώς η δημιουργία ενός ενιαίου νομικού πλαισίου, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή υλοποίηση έργων που αφορούν ΑΠΕ. Το παραπάνω φαινόμενο, έρχεται να πλαισιώσει και αποδυναμώσει το ενεργειακό καρτέλ που έχει δημιουργηθεί από τους ήδη μεγάλους παραδοσιακούς “παίκτες” της αγοράς, όπως το πετρέλαιο και ο λιγνίτης, όπου είναι και αυτοί που πλήττονται πρωτίστως από την αξιοποίηση των ΑΠΕ, μπαίνοντας εμπόδιο στις επενδύσεις σε αυτές. Έχει παρατηρηθεί πως επιχορηγήσεις στα κλασικά ορυκτά καύσιμα δημιουργεί σημαντικές στρεβλώσεις στην αγορά ενέργειας, θέτοντας τεράστια εμπόδια εισόδου σε επενδυτικές κινήσεις για προώθηση των ΑΠΕ, αφού εγκαθιδρύουν μια υπέρογκη ανισότητα στην αγορά καθιστώντας την αρκετά ανταγωνιστική και αποτρεπτική για οποιαδήποτε κίνηση προς ενεργειακή ανεξαρτησία και αυτονομία.

Η επιτυχημένη επίλυση αυτών των προκλήσεων απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες και μεταρρυθμίσεις σε θεσμικό, οικονομικό και εκπαιδευτικό επίπεδο, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη και εφαρμογή των ΑΠΕ και την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας.

2.1.4. Παράγοντες επιρροής ενεργειακής αυτονομίας και στρατηγικές επίτευξης

Η ενεργειακή αυτονομία παρόλο τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη που προσφέρει τόσο στην κοινωνία, στην οικονομία αλλά και στο γενικότερο περιβάλλον, πολλές φορές δημιουργεί ορισμένα εμπόδια τα οποία καθίστανται τροχοπέδη για την ολοκληρωτική επίτευξή της. Συνήθως, οι κύριοι παράγοντες που την επηρεάζουν αφορούν θέματα παραγωγής, αποθήκευσης, διαχείρισης και κατανάλωσης ενέργειας.

Αναφορικά με ζητήματα παραγωγής, η διαθεσιμότητα των ΑΠΕ στις εκάστοτε περιοχές αποτελεί ίσως και τον πιο κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας. Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου, η υδροδυναμική της περιοχής, η βιομάζα και η γεωθερμία αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία που οδηγούν σε ενεργειακή αυτονομία. Οπότε, όσο μεγαλύτερη η έντασή τους σε μια περιοχή, τόσο πιο επιτεύξιμη καθίσταται η αυτάρκειά τους. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί το γεγονός πως διαθεσιμότητα των ΑΠΕ μιας περιοχής, αποτελεί μόνο την πρώτη ύλη, καθώς για την αξιοποίησή τους απαιτείται η κατάλληλη υλικοτεχνική υποδομή. Για τον λόγο αυτό η ευρεία εγκατάσταση μέσων παραγωγής όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες γίνεται πλέον επιτακτική ανάγκη. Εξίσου σημαντική είναι και η εξασφάλιση αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας αλλά και η εποπτεία σε πραγματικό χρόνο. (Boyle, Renewable Energy, 2003) Η εγκατάσταση IoT συστημάτων στο πεδίο, μεταφράζεται ως smart grids τα οποία προσφέρουν πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας χρήσιμα δεδομένα προσφοράς και ζήτησης.

Αναλυτικότερα, η αποθήκευση της ενέργειας, είναι ένα ζήτημα που ίσως είναι και μείζονος σημασίας για επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας. Εκ φύσεως οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από διαλείπουσα παραγωγή, μιας και δεν είναι εφικτό να υπάρχει παραγωγή ενεργειακών προϊόντων καθόλη την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Για τον λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Το παραπάνω δύναται να γίνει εφικτό με την απαραίτητη ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης ενέργειας, όπως συστήματα μπαταριών, θερμική αποθήκευση ή αντλησιοταμεινικά έργα. (IRENA, 2023). Εξίσου σημαντικός παράγοντας που

επηρεάζει τον βαθμό ενεργειακής αυτονομίας μιας περιοχής, είναι σαφώς η ενεργειακή αποδοτικότητα που μπορεί να προσφέρει. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της συνολικής ζήτησης σε προϊόντα ενέργειας μέσω εφαρμογής αποδοτικών τεχνολογιών σε βιομηχανίες, πόλεις, κτίρια και μεταφορές συμβάλλει σημαντικά στον δείκτη εφικτότητας της πλήρους αυτόνομης ενεργειακής κάλυψης (IEA, 2023).

Ένας παράγοντας που συχνά υποτιμάται αλλά είναι κρίσιμος, είναι το θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο. Όπως σε όλες τις μεταβάσεις στην σύγχρονη ελληνική πραγματικότητα, έτσι και στην ενεργειακή μετάβαση, το κράτος έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει είτε θετικά είτε αρνητικά στην συγκεκριμένη διαδικασία. Εάν δεν υπάρχει το απαραίτητο πλαίσιο υποστήριξης και επιχορήγησης προσπαθειών ενεργειακής αυτονομίας, είναι μάλλον αδύνατον να ξεπεραστούν τα εμπόδια που θέτουν τα λόμπι των κλασικών ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή και κατανάλωση των ενεργειακών προϊόντων. Συνεπώς το κράτος θα πρέπει να προωθεί και να υποστηρίζει πρακτικές αυτοπαραγωγής - net metering, αλλά και να επιτρέπει την πρόσβαση σε κεφάλαια και τεχνογνωσία. (Alaa, Zaidan, Talal, & Kiah). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ενεργειακές κοινότητες κατά τις οποίες η ενέργεια που παράγεται καταναλώνεται και μοιράζεται σε τοπικό επίπεδο, αποφέροντας έτσι προστιθέμενη αξία πίσω στους ίδιους τους παραγωγείς. Έτσι η επένδυση σε καινοτόμες τεχνολογίες και εκπαίδευση προσωπικού και πολιτών αποτελούν από τα σημαντικότερα βήματα που οδηγούν ολοένα και περισσότερο στην ενεργειακή αυτονομία μιας κοινωνίας.

2.2.5 Η συμβολή των αισθητήρων στις υπηρεσίες και υποδομές ενέργεια

Η ενσωμάτωση αισθητήρων IoT (Internet of Things) στον τομέα της ενέργειας έχει επιφέρει σημαντικές μεταβολές στις υποδομές και τις παρεχόμενες υπηρεσίες, συμβάλλοντας στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας, στη μείωση των απωλειών, στην καλύτερη διαχείριση των ΑΠΕ, αλλά και στην επίτευξη υψηλότερων επιπέδων αυτονομίας (Zhou & Fu, 2016)

Ένας από τους βασικότερους τομείς στους οποίους η χρήση αισθητήρων IoT έχει επιφέρει βελτιώσεις είναι η διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας. Μέσω της εγκατάστασης έξυπνων μετρητών (smart meters) και αισθητήρων παρακολούθησης κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, οι χρήστες αποκτούν τη δυνατότητα να παρακολουθούν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις και να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους (Gungor, Sahin, & Kocak, 2013). Πιο συγκεκριμένα, η διαχείριση της κατανάλωσης σε επίπεδο τελικού χρήστη υποστηρίζεται από συστήματα "demand response", τα οποία ενεργοποιούνται όταν οι αισθητήρες εντοπίζουν περιόδους υψηλής ζήτησης ή ενεργειακής πίεσης στο δίκτυο. Έτσι, επιτυγχάνεται αποσυμφόρηση των ενεργειακών γραμμών και μείωση της αιχμής κατανάλωσης, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και μείωση του κόστους (Alahakoon & Yu, 2016). Παράλληλα, τα δεδομένα από αισθητήρες συμβάλλουν σε προβλέψεις ζήτησης με χρήση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI), επιτρέποντας την προσαρμοστική λειτουργία των σταθμών παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

Επιπλέον οι ΑΠΕ, χαρακτηρίζονται από αστάθεια και εξάρτηση από φυσικούς παράγοντες, και για τον λόγο αυτό, η ακριβής και συνεχής παρακολούθηση των συνθηκών παραγωγής ενέργειας είναι απαραίτητη για την ομαλή ενσωμάτωσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτό το πλαίσιο, οι αισθητήρες παίζουν κομβικό ρόλο, καθώς καταγράφουν κρίσιμες παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ένταση και κατεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία, αλλά και την πραγματική απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ ή των ανεμογεννητριών (Kabalcı, 2016). Η χρήση αισθητήρων επιτρέπει τη

βελτιστοποίηση της θέσης, της γωνίας κλίσης και της κατεύθυνσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αυξάνοντας την παραγόμενη ενέργεια. Επιπλέον, σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ΑΠΕ, η συλλογή και ανάλυση δεδομένων από ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων μπορεί να εντοπίσει αποκλίσεις στην απόδοση, υποδεικνύοντας σημεία φθοράς ή μειωμένης αποδοτικότητας (Siano, 2014)

Η διαλειτουργικότητα των αισθητήρων σε περιβάλλοντα με πολλαπλές πηγές ενέργειας επιτρέπει την καλύτερη ενοποίηση των ΑΠΕ με συμβατικές μορφές παραγωγής, μειώνοντας τον κίνδυνο διακοπών και αυξάνοντας τη συμβατότητα με τα έξυπνα δίκτυα.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος εισαγωγής των αισθητήρων στο ενεργειακό δίκτυο είναι τα smart grids τα οποία βασίζονται στη συνεχή συλλογή, ανταλλαγή και ανάλυση δεδομένων για την προσαρμογή της λειτουργίας του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αισθητήρων που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε κομβικά σημεία του δικτύου – από τον παραγωγό έως τον τελικό χρήστη – το σύστημα μπορεί να διαχειρίζεται δυναμικά τη ροή ενέργειας, να προβλέπει διακυμάνσεις και να διασφαλίζει την ποιότητα παροχής.

3. Εφαρμογές IoT για ενεργειακή αυτονομία

Στην σύγχρονη πραγματικότητα, το ζήτημα της ενεργειακής αυτονομίας καθίσταται πλέον παγκόσμια επιτακτική ανάγκη. Σε περιοχές με ασταθή πρόσβαση σε κεντρικό δίκτυο, ή με υπέρογκο ποσό κόστους ενέργειας, απαιτείται η εφαρμογή τεχνολογιών IoT για ασφαλή και αποδοτική μετάβαση σε ολική παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ. Χάρη στις δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες IoT, η παρακολούθηση δεδομένων πραγματικού χρόνου τόσο κατανάλωσης, παραγωγής, καιρικών φαινομένων όσο και των αναγκών των τελικών χρηστών, μπορούν να τεθούν σημαντικοί πυλώνες ως προς την κατάκτηση της ενεργειακής αυτονομίας της εκάστοτε περιοχής. Το παραπάνω έχει ήδη επιτευχθεί με επιτυχία σε ενεργειακές κοινότητες της Βόρειας Ευρώπης όπως η Φινλανδία και η Δανία, οι οποίες αποτελούν και παγκόσμιο ενεργειακό πρότυπο, αφού αξιοποιούν λύσεις που βασίζονται σε τεχνολογία IoT με στόχο να αξιοποιούν όσο περισσότερο δύναται τις ΑΠΕ για παραγωγή - αποθήκευση ενέργειας και βελτιστοποίηση της ζήτησης. Χρησιμοποιούν πιλοτικά αλλά και εμπορικά έργα που βασίζονται σε αισθητήρες, μετρητές, edge computing και αυτοματισμούς με σκοπό την αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας τους.

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται επιλεγμένα παραδείγματα ευρωπαϊκών εφαρμογών προσπάθειας ενεργειακής αυτονομίας, δίνοντας έμφαση στην τεχνολογική τους υπόσταση αλλά και στα κοινωνικοοικονομικά οφέλη που επιφέρουν.

3.1 Δανία: Οι Ενεργειακές Νήσοι της Βαλτικής και Βόρειας Θάλασσας

Η συμφωνία της Ευρωπαϊκής Ένωσης - γνωστή και ως Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) - στοχεύει στην κλιματική ουδετερότητα της ζώνης έως το 2050 με υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ στην περιφερειακή και ενεργειακή ολοκλήρωση. Παρόλο που οι περισσότερες χώρες δείχνουν θετική ανταπόκριση στην ανωτέρω, η Δανία, ως παγκόσμια πρωτοπόρος εντάσσει στο πλαίσιο της εθνικής της στρατηγικής, την μείωση των εκπομπών των ρύπων διοξειδίου του άνθρακα. Ο λόγος όπου η Δανία αποτελεί εξαιρετικό παράδειγμα τάσης προς ολική στροφή σε ΑΠΕ, είναι οι ευνοϊκές αιολικές συνθήκες, τα ρηχά ύδατα και σχετική οικονομική εγγύτητα.

Τον Φεβρουάριο 2021, ξεκινά η κατασκευή της πρώτης ενεργειακής νησίδας στο φυσικό νησί Bornholm στην Βαλτική θάλασσα, ενώ η δεύτερη τεχνητή νησίδα βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα. Ύστερα από έγκριση του Δανέζικου Κοινοβουλίου, τέθηκε σε εφαρμογή η κατασκευή των πρώτων υπεράκτιων ενεργειακών νήσων (offshore energy islands) στον κόσμο, ευθυγραμμίζοντας έτσι τους στόχους της με εκείνους που έθεσε η Ευρωπαϊκή Ένωση. Η ιστορική αυτή απόφαση, αποτελεί ένα εξαιρετικό παράδειγμα προς μίμηση, αφού το συγκεκριμένο έργο προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης πολλαπλών υπεράκτιων αιολικών πάρκων - συνολικής ισχύος 10-20 GW, συνδυάζοντας τεχνολογική ευφυΐα και καινοτομία με προηγμένη ψηφιακή διαχείριση. Ως βάση έχουν πρακτικές και τεχνικές IoT, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση, τη βελτιστοποίηση και την ασφάλεια του ενεργειακού συστήματος (Tosatto, Martinez Beseler, Østergaard, Pinson, & Chtzivasilieiadis, 2022).

3.1.1. Η αρχιτεκτονική του συστήματος

Η τεχνοοικονομική ιδέα των δύο ενεργειακών κόμβων, βασίζεται στο μοντέλο αρχιτεκτονικής σχεδιασμού δικτύων *hub-and-spoke*, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως από τηλεπικοινωνιακά και ενεργειακά δίκτυα. Στο συγκεκριμένο έργο, το οποίο υπάγεται στο πλαίσιο *North Sea Wind Power Hub (NSWPH)*, οι νησίδες λειτουργούν ως κεντρικοί κόμβοι (hubs) ώστε να συγκεντρώνουν τις ροές ηλεκτρικής ενέργειας που δημιουργούνται από τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα, όπου τελικά τις διανείμουν στους πολλαπλούς δευτερεύοντες παίκτες (κράτη όπως Γερμανία, Ολλανδία, Βέλγιο και Ηνωμένο Βασίλειο) μέσω υποθαλάσσιων διασυνδέσεων (spokes).

Οι υποθαλάσσιες διασυνδέσεις χρησιμοποιούν ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας γνωστό και ως *HVDC (High Voltage Direct Current)* - δηλαδή ένα σύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργεί σε υψηλές τάσεις ($>100\text{kV}$), χρησιμοποιώντας συνεχές ρεύμα DC. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποδοτική και αδιάλειπτη μεταφορά υπέρογκων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες χιλιομετρικές αποστάσεις. Έτσι, οι υποθαλάσσιες διασυνδέσεις εκτός από τον ρόλο της βασικής ενεργειακής υποδομής του έργου, δίνουν την δυνατότητα συγκρότησης ενός πανευρωπαϊκού διακρατικού μοντέλου, του οποίου η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ παρακολουθείται απομακρυσμένα. Έτσι ελέγχεται κατά αυτόν τον τρόπο το συγκεκριμένο πολυσύνθετο ενεργειακό σύστημα, εξισορροπώντας τη διαλειμματική παραγωγή ενέργειας, μιας και οι τεχνικές προγνωστικών και έξυπνων δικτύων ψηφιακής διαχείρισης μέσω IoT επιτυγχάνουν τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος.

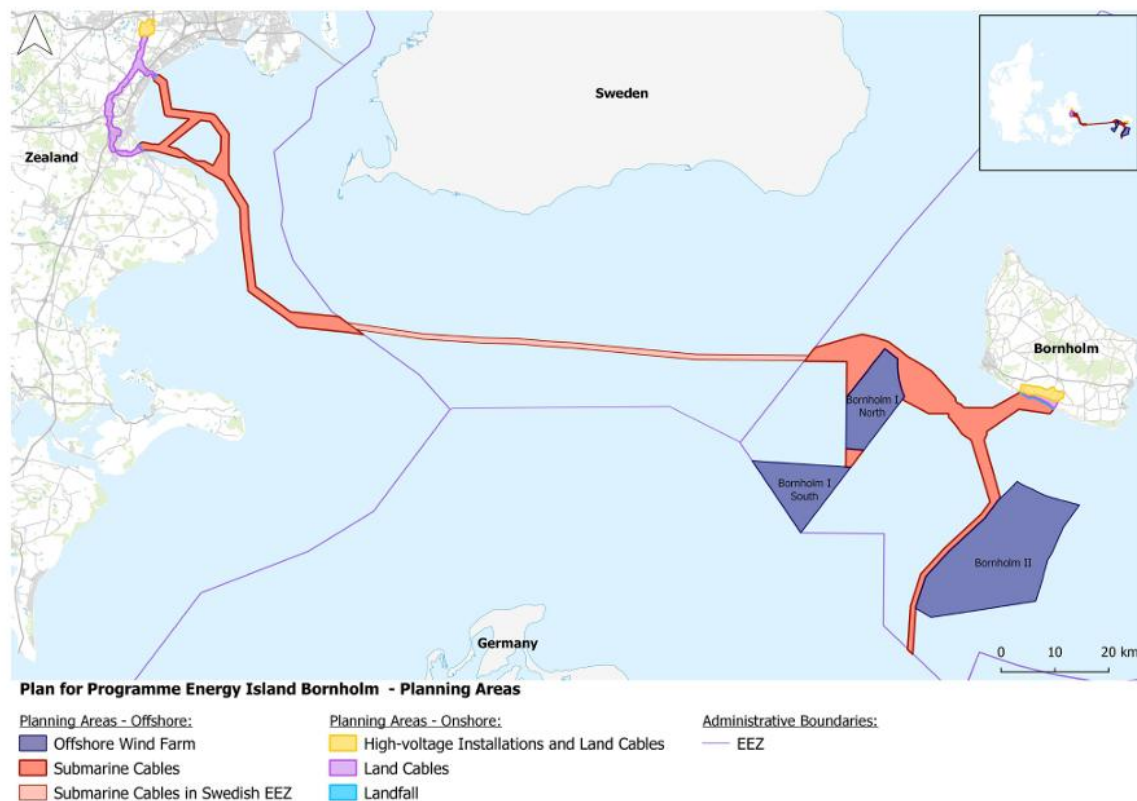
3.1.2. Τεχνικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Κατά γενική ομολογία, τα ενεργειακά αυτόνομα νησιά βρίσκονται σε σημεία απόμακρα, ώστε να μπορούν να παράγουν και να καταναλώνουν την δική τους ενέργεια “κατά βούληση”, χωρίς καμία εξωγενή εξάρτηση. Η παραγωγή ενέργειας επιτυγχάνεται είτε με μόνιμη διασύνδεση είτε με μεταφορά πρώτων υλών, τα οποία απαιτούν τη χρήση βιώσιμων και ανεξάρτητων συστημάτων που να υποστηρίζουν το παραπάνω εγχείρημα.

Ένα νησί μπορεί να γίνει ενεργειακά αυτόνομο βασιζόμενο σε τοπικές διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για να καλύψει τις ενεργειακές του ανάγκες. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει έναν συνδυασμό μέτρων ενεργειακής απόδοσης, καθώς και την εγκατάσταση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ευρεία κλίμακα όπως αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, ενέργεια από τα κύματα κ.α. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως οι μπαταρίες ή τα αντλησιοταμιευτικά έργα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης, μιας και η πλειονότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν διακοπόμενη παραγωγή (Hansen, Manniche, & Larsen, 2024). Εξασφαλίζεται έτσι με αυτόν τον τρόπο η αξιόπιστη και αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η νήσος Bornholm έκτασης 120.000 m^2 , είναι μια ήδη κατοικημένη περιοχή, η οποία μετατρέπεται σε ενεργειακή πλατφόρμα και θα αποτελέσει τον πρώτο λειτουργικό κόμβο μέχρι το 2030, με δυνατότητες διασύνδεσης με τη Γερμανία. Η δυνατότητες κάλυψης ισχύος που διαθέτει είναι στα 3 GW με δυνατότητα επέκτασης έως και 10 GW. Εκεί έχουν εγκατασταθεί 200 ανεμογεννήτριες ενώ προβλέπεται και σχέδιο εγκατάστασης 650 επιπλέον. Αντίθετα, η τεχνητή νήσος της Βόρειας Θάλασσας, σε απόσταση 80 χλμ. από τις ακτές της Jutland, σχεδιάζεται να φιλοξενήσει 10 GW υπεράκτιας ισχύος μέχρι το 2040. Το έργο αυτό είναι πρωτοποριακό ως προς τη χρήση τεχνολογιών

HVDC, την ενσωμάτωση P2X εγκαταστάσεων, και την πολυδιάστατη τεχνική του συνθετότητα (Krishan & Suhag, 2019).



Γράφημα 2- Bornholm and the projected Energy Island project in the Baltic Sea. © Energistyrelsen.

3.1.3 Παρακολούθηση και ανάλυση λειτουργικών δεδομένων παραγωγής και μεταφοράς

Η υιοθέτηση τεχνολογιών IoT στις ενεργειακές νήσους της Δανίας, δίνουν την δυνατότητα ακριβής εποπτείας και πρόβλεψης της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υπεράκτιο ευρωπαϊκό περιβάλλον. Για να μπορέσει να καταστεί δυνατό το παραπάνω σύστημα, απαιτείται -εκτός των τεχνολογιών IoT- και η χρήση άλλων βιομηχανικών λογισμικών, όπως για παράδειγμα SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) αλλά και ποικίλα προγράμματα ενεργειακής διαχείρισης EMS (*Energy Management Systems*).

Όπως έχει αποδειχθεί, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, χαρακτηρίζεται από υψηλή στοχαστικότητα, και για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης ισχύος του φορτίου για εξισορρόπηση των τυπικών αποκλίσεων. Στο συγκεκριμένο έργο συμμετείχαν πάνω από 28.000 πελάτες και 2.000 νοικοκυριά στα οποία παραχωρήθηκαν smart meters & controllers. Επιπλέον, το σύστημα υποστήριζε real time δεδομένα - με υψηλή χρονική ανάλυση 5 λεπτών. Τα IoT συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η πλατφόρμα Axon της GreenWave Systems, μέσω της οποία μεταδίδονταν τα δεδομένα κατανάλωσης, ενώ παράλληλα έδινε την δυνατότητα έγκαιρης πληροφόρησης στους καταναλωτές (μέσω ειδοποιήσεων SMS) για τις τρέχουσες τιμές της ενέργειας.

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Zigbee στα οποία συλλέγονταν και διαχειρίζονταν όλα τα δεδομένα.

Οι μεταβλητές και οι δείκτες που θα καταγράφονται και θα αναλύονται στα πλαίσια του συγκεκριμένου έργου, αφορούν δεδομένα αιολικών συνθηκών (ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου), ηλεκτροτεχνικές παραμέτρους (ενεργός και άεργη ισχύς, συντελεστής ισχύος, τάση εξόδου), ενδείξεις θερμοκρασίας των asset αλλά και κατάσταση δικτύου μεταφοράς (διαθεσιμότητα διασυνδέσεων). Φυσικά όλα τα παραπάνω βασίζονται σε δεδομένα πραγματικού χρόνου, πληρώνοντας όλα τα απαραίτητα ευρωπαϊκά standards, τα οποία θα μπορέσουν να δίνουν και εξειδικευμένα μοντέλα πρόβλεψης της ηλεκτρικής ισχύος για την αποδοτικότερη κατανομή της ζήτησης. Οι προβλέψεις αυτές θα υλοποιούνται μέσω ειδικών αλγορίθμων οι οποίοι θα λαμβάνουν υπόψη τους ιστορικά δεδομένα, ενώ παράλληλα θα αναλύουν την συμμόρφωση ενός δικτύου χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή ευαισθησίας που δείχνει ποια ποσότητα ισχύος (σε %) περνά από κάθε γραμμή μεταφοράς όταν «εγχέεται» 1 MW ισχύος σε έναν κόμβο και «αποσύρεται» από έναν άλλο - γνωστό και ως *Power Transfer Distribution Factors (PTDF)*.

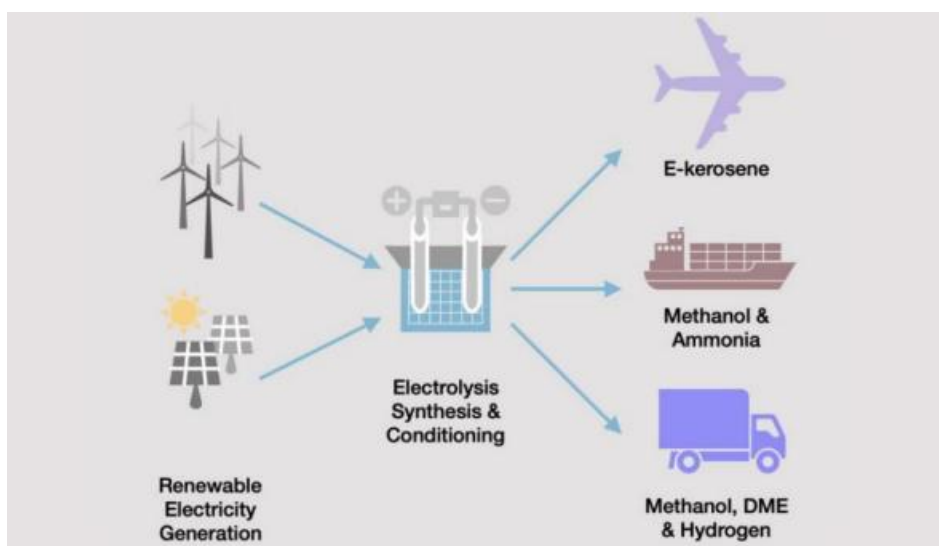
3.1.4 Αποθήκευση και διαχείριση ενέργειας

Το μεγαλύτερο ζήτημα που καλείται να αντιμετωπίσει το συγκεκριμένο έργο, είναι η επίτευξη της επιχειρησιακής σταθερότητας αλλά και της συστημικής ευελιξίας. Είναι απαραίτητο να δομηθεί ξανά η ορθή λειτουργία των ενεργειακών δικτύων και συστημάτων για την υλοποίηση των ανωτέρω.

Η στοχαστικότητα των ΑΠΕ, εγείρει ανησυχίες σχετικά με ζητήματα απορρόφησης πλεονάζουσας ισχύος που θα μπορούν να συνδυάζουν την αποθήκευση ενέργειας με αποκεντρωμένα συστήματα ελέγχου και βελτιστοποίησης. Ως λύση στα παραπάνω ζητήματα, στις ενεργειακές νήσους της Δανίας, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες Power to X (PtX), οι οποίες δίνουν την δυνατότητα μετατροπής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλες μορφές (ενεργειακές ή ακόμη και χημικές), με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης ενεργειακής ευελιξίας με δυνατότητα αποθήκευσης. Στις κυριότερες εφαρμογές PtX περιλαμβάνονται εκτός των άλλων οι:

- Power to Gas: παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης
- Power to Heat: μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική για χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες
- Power to Fuels: παραγωγή συνθετικών καυσίμων ή υγρών μεταφοράς

Η PtX τεχνολογία, όταν ενσωματώνεται σε συστήματα πολυτροπικά, βοηθάει στην αποφυγή παραγωγής πλεονάζουσας ενέργειας - η οποία με τα παραδοσιακά συστήματα δεν αξιοποιείται ή στην χειρίστη περίπτωση οδηγεί σε υποβάθμιση του δικτύου οδηγώντας σε λειτουργικές χρήσεις με προστιθέμενη αξία. Σύμφωνα με την έρευνα του Tossato et al, 2022 φαίνεται πως σε ένα σύστημα συνολικής παραγωγής 20GW από νησίδες, θα είχε ως αποτέλεσμα ενεργειακής απώλειας έως και 2 TWh τον χρόνο.



Γράφημα 3 - Απεικόνιση μετατροπής ανανεώσιμης ενέργειας σε ηλεκτρικό καύσιμο μέσω ηλεκτρόλυσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον τομέα των μεταφορών. (Kany et al., 2022).

Όπως γίνεται αντιληπτό, το σύστημα και η αρχιτεκτονική της ενεργειακής νησίδας του Barnholdt, η οποία επιτρέπει την διασύνδεση με πολλαπλούς παίκτες όπως Γερμανία, Ολλανδία και Βέλγιο, έχει ως απαραίτητη προϋπόθεση τόσο τον έλεγχο όσο και τη διαχείριση του δικτύου. Με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, ο βασικός έλεγχος διενεργείται μέσω SCADA, το οποίο φαίνεται πως δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες ενός σύνθετου ενεργειακού συστήματος. Η χρήση νέων τεχνολογιών όπως edge computing και αυτόνομων πλατφορμών ενεργειακής διαχείρισης φαίνεται πως είναι αποδοτικότερη, καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ IoT πλατφορμών και των αποθηκευτικών μονάδων επιτρέπει την πρόβλεψη υπερπαραγωγής και την αυτόματη μεταγωγή σε λειτουργίας απορρόφησης ή απόκρισης (demand-side-response).

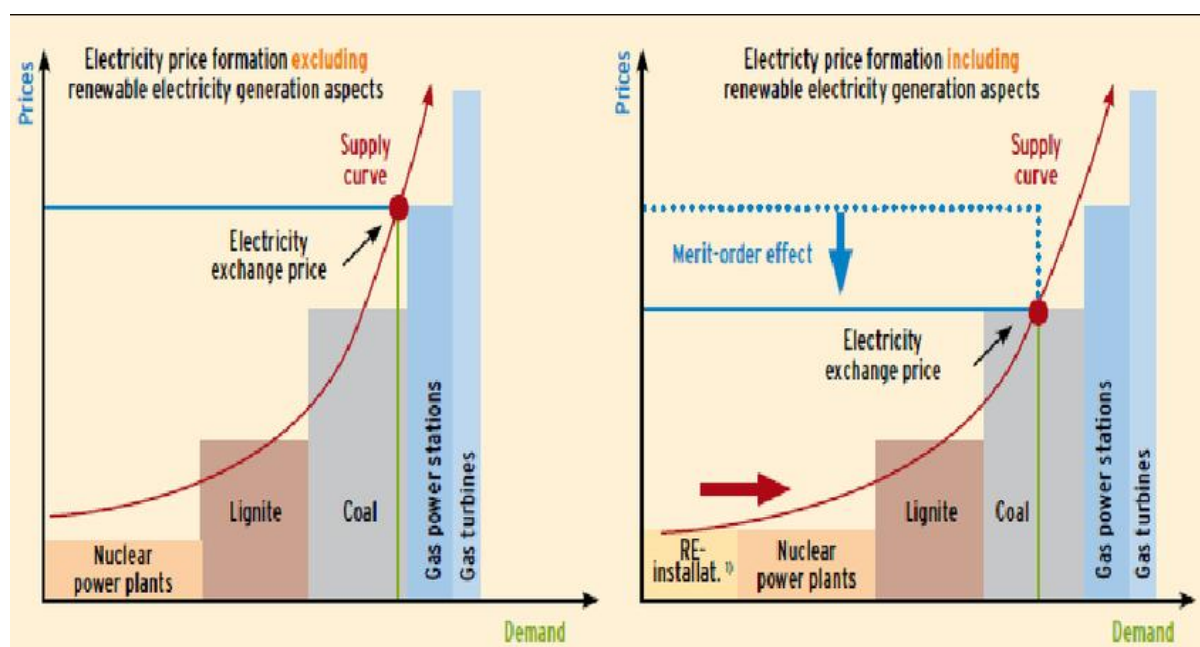
Οι συγκεκριμένες τεχνικές λειτουργούν ως αρωγοί λήψης αποφάσεων, αφού βασίζονται σε δεδομένα πραγματικού χρόνου και επιτρέπουν την κατανομή ισχύος, την ενεργοποίηση φορτίων και την αποθήκευση ενέργειας. Επιπλέον, δίνουν την δυνατότητα χρήση προβλεπτικών μοντέλων τιμών τόσο αγοράς όσο και κατανάλωσης. Ο πιο δημοφιλής τρόπος φαίνεται να είναι η προσέγγιση μιας Offshore Bidding Zone (OBZ), η οποία θα λειτουργεί ως ρυθμιστικό τεχνολογικό μοντέλο, επιτρέποντας την εκκαθάριση προσφορών και τη δυναμική ενεργοποίηση πόρων αποθήκευσης.

Συμπερασματικά, η υιοθέτηση η ενεργειακή μετάβαση προς την ανθρακοποίηση προϋποθέτει την υιοθέτηση νέων μορφών αρχιτεκτονικής δικτύων, ικανών να απορροφήσουν την αβεβαιότητα της ανανεώσιμης παραγωγής. Η εφαρμογή αποκεντρωμένων μοντέλων διαχείρισης, σε συνδυασμό με λύσεις αποθήκευσης βασισμένες σε Power-to-X, δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που ενδυναμώνει τόσο την αυτονομία των επιμέρους κρατών όσο και τη συλλογική ευελιξία της ευρωπαϊκής αγοράς. Υπό αυτό το πρίσμα, η συγκεκριμένη κατεύθυνση μπορεί να ερμηνευθεί ως το θεμέλιο μιας μελλοντικής ενιαίας υποδομής ενέργειας, πλήρως συμβατής με τους στόχους της κλιματικής ουδετερότητας και της αποκέντρωσης.

3.1.5 Ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα

Η κεντρική ιδέα μιας ενεργειακά αυτόνομης περιοχής, όπως αυτή που εξετάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι υψίστης σημασίας όχι μόνο για την τοπική κοινωνία, αλλά και για την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, καθώς διαδραματίζει αρκετά κρίσιμο ρόλο για το ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα. Από ότι φαίνεται, ο ενεργειακός κόμβος στην νήσο Bornholm όχι μόνο θα καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές της ανάγκες, αλλά πρόκειται και να εξυπηρετεί και τις ανάγκες της ίδιας της χώρας (Δανία) αλλά και τις αγορές της υπόλοιπης κεντρικής Ευρώπης, διαμορφώνοντας έτσι το νέο ενεργειακό και οικονομικό σχέδιο.

Η εκτεταμένη χρήση ΑΠΕ σε περιοχές με υψηλές ενεργειακές ανάγκες, έχει ως αναπόδραστο αποτέλεσμα την μετατόπιση της καμπύλης *Merit-Order*. Η καμπύλη *Merit-Order*, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, αντικατοπτρίζει την καμπύλη προσφοράς, όταν οι μονάδες παραγωγής ταξινομούνται με βάση το οριακό κόστος παραγωγής (MC - Marginal Cost). Η φιλοσοφία της συγκεκριμένης ανάλυσης βασίζεται στο χαμηλό κόστος παραγωγής που προσφέρουν οι ΑΠΕ. Όπως παρατηρούμε και στο Διάγραμμα XX οι μονάδες με το χαμηλότερο κόστος, χρησιμοποιούνται πρώτες με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης με το χαμηλότερο κόστος.



Γράφημα 4 – Λειτουργία Merit-Order - (Callum & Bradley, 2018)

Έτσι με την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, αυξάνεται ραγδαία η προσφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να συρρικνώνεται η οριακή τιμή του συστήματος, ωφελώντας έτσι τους καταναλωτές με χαμηλότερος κόστος αγοράς ενέργειας. Όπως και στο παράδειγμα της ενεργειακής νησίδας της Δανίας, η επίδραση της καμπύλης *Merit-Order* γίνεται απόλυτα εμφανής, καθώς και η Δανία σαν χώρα έχει υψηλή κατανάλωση ενέργειας, αλλά και μέσω της υπεράκτιας διασύνδεσης μπορεί να προμηθεύει την Κεντρική Ευρώπη όπως Γερμανία και Ολλανδία με φθηνή πράσινη ενέργεια (Ktenidis & Boulogiorgou, 2020).

Στον αντίποδα, βρίσκονται και οι παραγωγοί ενέργειας, αφού σε περιόδους υπερπαραγωγής οι τιμές της αγοράς μειώνονται δραματικά, επιφέροντας αρνητικές συνέπειες στα έσοδά τους. Σύμφωνα με αναλύσεις, η μείωση του κόστους των καταναλωτών υπερκαλύπτει τη μείωση των εσόδων των παραγωγών, αυξάνοντας έτσι την συνολική κοινωνική ευημερία. Συνεπώς ο καθαρός αντίκτυπος σε ευρωπαϊκή κλίμακα έχει θετικό πρόσημο, δημιουργώντας έτσι οικονομικό και επενδυτικό ενδιαφέρον για πράσινη μετάβαση (Article on website). Ωστόσο, για να μπορέσει να γίνει αυτό και να εξομαλυνθούν τυχόν ανισορροπίες στην αγορά, είναι απαραίτητο να υιοθετηθούν χρηματοοικονομικά εργαλεία και μέτρα αποζημιώσεων για τους παραγωγούς, διασφαλίζοντας έτσι την εξομάλυνση των εσόδων και ενισχύεται η επενδυτική σταθερότητα.

3.2 Ελλάδα: Project Tilos - Ο πρώτος υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η Ελλάδα στην προσπάθειά της να εναρμονιστεί και εκείνη με τους Ευρωπαϊκούς Στόχους περί απανθρακοποίησης- όπως αυτοί ορίστηκαν στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) το 2019 - ξεκίνησε ποικίλες δράσεις ως προς την επίτευξή του. Ένα από τα σημαντικότερα έργα ήταν το Project TILOS (Technology Innovation for the Local Scale, Optimal Integration of Battery Energy Storage), μέσω του προγράμματος Horizon 2020, το οποίο το χρηματοδοτήθηκε συνολικά με €13,74 εκατ. -εκ των οποίων τα €11 εκατ. από την ΕΕ (European Commission 2021)- και διήρκησε 4 χρόνια.

Απώτερος σκοπός του συγκεκριμένου έργου ήταν η ανάπτυξη και υλοποίηση ενός μικροδικτύου ώστε να επιτευχθεί **α) εκτεταμένη χρήση από ΑΠΕ, β) ενεργειακή αυτονομία και γ) αποθήκευση της παραχθείσας ενέργειας**. Κατά αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιήθηκε η χρήση των ΑΠΕ, αφού μέσω αυτών δόθηκε η δυνατότητα κάλυψης της ανάγκης για ηλεκτρική ενέργεια μεγάλου μέρους του νησιού της Τήλου. Πολύ σημαντικός παράγοντας στην επιτυχημένη έκβαση του project είχαν και οι κάτοικοι του νησιού, αφού χωρίς την βοήθειά τους θα ήταν σχεδόν ανέφικτο να υλοποιηθεί. Έτσι αυτή η προσπάθεια εταίρων και κατοίκων οδήγησε στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος άνθρακα της Τήλου και ενίσχυσε την προστασία του περιβάλλοντος καταπολεμώντας την κλιματική αλλαγή.

3.2.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά και αποτελέσματα του Project TILOS

Η Τήλος είναι ένα μικρό ελληνικό νησί που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του Αιγαίου Πελάγους και ανήκει στο απομακρυσμένο σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων. Το μέγεθος του νησιού είναι περίπου 64 km² και η παράκτια περίμετρός του είναι σχεδόν 63 km, με το έδαφός του να είναι ημιορεινό και ορεινό. Στο νησί υπάρχουν δύο κύριες περιοχές, το Μεγάλο Χωριό (βόρειο τμήμα του νησιού) και τα Λιβάδια (νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού), με τον συνολικό μόνιμο πληθυσμό του νησιού να φτάνει τους περίπου 533 κατοίκους (255 και 278 αντίστοιχα) και σχεδόν να τριπλασιάζεται κατά τη θερινή περίοδο ένεκα τουρισμού. Οι τρέχουσες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας της Τήλου ανέρχονται σε περίπου 3,2 GWh/έτος με ετήσια μέγιστη ζήτηση περίπου 1MW. Οι ανάγκες αυτές καλύπτονται αποκλειστικά από τη λειτουργία του πετρελαϊκού σταθμού παραγωγής ενέργειας της Κω

(βόρεια της Τήλου), όπου μέσω υποθαλάσσιας καλωδιακής διασύνδεσης (20kV) φτάνει στη βόρεια πλευρά του νησιού αφού πρώτα διασχίσει τη Νίσυρο.



Εικόνα 1 - Χάρτης νήσου Τήλου

Η λύση που προτείνεται μέσω του project TILOS αφορά την δημιουργία ενός μικροδίκτυου στο νότιο μέρος του νησιού (εξυπηρετώντας έτσι κυρίως την κοινότητα των Λιβαδιών). Στην συγκεκριμένη περιοχή η ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται περίπου σε 1,5 GWh και ο ρυθμός κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στα 450 kW. Συνεπώς, το συγκεκριμένο μικροδίκτυο εκτός του ότι θα συντονίζει ολόκληρη τη λειτουργία του συστήματος έχει ως γενικότερο σκοπό την επίτευξη της ισορροπίας μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται εξ' ολοκλήρου από φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα και της ενεργειακής ζήτησης του νησιού.

Αναφορικά τώρα με τα περιβαλλοντικά αλλά και τα οικονομικά οφέλη που επέφερε το Project TILOS, καταμετρήθηκε ότι σε διάστημα περίπου 3 ετών, το σύστημα κατάφερε να παράγει συνολικά 3.300 MWh. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αποφυγή 3.000 τόνων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενώ η εξοικονόμηση του κόστους των καυσίμων ανήλθε στις €510 χιλιάδες. Τέλος το Project επιτεύχθηκε με τεράστια επιτυχία καθώς κατέκτησε δύο βραβεία στο *EU Sustainable Energy Awards 2017 (Energy Islands και Citizens Award)*.

3.2.2 Τεχνικά στοιχεία και περιγραφή της υποδομής

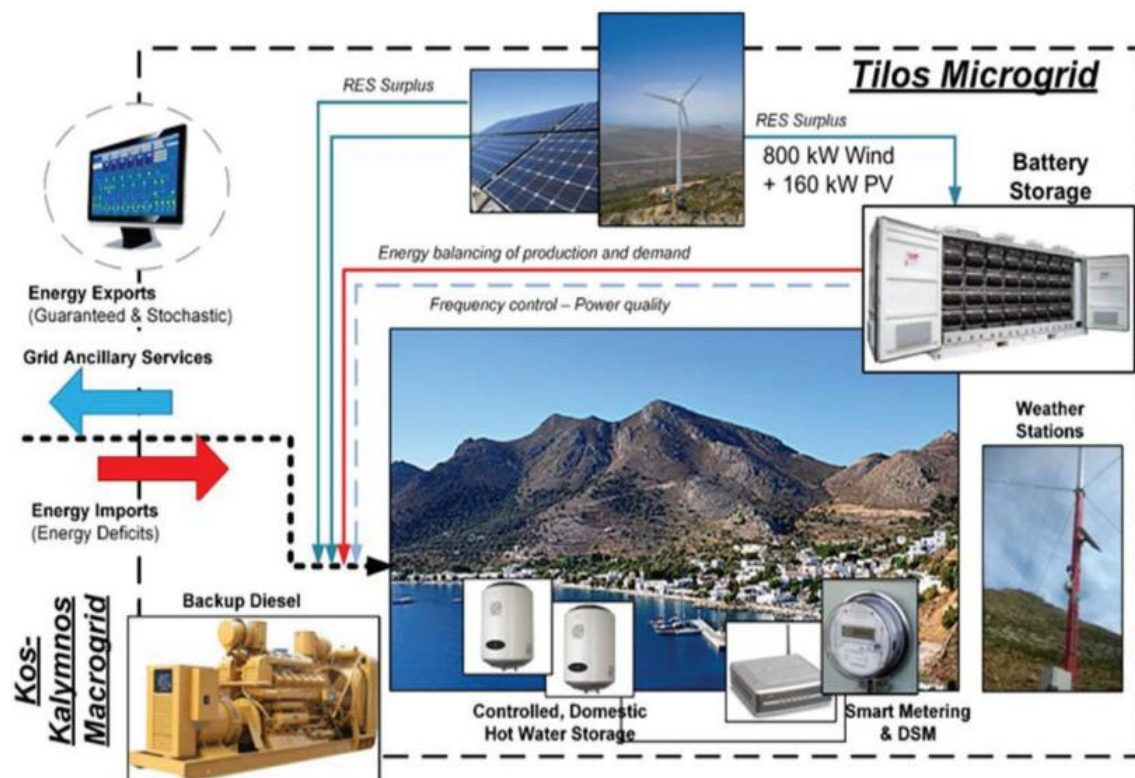
Το Project TILOS χαρακτηρίζεται από το καινοτόμο σύστημα υποδομής που διαθέτει. Στα πλαίσια αυτά κατασκευάστηκε ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό/αιολικό σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας - ένα *μικροδίκτυο*. Το μικροδίκτυο είναι ένα τοπικό ενεργειακό σύστημα το οποίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από ΑΠΕ και ενσωματώνει συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία τα διαχειρίζεται με έξυπνο και αποδοτικό τρόπο λαμβάνοντας υπόψη τις δυνάμεις της ζήτησης και της κατανάλωσης.

Πιο συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν: μια ανεμογεννήτρια 800kW, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο 160kW, δύο μπαταρίες NaNiCl₂ ωφέλιμης χωρητικότητας αποθήκευσης 2 MWh, εξειδικευμένοι μετατροπείς (inverters) 500 kVA, έξυπνοι μετρητές (smart meters), συσκευές διαχείρισης ζήτησης ενέργειας (Demand Side Management - DSM), τρεις μετεωρολογικοί σταθμοί για τη συλλογή επιτόπιων

μετρήσεων ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και πίεσης αέρα, υγρασίας κ.λπ. και ένα κέντρο λειτουργίας βασισμένο σε Εποπτικό Έλεγχο και Συλλογή Δεδομένων (SCADA) που συντονίζει τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος χρησιμοποιώντας το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας Μικροδικτύου (MEMS).

Πιο συγκεκριμένα, η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε ενώ είχε ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις έδινε τη δυνατότητα μέγιστης αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Το φωτοβολταϊκό πάρκο από την άλλη, διασφάλιζε την μέγιστη ισχύ εξόδου ειδικότερα σε περιόδους αιχμής (π.χ. καλοκαιρινούς μήνες και περίοδοι αυξημένου τουρισμού) και παράλληλα προσέφερε τη δυνατότητα παροχής εγγυημένων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε ημερήσια βάση μέσα στο μικροδίκτυο. (Tsala, 2023). Οι μπαταρίες NaNiCl₂ είχαν πολύ σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της ενεργειακής ισορροπίας στο μικροδίκτυο και στην διευκόλυνση υψηλής διεύθυνσης ΑΠΕ, καθώς προσέφερε μεγάλη σταθερότητα μέσα στο μικροδίκτυο επιτρέποντας συνθήκες εύκολου, άμεσου και ασφαλούς ανεφοδιασμού.

Το σύστημα επεκτάθηκε αργότερα από την Eunice Energy Group, η οποία ανέπτυξε την ολοκληρωμένη πλατφόρμα S4S (Storage For Sustainability, Smart Grid, Solutions, Security) για online διαχείριση ΑΠΕ, πρόβλεψη φορτίων, ασφαλή λειτουργία και εξασφαλισμένες παροχές.



Γράφημα 5 – Λειτουργία μικροδικτύου νήσου Τήλου - (Zafirakis & Kaldellis, 2020)

3.2.3 Λειτουργία μικροδικτύου

Ο υβριδικός αποθηκευτικός σταθμός ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε στο Project TILOS, βασίστηκε στην πρωτοποριακή καινοτομία του συστήματος μπαταριών NaNiCl₂ (ZEBRA) που υποστηρίζει τη λειτουργία του μικροδικτύου. Οι συγκεκριμένες μπαταρίες είχαν μέγιστη χωρητικότητα 2,88 MWh, το οποίο μεταφράζεται σε περίπου 12 ώρες αυτονομίας. Η τεχνολογία αυτή των μπαταριών επιλέχθηκε για την δυνατότητα που προσφέρει περί βελτίωσης του ισοζυγίου ισχύος και τη μεγιστοποίηση του μεριδίου των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή. Παράλληλα εξαιτίας της υψηλής δυνατότητας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βοηθάει στην ασφάλεια εφοδιασμού του νησιού, αφού και με τη βοήθεια της ανεμογεννήτριας Enercon E53 (ισχύς 80 kW) υπολογίστηκε πως καλυπτόταν περίπου το 70% των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο της εξάρτηση του νησιού από το υποθαλάσσιο καλώδιο τροφοδοσίας της Κως/Καλύμνου.

Πιο συγκεκριμένα το μικροδίκτυο λειτουργεί ως εξής: Αρχικά παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας τις εγκαταστάσεις των ΑΠΕ - ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά πάνελ. Στην συνέχεια η παραγόμενη ενέργεια μεταφέρεται στις μπαταρίες NaNiCl₂ (ZEBRA). Εκεί ανάλογα με τις ανάγκες για ενέργεια υπάρχουν δύο περιπτώσεις: α) είτε θα αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια όταν η κατανάλωση είναι μικρότερη από τις ΑΠΕ, ή β) θα αποδίδεται η παραγόμενη ενέργεια στο δίκτυο όταν η κατανάλωση υπερβαίνει τις ΑΠΕ. Τέλος, υπάρχει το στάδιο της διανομής και η σύνδεση με το τοπικό δίκτυο. Εκεί η ενέργεια διοχετεύεται στο τοπικό δίκτυο τροφοδοτώντας σπίτια, επιχειρήσεις, υποδομές, δημόσια κτίρια κ.α.

Για να μπορέσουν όλα τα παραπάνω στάδια να καταστούν δυνατά, είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων ευφυούς διαχείρισης δεδομένων EMS (Energy Management Systems) και η διασύνδεσή τους με το σύστημα SCADA. Το EMS παρακολουθεί όλες τις λειτουργίες των τοπικών συστημάτων του μικροδικτύου και αποφασίζει για τις μελλοντικές λειτουργίες, μιας και παρέχει αξιόπιστες προβλέψεις τόσο για τη ζήτηση φορτίου όσο και για το ύψος παραγόμενης ενέργειας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και την κατανάλωση. Έτσι το EMS λειτουργεί εποπτικά και:

- Συλλέγει δεδομένα από τους εγκατεστημένους αισθητήρες και μετρητές (σύστημα IoT)
- Εποπτεύει την παραγωγή ενέργειας, την αποθήκευσή της καθώς και την κατανάλωση
- Προβλέπει την ζήτηση
- Δίνει προτεραιότητα στην αξιοποίηση των ΑΠΕ
- Ενεργοποιεί/απενεργοποιεί μπαταρίες και μετρητές με στόχο την εξισορρόπηση του φορτίου

3.2.4 Ανάλυση έργου και συμπεράσματα

Το πιλοτικό έργο στη νήσο της Τήλου, στα πλαίσια των προσπαθειών της Ελλάδας για απανθρακοποίηση έως το 2025, σίγουρα αποτέλεσε ένα εμβληματικό έργο στο χώρο των μικροδικτύων και την ενεργειακής αυτονομίας. Η καινοτομία και η ευφυΐα του πρώτου υβριδικού ενεργειακού συστήματος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, θέτουν υψηλές προδιαγραφές και κανόνες για τα μελλοντικά βήματα ως προς την μεγαλύτερη και αποτελεσματικότερη διείσδυση των ΑΠΕ με πλήρη αξιοποίηση τεχνολογιών που υποστηρίζει το IoT.

Το Project TILOS, ήταν ένα πολύ σωστά δομημένο και οργανωμένο μικροδίκτυο παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας αφού συνδύασε τεχνολογική καινοτομία σε ΑΠΕ, IoT και EMS. Ο καταλυτικότερος παράγοντας ήταν αδιαμφισβήτητο το έξυπνο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για την εξομάλυνση της παραγωγής, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση προβλεπτικών συστημάτων ελέγχου. Κατά αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε η ενεργειακή αυτονομία της περιοχής, καθώς το μικροδίκτυο εξασφάλιζε την τροφοδοσία του νησιού σε περίπτωση διακοπής της υποθαλάσσιας τροφοδοσίας με την Κω, ενώ παράλληλα συμμετείχε στην σύνδεση με το τοπικό δίκτυο διανέμοντας την πλεονάζουσα αποθηκευμένη ενέργεια. Έτσι, δόθηκε η δυνατότητα και στα νοικοκυριά να συμμετέχουν ενεργά στην διαχείριση της ενεργειακής ζήτησης μέσω των μηχανισμών των ενεργειακών κοινοτήτων, μειώνοντας έτσι την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, την εξάρτηση από τα εισαγόμενα καύσιμα και το κόστος ηλεκτροδότησης.

Κατά τινά τρόπο, η οικονομική βιωσιμότητα δεν φαντάζει πλέον ένα ουτοπικό σενάριο, καθώς χάρη στο Project TILOS, κατάφεραν να εξοικονομηθούν έως και 1.000 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, ενώ ανέδειξε σημαντικά την αρωγή των συστημάτων και τεχνολογιών IoT, αναδεικνύοντας την προστιθέμενη αξία που επιφέρουν στο σύστημα για τηλεμετρία και εποπτεία του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και αποθήκευσής του. Το μικροδίκτυο της νήσου της Τήλου δείχνει ένα αισιόδοξο μέλλον ότι ίσως τα μικρά Ελληνικά νησιά μπορούν να επιτύχουν την πλήρη απανθρακοποίηση τους και την ενεργειακή τους αυτονομία με τη χρήση αισθητήρων IoT και ΑΠΕ.

3.3 Διευρωπαϊκό πρόγραμμα InterConnect H2020 – Ψηφιακή IoT πλατφόρμα για αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας

Το πρόγραμμα InterConnect H2020, παρόλο που δεν έχει ως πρωταρχικό ρόλο την ενεργειακή αυτονομία, έχει αναπτυχθεί με στόχο να βοηθήσει ενεργά για την απόκτησή της μέσω της εκτεταμένης χρήσης IoT πλατφορμών. Πρόκειται για τη δημιουργία μιας ψηφιακής αγοράς (market place), μέσω της οποίας οι χρήστες ενέργειας σε νοικοκυριά, κτίρια, δίκτυα διανομής, πωλητές ενέργειας κ.α. θα συνεργαστούν ώστε να επιτύχουν έξυπνες λύσεις διαχείρισης ενέργειας μέσω επτά πιλοτικών έργων σε Πορτογαλία, Βέλγιο, Γερμανία, Ολλανδία, Ιταλία, Γαλλία και Ελλάδα.

Απώτερος σκοπός του προγράμματος είναι η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας στην εμβέλεια των τελικών χρηστών, μέσω ενός ανθεκτικού και πρακτικού οικοσυστήματος το οποίο επικεντρώνεται σημαντικά στον χρήστη, και παράλληλα είναι αρκετά προσανατολισμένο στην αγορά, ώστε να διασφαλιστεί η ενεργειακή αποδοτικότητα με μειωμένο κόστους για την μέγιστη ωφέλεια των τελικών χρηστών. Η ψηφιακή αγορά που δημιουργείται βασίζεται σε πρακτικές διαλειτουργικότητας, αρχιτεκτονικής διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και πρότυπα επικοινωνίας SAREF (Smart Appliances Reference Ontology). Το έργο κόστισε €36 εκατ. εκ των οποίων τα €30 εκατ. ήταν χρηματοδότηση από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Horizon 2020 και διήρκεσε 4 χρόνια .

3.3.1 Τομείς ανάπτυξης υποδομής έργου

Το project InterConnect H2020, αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό σύστημα που συνδυάζει τόσο τεχνική υποδομή όσο και ψηφιακή. Πιο συγκεκριμένα εγκαταστάθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ σε κτίρια οικιστικά και εμπορικά, μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles) με λειτουργία έξυπνης φόρτισης και Virtual Power Plants. Σκοπός της χρήσης των φωτοβολταϊκών πάνελ ήταν η ιδιοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των χρηστών και μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο. Οι μπαταρίες που ενσωματώθηκαν στο σύστημα για αποθήκευση ενέργειας, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη βέλτιστη χρήση της ενέργειας που παράγεται, επιτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο την αποτελεσματικότερη διανομή ενέργειας κατά τις ώρες που μεταβάλλεται σημαντικά η ζήτηση. Εκτός των προαναφερθέντων υποδομών τοποθετήθηκαν επίσης και smart meters, έξυπνοι θερμοστάτες για αυτόματη ρύθμιση της θερμοκρασίας, smart sensors κ.α. Όλα αυτά τα αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία ενός έξυπνου οικοσυστήματος που προωθεί την ενεργειακή αποδοτικότητα και συμβάλει στην ενεργειακή αυτονομία.

Αναφορικά με την ψηφιακή υποδομή του προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν IoT sensors και smart meters για τη μέτρηση κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, έξυπνες συσκευές (smart appliances όπως πλυντήρια, θερμοσίφωνες και αντλίες θερμότητας), gateways και APIs για την επικοινωνία των διασυνδεδεμένων συσκευών και ένα σύστημα SAREF για κοινή γλώσσα δεδομένων διασφαλίζοντας έτσι την διαλειτουργικότητα, η οποία αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο του InterConnected H2020. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν εξελιγμένα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence) και μηχανικής μάθησης (Machine Learning) ώστε να γίνεται η έγκαιρη και έγκυρη πρόβλεψη του φορτίου, καθώς και να λαμβάνονται αποφάσεις για ενέργειες βελτιστοποίησης. Σχετικά με το προϊόν που χρησιμοποιούσαν οι τελικοί χρήστες, αναπτύχθηκε μια εφαρμογή (user application) η οποία υποστηριζόταν από ένα EMS, μέσω του οποίου μπορούσαν να παρακολουθούν και να ελέγχουν την κατανάλωσή τους σε πραγματικό χρόνο, να λαμβάνουν ειδοποιήσεις και συστάσεις για βελτίωση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας και να ενημερώνονται για την καταναλωτική τους συμπεριφορά ελέγχοντας την χρήση των συσκευών τους απομακρυσμένα.

3.3.3 Αρχιτεκτονική του συστήματος

Η αρχιτεκτονική του προγράμματος InterConnect H2020 αποτελεί μια πολύ σύνθετη και καινοτόμο λύση, αφού συνδέει συσκευές IoT, πρωτόκολλα επικοινωνίας και χρήστες με διαλειτουργικό τρόπο. Βασίζεται σε τέσσερις πυλώνες:

1. *Δίαυλος συνδεσιμότητας (connectivity bus)*: Λειτουργεί ως βασικός μηχανισμός επικοινωνίας ο οποίος παρέχει ένα σύνολο συνδέσμων σε τελικά σημεία, συσκευές, πλατφόρμες και υπηρεσίες για την αποτελεσματικότερη ανταλλαγή δεδομένων
2. *“Αποθήκη” υπηρεσιών (service store)*: Αποτελεί μια “αποθήκη” υπηρεσιών η οποία αναπτύσσεται είτε σε cloud περιβάλλον είτε σε ένα M2M περιβάλλον.
3. *Distributed orchestrator*: Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του έργου, αφού είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη και τον συντονισμό των υπηρεσιών.
4. *Ενεργοποιητές P2P (Peer to Peer)*: Δίνουν την δυνατότητα στις συσκευές να συμμετέχουν στις αγορές ενέργειας, χρησιμοποιώντας τεχνολογία blockchain και χρήση έξυπνων συμβολαίων

για την ρύθμιση των αγορών, τον έλεγχο και την διαφάνεια των συναλλαγών και την γενικότερη εποπτεία και λειτουργία της αγοράς.

Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί το γεγονός πως ολόκληρη η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται σε ένα σύνολο ασφαλών και ιδιωτικών ψηφιακών πλατφορμών. Τα στοιχεία που προέρχονται από τις ποικίλες συσκευές και επικοινωνούν μέσω του SAREF, περιέχουν ευαίσθητα δεδομένα τα οποία είναι αρκετά ελκυστικά για κυβερνοεπιθέσεις. Μέσω των παραπάνω τεχνολογιών διασφαλίζεται η ασφαλή μεταφορά και αποθήκευση των δεδομένων.

3.3.4 Αποτελέσματα και επιτεύγματα του προγράμματος

Αδιαμφισβήτητα, το πρόγραμμα InterConnect H2020, στέφθηκε με πλήρη επιτυχία αφού στα πλαίσια λειτουργίας του επιτεύχθηκε σημαντική εξοικονόμηση κόστους ενέργειας (περίπου 10-20% ανά νοικοκυριό) και αυξήθηκε η ιδιοκατανάλωση μέσω της εκτεταμένης χρήσης ΑΠΕ σε ποσοστό 20%. Οι μπαταρίες και τα μικροδίκτυα που εγκαταστάθηκαν, αύξησαν την παραγωγή ενέργειας, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση του εκάστοτε κτιρίου από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού.

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα του έργου ήταν η δημιουργία των ενεργειακών πολιτών. Οι πολίτες εξαιτίας της αυξημένης ιδιοπαραγωγής από απλοί παραδοσιακοί καταναλωτές, λαμβάνουν νέο ρόλο - αυτόν του καταναλωτή παραγωγού. Έτσι μπορούν όχι μόνο να καλύπτουν τις δικές τους ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και να μπορούν να προμηθεύουν τους συμπολίτες τους. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται δύο νέες κοινοτικές ομάδες στην ΕΕ α) Κοινότητες ΑΠΕ και β) Ενεργειακές Κοινότητες Πολιτών. Το πρόγραμμα InterConnect H2020 διευκόλυνε σαφώς την αλληλεπίδραση των πολιτών που δραστηριοποιούνται στον τομέα της ενέργειας, και συνέβαλε σημαντικά στην μείωση των εμποδίων εισόδου στην συγκεκριμένη αγορά.

Έτσι η συμμετοχή των εμπορικών καταναλωτών αξιοποιήθηκε μέσω μηχανισμών Personal to Purchase με αποτέλεσμα να αυξηθεί σημαντικά η ενσωμάτωση των ΑΠΕ για ιδιοπαραγωγή και ιδιοκατανάλωση, μετατοπίζοντας την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς την τιμή της αγοράς, αφού η εξάρτηση από το δίκτυο όλο και συρρικνωνόταν (Lytras & Serban, 2020).

4. Τεχνοοικονομική ανάλυση ανάπτυξης δικτύου solar carport σε υπαίθριους χώρους στάθμευσης της Αθήνας

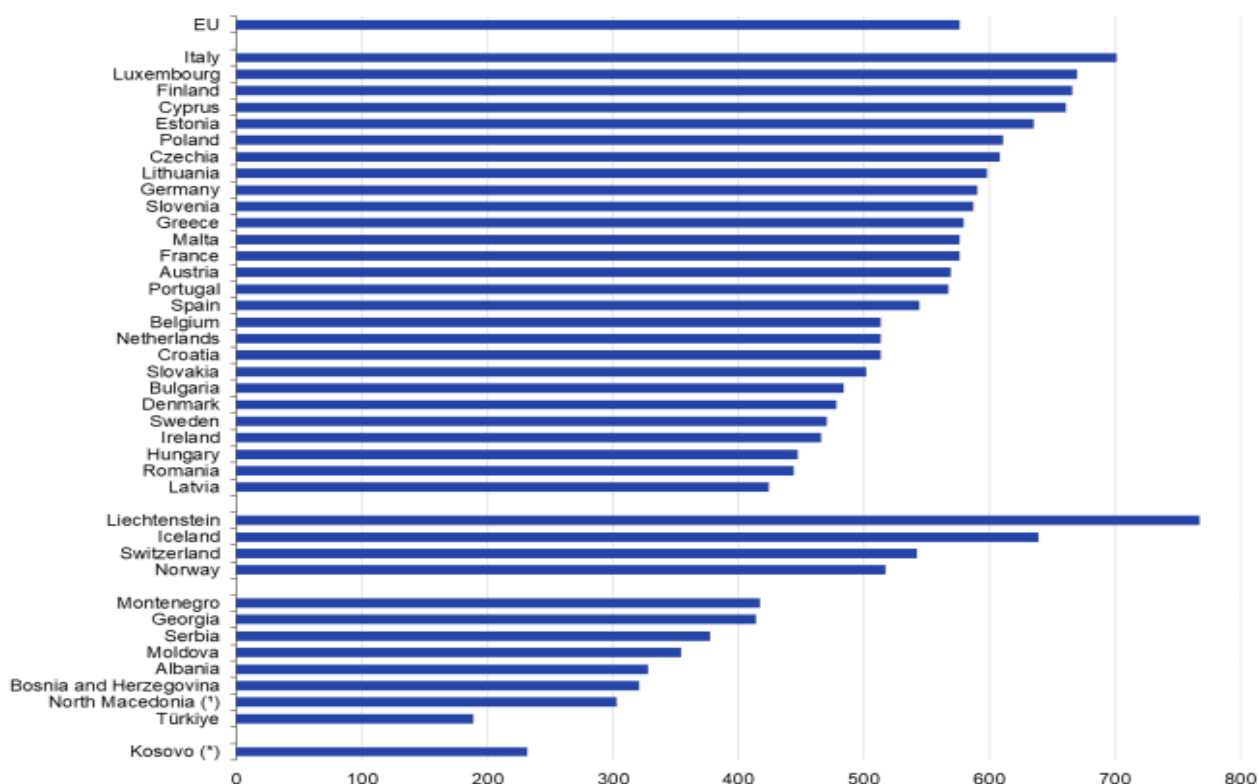
4.1 Εισαγωγή και αναγνώριση της παρούσας κατάστασης

Είναι ευρέως διαδεδομένο το γεγονός, πως ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ο σύγχρονος αστικός ιστός παγκοσμίως, είναι η έλλειψη διαθέσιμων χώρων στάθμευσης. Το παραπάνω ζήτημα επιφέρει σοβαρές συνέπειες τόσο στην ποιότητα ζωής των κατοίκων, εντείνοντας έτσι το συγκοινωνιακό πρόβλημα, όσο και στην επιδείνωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, το φαινόμενο αποτυπώνεται στον δείκτη *motorisation rate*, ο οποίος μετρά τον αριθμό επιβατικών αυτοκινήτων ανά 1.000 κατοίκους. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat (Shafiq, M. S., 2020) (2024), η Ελλάδα καταγράφει έναν από τους υψηλότερους δείκτες κατοχής αυτοκινήτου στην Ευρώπη, με περισσότερα από 600 επιβατικά οχήματα ανά 1.000 κατοίκους, γεγονός που καταδεικνύει την έντονη εξάρτηση του πληθυσμού από το ιδιωτικό αυτοκίνητο.

Motorisation rate, 2024

(number of passenger cars / thousand inhabitants)



Note: Ukraine: data not available.

(*) 2023 data instead of 2024.

(*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/99 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.

Source: Eurostat (online data code: road_eqs_carhab)

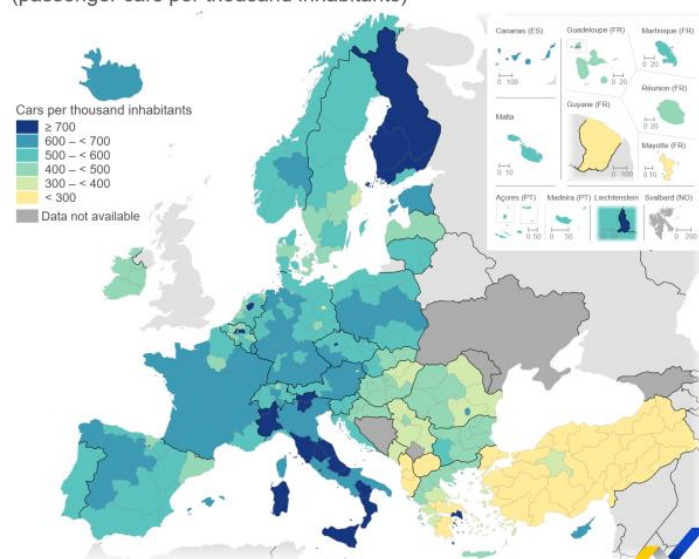
eurostat

Γράφημα 6 - Αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων ανά 1.000 κατοίκους, EUROSTAT 2024

Ως αποτέλεσμα, οι ανάγκες για χώρους στάθμευσης στα μεγάλα αστικά κέντρα, και ιδιαίτερα στην Αθήνα, παρουσιάζουν αυξητική τάση και ασκούν πίεση στις δημοτικές υποδομές. Παρά το γεγονός ότι η πόλη διαθέτει αρκετά δημοτικά υπαίθρια πάρκινγκ τα περισσότερα παραμένουν ενεργειακά ανεκμετάλλευτα. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή κατάταξη, η Αθήνα συμπεριλαμβάνεται στην λίστα με τις 10 πόλεις της ΕΕ με τον υψηλότερο δείκτη οχημάτων ανά 1.000 κατοίκους, κατακτώντας την 5η θέση. Στο γράφημα 6 φαίνεται πως ο δείκτης είναι 1.046, ενώ ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος βρίσκεται μόλις στο 697. Ως εκ τούτου, στο μεγαλύτερο μέρος των μητροπόλεων, οι δημοτικές αρχές προβαίνουν σε υπέρογκες επενδύσεις για εξεύρεση ή και δημιουργία νέων θέσεων στάθμευσης, γεγονός που συχνά συγκρούεται με την ανάγκη για πράσινο, κοινόχρηστους χώρους και αναβαθμισμένες αστικές υποδομές.

Παρατηρώντας τώρα την επικρατούσα κατάσταση στην Ελλάδα, στον *εικόνα* παρατηρούνται έντονες περιφερειακές διαφορές ποσοστού που καταγράφηκε στην περιφέρεια της πρωτεύουσας (872 επιβατικά αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους στην περιφέρεια της Αττικής) και των χαμηλότερων ποσοστών που παρατηρήθηκαν στις άλλες περιοχές της χώρας (397 επιβατικά αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους κατά μέσο όρο), γεγονός που υπογραμμίζει την κρισιμότητα του θέματος στην αστική ζώνη της Αθήνας.

Motorisation rate, by NUTS 2 regions, 2023
(passenger cars per thousand inhabitants)



Εικόνα 2 - Motorisation rate - Map

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια τεχνοοικονομική ανάλυση για την ανάπτυξη ενός δικτύου solar carport στους δημόσιους χώρους στάθμευσης της Αθήνας. Το συγκεκριμένο έργο αποτελεί μεγάλη πρόκληση καθώς συνδυάζει τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ με αποθήκευση και έξυπνη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας μέσω IoT. Κατά τινά τρόπο, αξιοποιώντας τις υφιστάμενες υποδομές των χώρων στάθμευσης για την εγκατάσταση ολοκληρωμένου συστήματος solar carport με διαχείριση IoT συστήματος, μπορεί ο ανεκμετάλλευτος αυτός χώρος, να μεταβληθεί σε μία μονάδα παραγωγής ενέργειας μετατρέποντάς το σε πολύτιμο asset για την περιοχή.

4.2 Αντικείμενο της ανάλυσης

Το αντικείμενο της παρούσας τεχνοοικονομικής μελέτης πραγματεύεται τις δυνατότητες εφικτότητας εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (solar carport) με υποστήριξη τεχνολογιών IoT, στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης του σταθμού του μετρό *Δουκίσσης Πλακεντίας*, με πιθανότητα μελλοντικής επέκτασης του δικτύου στους αντίστοιχους υπαίθριους χώρους των σταθμών του μετρό. Στην μελέτη εξετάζεται τόσο η τεχνική όσο και η οικονομική πλευρά της προτεινόμενης λύσης. Η επιλογή του πεδίου εφαρμογής προκύπτει με βάση την αξιολόγηση των κριτηρίων και την στρατηγική σημασία που έχουν τα συγκεκριμένα σημεία-σταθμοί των αστικών συγκοινωνιών της Αθήνας, το μέγεθος των διαθέσιμων χώρων στάθμευσης καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία που διαθέτουν.

Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη περιλαμβάνει τις τεχνικές προδιαγραφές που θα πρέπει να πληρούνται για την υλοποίηση του έργου -τόσο σε επίπεδο Hardware όσο και σε επίπεδο Software-, την εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας (βασιζόμενοι σε ηλιακή ακτινοβολία, επιφάνεια εγκατάστασης και δυνατοτήτων εξοπλισμού), και οικονομική αξιολόγηση του έργου.

4.3 Σκοπός και στόχοι του έργου

Ο κυριότερος σκοπός της προτεινόμενης λύσης είναι η εγκατάσταση και λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης του σταθμού του μετρό *Δουκίσσης Πλακεντίας*, με δυνατότητα επέκτασης σε παρεμφερή σημεία, με σαφή στόχο την ενεργειακή αυτονομία για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών (ή μέρους τους) του Δήμου, μειώνοντας κατά τινά τρόπο την εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Το συγκεκριμένο έργο, επιλύει τα ζητήματα περί προσπαθειών απανθρακοποίησης προάγοντας την ενεργειακή βιωσιμότητα των αστικών υποδομών, ενώ παράλληλα δημιουργεί πρόσφορο έδαφος στον τοπικό ψηφιακό μετασχηματισμό (μέσω τεχνολογιών IoT) και έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι στόχοι του έργου περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την υψηλή αξιοποίηση των ΑΠΕ σε υφιστάμενες υποδομές, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, τη μείωση του κόστους ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης και την ενίσχυση των υποδομών βιώσιμης κινητικότητας. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη του παρακάτω παράγοντες, προέκυψε η ανάγκη υλοποίησης ενός τέτοιου έργου.

1. Αυξημένη ανάγκη ηλεκτρισμού για δημοτικές υποδομές (φωτισμός κλπ.)
2. Ανάγκη για ευθυγράμμιση με ευρωπαϊκά πρότυπα για ενεργειακή βιωσιμότητα και απανθρακοποίηση
3. Ανάγκη για πρόληψη ενεργειακών κρίσεων μέσω της ενεργειακής αυτονομίας
4. Ανάγκη για μείωση του κόστους των ενεργειακών προϊόντων ηλεκτρισμού

Βέβαια, εκτός των περιβαλλοντικών οικονομικών οφελών, η εγκατάσταση ενός solar carport σε υπαίθριους χώρους στάθμευσης, παρέχει και ευεργετικά αποτελέσματα και στην τοπική κοινωνία βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής (επαρκής φωτισμός, σκίαση αυτοκινήτων, αύξηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων) και σαφώς μείωση των δημοτικών τελών αφού θα υπάρξει πλέον η

Τέλος, το έργο δίνει και δυνατότητα επέκτασης, καθώς μπορεί να κλιμακωθεί και σε άλλες περιοχές του Δήμου όπως στις υπόλοιπες στάσεις του μετρό που διαθέτουν υπαίθριους χώρους στάθμευσης, σε μεγάλα δημοτικά κτίρια, πανεπιστήμια, σχολεία, αθλητικές εγκαταστάσεις, αεροδρόμια κλπ. Η επιτυχία του έργου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας, για την οποία θα πρέπει να προγραμματιστούν δράσεις ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης, όπως εκπαιδευτικές εκδηλώσεις, ημερίδες και δημοτικές διαβουλεύσεις. Η κοινωνική αποδοχή και η συμμετοχή των πολιτών σε όλα τα στάδια του έργου θα διασφαλίσουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητά του.

4.4 Γενική περιγραφή του έργου

Το έργο που προτείνεται μέσω της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας με στόχο την ενεργειακή αυτονομία με χρήση τεχνολογιών IoT στην Ελλάδα, είναι η *εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής, αποθήκευσης και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας*.

Η εγκατάσταση θα γίνει μέσω μεταλλικών κατασκευών τύπου carport, οι οποίες θα καλύπτουν θέσεις στάθμευσης και θα φέρουν στην οροφή τους φωτοβολταϊκά πάνελ. Πιο συγκεκριμένα η δομή του στεγαστρου αποτελείται κυρίως βάσεις στήριξης, ηλιακά πάνελ, μετατροπέα, σύστημα αποθήκευσης μπαταριών και ηλεκτρικές συνδέσεις. Οι βάσεις είναι κατασκευασμένες κυρίως από χάλυβα για να παρέχουν στο στέγαστρο επαρκή σταθερότητα. Η λύση αυτή προσφέρει διπλή λειτουργικότητα: αφενός παρέχει σκίαση και προστασία στα σταθμευμένα οχήματα, αφετέρου αξιοποιεί την επιφάνεια για την παραγωγή καθαρής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές. Το έργο εντάσσεται στη στρατηγική του Δήμου για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την προώθηση της βιώσιμης αστικής κινητικότητας.

4.4.1 Φωτοβολταϊκός χώρος στάθμευσης (solar carport)

Ως *solar carport*, ή αλλιώς *φωτοβολταϊκός χώρος στάθμευσης*, ορίζεται μια σύγχρονη κατασκευή η οποία τοποθετείται ως στέγαστρο σε χώρους parking αυτοκινήτων, ενσωματώνοντας φωτοβολταϊκά πάνελ στην οροφή του. Απώτερος σκοπός είναι η καθαρή παραγωγή πράσινης ενέργειας. Τα solar carports αποτελούν μία καινοτόμο λύση που συνδυάζει τεχνολογική ευφυΐα, περιβαλλοντική βιωσιμότητα και πολλαπλή οικονομική ωφέλεια τόσο σε ιδιώτες, όσο σε επιχειρήσεις και δημόσιους φορείς.

Η τεχνολογία που βασίζεται το συγκεκριμένο σύστημα είναι σαφώς η συλλογή ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ, και η μετατροπή της σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα τα ηλιακά πάνελ απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και στην συνέχεια μέσω ενός μετατροπέα (inverter) το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC) μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο (AC). Με αυτό τον τρόπο η παραγόμενη ενέργεια μπορεί είτε να διοχετευτεί στο ηλεκτρικό δίκτυο είτε να αποθηκευτεί σε

μπαταρίες για χρήση από αυτόνομα συστήματα ηλεκτροδότησης. Έτσι σε κάθε περίπτωση ωφελείται ολόκληρο το σύστημα καθώς στην πρώτη περίπτωση μειώνεται η εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο καλύπτοντας μεγάλο μέρος των ενεργειακών αναγκών από την αυτοπαραγωγή ενέργειας, και στην δεύτερη περίπτωση επιτυγχάνεται η πλήρης ενεργειακή αυτονομία σε περιοχές όπου η πρόσβαση στο δίκτυο είναι περιορισμένη και ασταθής.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο επέκτασης της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ένα solar carport, είναι η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων (EV - Electric Vehicles), προωθώντας έτσι την ηλεκτροκίνηση. Κατά αυτόν τον τρόπο οι χώροι στάθμευσης μετατρέπονται σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας με δυνατότητα επέκτασης σε σταθμούς φόρτισης, μειώνοντας σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα και βοηθώντας στην επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας, αφού τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα φορτίζονται απευθείας από την παραγόμενη ηλιακή ενέργεια των φωτοβολταϊκών πάνελ.

4.4.2 Ενσωμάτωση IoT σε δίκτυο solar carport

Όπως είδαμε αναλυτικά και στα προηγούμενα κεφάλαια, τόσο το παράδειγμα της νήσου Bornholm όσο και της Τήλου, αποτέλεσαν σημαντικά έργα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Ωστόσο αυτό που τα έκανε να ξεχωρίσουν και να τεθούν ως παγκόσμια πρότυπα, ήταν ο ευφυής τεχνολογικός συνδυασμός μεταξύ ΑΠΕ και IoT.

Η συμβολή των τεχνολογιών IoT σε ένα τέτοιου είδους σύστημα, μπορεί να βελτιστοποιήσει σημαντικά της λειτουργίες του. Πιο συγκεκριμένα εξαιτίας της ύπαρξης αισθητήρων και smart devices, καθίσταται δυνατή η εποπτεία σε πραγματικό χρόνο της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών και η παραγωγή/κατανάλωση ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια προστιθέμενη αξία σε ολόκληρο το σύστημα επιφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα (Shafiq, M. S., 2020) *Βελτιστοποίηση ενεργειακής αποδοτικότητας*

Οι αισθητήρες IoT που είναι εγκατεστημένοι στο σύστημα επιτρέπουν την αδιάλειπτη εποπτεία της απόδοσης των Φ/Β πάνελ, και έτσι μπορεί να γίνει στοχευμένη ανίχνευση των σφαλμάτων που οφείλονται σε βλάβες ή φθορές του εξοπλισμού. Με γνώμονα την χρήσιμη αυτή πληροφόρηση βοηθά το σύστημα στην άμεση συντήρηση μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την μη διαθεσιμότητα ολόκληρου του συστήματος και στοχεύοντας μόνο εκεί που πραγματικά εντοπίζεται η δυσλειτουργία. Έτσι μειώνονται οι απώλειες παραγωγής και αυξάνεται ο συνολικός χρόνος λειτουργίας του συστήματος.

1. Διαχείριση φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Εξαιτίας της δυνατότητας των αισθητήρων IoT για ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο, μέσω των ενεργοποιητών το δίκτυο δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής της φόρτισης ανάλογα με παράγοντες όπως ηλιοφάνεια, φορτίο δικτύου και - όπου υποστηρίζεται - το προφίλ χρήσης του εκάστοτε οχήματος. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μειωμένη εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο αυξάνοντας έτσι την αυτονομία του συστήματος και επωφελώντας τους χρήστες με μειωμένο κόστος ενέργειας.

2. Διαχείριση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στις μπαταρίες διασφαλίζουν την βέλτιστη λειτουργία και χρήση τους, με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής τους. Το συγκεκριμένο αφορά πολύ σημαντικό πλεονέκτημα καθώς ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι το κύριο στοιχείο του συστήματος και αποτελεί ίσως και το πιο κοστοβόρο. Συγχρόνως, επιτρέπεται η έξυπνη απόφαση πότε η αποθηκευμένη ενέργεια θα χρησιμοποιηθεί για κάλυψη φορτίου ή για τροφοδοσία EV (Fortune Business Insights).

3. Επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας

Η συνεχής παρακολούθηση και ενημέρωση που παρέχει το IoT για κάθε υποσύστημα του δικτύου solar carport, επιτρέπει την αυτονομία καθώς μπορεί να λειτουργεί ως ένα μικροδίκτυο που παράγει, αποθηκεύει και καταναλώνει ενέργεια - ειδικά σε περιπτώσεις διακοπής τροφοδοσίας από το κεντρικό δίκτυο (π.χ. διακοπή ρεύματος)

Ωστόσο, το σύστημα IoT επιτρέπει και την συμμετοχή στο έξυπνο δίκτυο αξιοποιώντας λειτουργίες demand response ή πώλησης πλεονάζουσας ενέργειας (net metering), μετατρέποντάς το έτσι σε μέρος ενός έξυπνου οικοσυστήματος ενέργειας, προάγοντας την αποδοτική κατανομή των περιορισμένων ενεργειακών πόρων.

4. Οικονομική βιωσιμότητα

Το σύστημα IoT επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε θέματα που αφορούν τη μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, μέσω της δυνατότητας που προσφέρει για προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance). Έτσι δεν σπαταλώνονται οικονομικοί πόροι σε πλεονάζουσες συντηρήσεις, αλλά γίνονται στοχευμένες επισκευές εκεί όπου εστιάζεται το πρόβλημα.

5. Προστασία οχημάτων και παραγωγή καθαρής ενέργειας

Πιο συγκεκριμένα, τα δίκτυα solar carport μειώνουν την έκθεση των οχημάτων στην ηλιακή ακτινοβολία και τις καιρικές καταπονήσεις, και παράλληλα μετατρέπουν τις “ζημιογόνες” αυτές καταστάσεις σε επωφελής καθώς συνεισφέρουν σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι το solar carport αφού λειτουργεί ως προστατευτικό στέγαστρο για τα αυτοκίνητα, μειώνει την φθορά τους και κατά τινά τρόπο παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους, το οποίο είναι πολύ σημαντικό να συμπεριληφθεί στα πλεονεκτήματα χρήσης ενός τέτοιου δικτύου, καθώς συμβάλλει σημαντικά στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Για να μπορέσει να καταστεί εφικτή η διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, απαιτείται η χρήση ενός συστήματος διαχείρισης (EMS- Energy Management System) στο οποίο συλλέγονται, επεξεργάζονται και αποθηκεύονται δεδομένα. Εκεί οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και πρόβλεψης υποστηρίζουν την λήψη αποφάσεων και βοηθούν στην βέλτιστη διανομή και χρήση της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες και οι έξυπνοι μετρητές, λαμβάνουν μετρήσεις πραγματικού χρόνου από το πεδίο όπως κατάσταση λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ, παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, κατάσταση του συστήματος αποθήκευσης καθώς και την ένταση της χρήσης των σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Απώτερος σκοπός των παραπάνω είναι η αποστολή και η ανάλυση των δεδομένων στο κεντρικό σύστημα διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας (EMS), όπου μέσω αυτών θα βελτιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση και θα αποδίδονται προβλέψεις της ενεργειακής ζήτησης.

Συνεπώς, η λειτουργία ενός solar carport με ενσωματωμένο σύστημα IoT, συνδυάζει παραγωγή καθαρής ενέργειας, δυνατότητα αποθήκευσης, φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, έξυπνη παρακολούθηση των δεδομένων, και βελτιστοποίηση ενέργειας προσδίδοντας στο σύστημα μεγάλη προστιθέμενη αξία. Κατά αυτόν τον τρόπο το συγκεκριμένο δίκτυο εκτός από τις πρακτικά οφέλη που παρέχει, μετατρέπει την περιοχή σε ένα αυτόνομο και “έξυπνο” σύστημα, το οποίο είναι οικονομικά και ενεργειακά βιώσιμο τόσο για το περιβάλλον όσο και για την τοπική κοινωνία. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT σε ένα δίκτυο solar carport δεν αποσκοπεί στην παραγωγή ενέργειας, αλλά αποτελεί το μέσο για το οποίο θα παρακολουθείται διεξοδικά και θα υποστηρίζει ενεργά τη λήψη αποφάσεων.

4.4.3 Παρουσίαση υπαρκτών παραδειγμάτων στην Ελλάδα

Η εγκατάσταση ενός δικτύου solar carport αποτελεί την πλέον σύγχρονη πρακτική αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε ανεκμετάλλετους ενεργειακά χώρους - όπως οι δημοτικοί υπαίθριοι χώροι στάθμευσης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξασφαλιστεί η παραγωγή πράσινης ενέργειας, συνδυάζοντας προστασία των αυτοκινήτων από καιρικά φαινόμενα και ενίσχυση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα.

Τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας όπως η υψηλή ηλιοφάνεια κατά την πλειοψηφία του χρόνου αλλά και οι όχι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά τους χειμερινούς μήνες, εγείρουν όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον για επενδύσεις σε παραγωγή πράσινης ενέργειας από ηλιακή εκμετάλλευση. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα εγκατάστασης solar carport στην Ελλάδα είναι της εταιρείας Alumil SOLAR σε συνεργασία με την εταιρεία Renel στην Θεσσαλονίκη. Τοποθετήθηκαν στο πεδίο βάσεις στήριξης HELIOS 2700 καλύπτοντας συνολικά 115 θέσεις στάθμευσης εκ των οποίων οι 52 διαθέτουν φορτιστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων (Renel, 2024)



Εικόνα 3 - Προσομοίωση solar carport με σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

<https://jmhpowers.com/ultimate-guide-to-solar-carports/>

Ωστόσο το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα δυσχεραίνει την υλοποίηση τέτοιων έργων, καθώς η ελληνική νομοθεσία δεν έχει ενσωματώσει μέχρι στιγμής σαφείς προβλέψεις για τις εγκαταστάσεις για στέγαστρα σε θέσεις στάθμευσης (Naftemporiki, 2024), ενώ οι δυσκολίες αυτές αναδεικνύουν την ανάγκη για προσαρμογή του ρυθμιστικού πλαισίου, ώστε να διευκολύνεται η υλοποίηση ανάλογων έργων στο μέλλον.

4.5 Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωματωμένο σύστημα IoT στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα υποθετικό σενάριο εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος στέγασης τύπου solar carport, στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας. Το συγκεκριμένο πάρκινγκ διαθέτει 620 θέσεις στάθμευσης οι οποίες εκτείνονται σε 15.200 τ.μ., ενώ το σύνολο του οικοπέδου, σύμφωνα με στοιχεία του εθνικού κτηματολογίου, ανέρχεται στα 18.172,32 τ.μ.



Εικόνα 4 - Περιοχή ελέγχου, Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο

4.5.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των τεχνικών προδιαγραφών του υποθετικού σεναρίου χρήσης αισθητήρων IoT για επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας στην Ελλάδα, οργανώνεται ως εξής:

Αρχικά γίνεται μια καταγραφή των βασικών τεχνικών απαιτήσεων του έργου, όπως αριθμός θέσεων στάθμευσης που θα καλυφθούν, η εκτιμώμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος, οι μετρήσεις που θα προέρχονται από το IoT σύστημα, οι αλγόριθμοι πρόβλεψης παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και οι ανάγκες που σχετίζονται με τη φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Εν συνεχεία, γίνεται παρουσίαση του τεχνικού σχεδιασμού του συστήματος, ενώ υπάρχει επεξήγηση των επιμέρους υποσυστημάτων που αφορούν τις τεχνικές προδιαγραφές που απαιτούνται για μία τέτοιου είδους εγκατάσταση, τι χαρακτηριστικά θα πρέπει να έχουν και πως αυτά “συνεργάζονται” ώστε να ευθυγραμμίζονται με τον τελικό στόχο του έργου. Έπειτα ακολουθεί η εκτίμηση των απαιτούμενων πόρων που αφορούν τον εξοπλισμό, την κατανάλωση ενέργειας, το ανθρώπινο δυναμικό και τις υποδομές που θα χρειαστούν. Τέλος, περιγράφεται ο τρόπος διασύνδεσης και ολοκλήρωσης όλων των επιμέρους στοιχείων, με στόχο τη δημιουργία ενός ενιαίου και αποδοτικού λειτουργικού συστήματος.

Η συγκεκριμένη τεχνική ανάλυση αποτελεί επίσης το υπόβαθρο για την επόμενη ενότητα της μελέτης, που θα εξεταστεί η οικονομική διάσταση του έργου. Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις που παρουσιάστηκαν, θα εκτιμηθούν το επενδυτικό και το λειτουργικό κόστος, ενώ παράλληλα θα αξιολογηθεί η βιωσιμότητα της επένδυσης μέσω δεικτών όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) και ο Χρόνος Απόσβεσης (Payback Period).

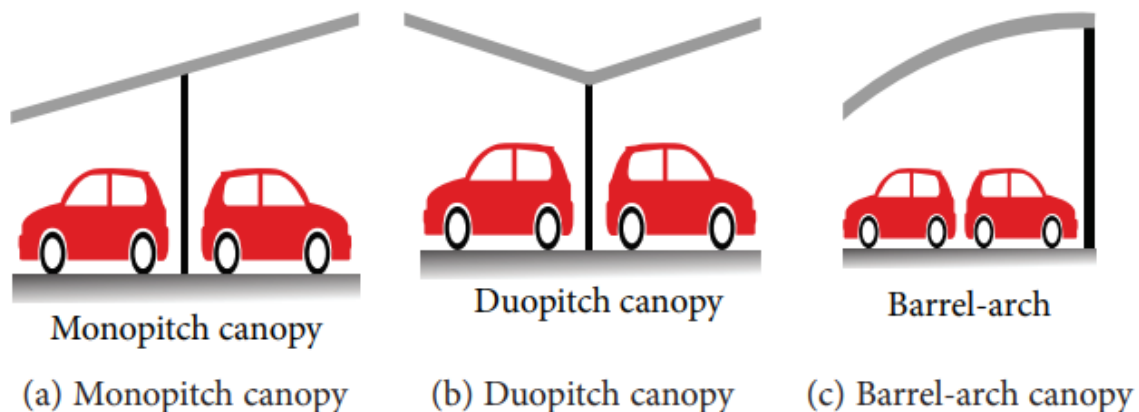
4.6 Ανάλυση των Τεχνικών Απαιτήσεων

4.6.1 Επιλογή βάσης στήριξης φωτοβολταϊκών τύπου carport

Το έργο αφορά την εγκατάσταση solar carport σε 620 θέσεις στάθμευσης στον υπαίθριο χώρο συνολικού ωφέλιμου εμβαδού 15.200 τ.μ. Τα στέγαστρα θα περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 5–7 kWp ανά θέση, ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του σκεπάσματος. Οι πληροφορίες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στεγάστρων, των πάνελ και των υποστηρικτικών συστημάτων ελήφθησαν από την εταιρεία **Alumil Solar**, βάσει των επίσημων datasheets και τεχνικών εγγράφων που παρέχει.

Αναλύοντας την αγορά υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι δομής (μονής ή διπλής σειράς αυτοκινήτων) και τρεις τύποι στεγάστρου:

- a. Monopitch canopy - Μονόκλιτη σειρά στέγης
- b. Duopitch canopy - διπλής σειράς στέγης
- c. Barrel arch - κυρτής σειράς στέγης



Εικόνα 5 - Design and Optimization of Solar Carport Canopies for Maximum Power Generation and Efficiency at Bahawalpur

Μονόκλιτη σειρά στέγης - Monopitch canopy carport

Ο συγκεκριμένος τύπος στεγάστρου, παρέχει μία μόνο κλίση επιφάνειας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, με γωνία κλίσης από 5° έως 10° . Έτσι το ύψος της είναι μεγαλύτερο από τη μία πλευρά και μικρότερο από την άλλη, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερη επιφάνεια κάλυψης σκιάς στα αυτοκίνητα. Ωστόσο, η συγκεκριμένη κατασκευή προσδίδει την μεγαλύτερη ευελιξία επιλογής της βέλτιστης κλίσης για επίτευξη μέγιστης ηλιακής επιφάνειας, καθώς η απλή κατασκευή του επιτρέπει μικρές μεταβολές ανάλογα με τον ηλιακό προσανατολισμό. Σύμφωνα με την μελέτη του πανεπιστημίου Bahawalpur 2014, η επιλογή της γωνίας κλίσης της στέγης επηρεάζει την παραγωγή ηλιακής ενέργειας που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ που βρίσκονται στην οροφή. Συνεπώς η επιλογή μονόκλιτης σειράς στέγης προσφέρει ευελιξία στην γωνία σκίασης, αλλά μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης καθώς απαιτούνται περισσότεροι πυλώνες στήριξης.

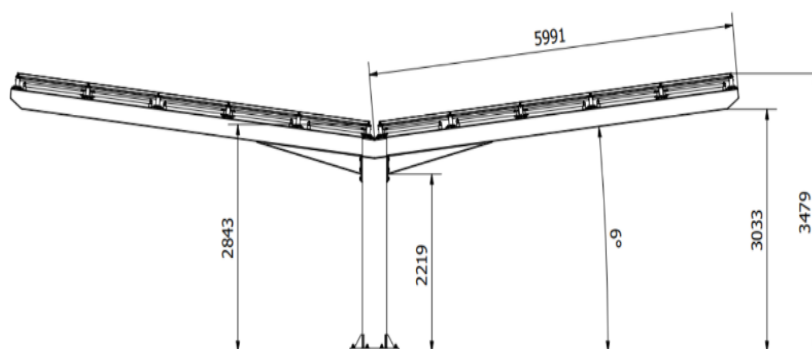
Duopitch canopy - διπλής σειράς στέγης

Η στέγη διπλής όψης, αποτελείται από δύο σειρές στεγών με κατεύθυνση η μια βόρεια και η άλλη νότια, δημιουργώντας μια κοιλάδα που επεκτείνεται και στις δύο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι εγκατεστημένα στη σειρά με νότιο προσανατολισμό έχουν γωνία 180° και η γωνία των μονάδων με βόρειο προσανατολισμό είναι 360° βόρεια. Οι στέγες και των δύο σειρών σε γωνία κλίσης 5° - 10° προκαλούν την ανάκλαση των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνεια της σειράς που βλέπει προς τα βόρεια από τη σειρά που βλέπει προς τα νότια, και παρατηρούνται αλλαγές στο επίπεδο ακτινοβολίας. Έτσι, η παραγωγή ενέργειας σε μια στέγη διπλής όψης με γωνία κλίσης 5° - 6° είναι υψηλότερη, επειδή η ανάκλαση των ηλιακών ακτίνων είναι πολύ μικρή μεταξύ των δύο σειρών, καθώς δεν είναι στραμμένες περισσότερο η μία προς την άλλη. Επιπλέον, η διπλή σειρά στέγη, μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη σκίαση στα αυτοκίνητα αλλά απαιτεί προσεκτική μελέτη καθώς είναι πολύπλοκη κατασκευή.

Barrel arch - κυρτής σειράς στέγης

Το στέγαστρο τύπου “βαρελιού” έχει καμπύλο σχήμα με διαφορετικές γωνίες κλίσης σε κάθε σημείο. Σε αυτό το στέγαστρο, η πρώτη σειρά φωτοβολταϊκών μονάδων γωνία 360° βόρεια σε γωνία κλίσης 10° , η μεσαία σειρά έχει γωνία κλίσης 0° και η τελευταία σειρά έχει γωνία 180° νότια σε γωνία κλίσης 10° . Η ανάλυση του πανεπιστημίου Bahawalpur 2014 έδειξε ότι η ετήσια παραγωγή ηλιακών φωτοβολταϊκών είναι χαμηλότερη από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

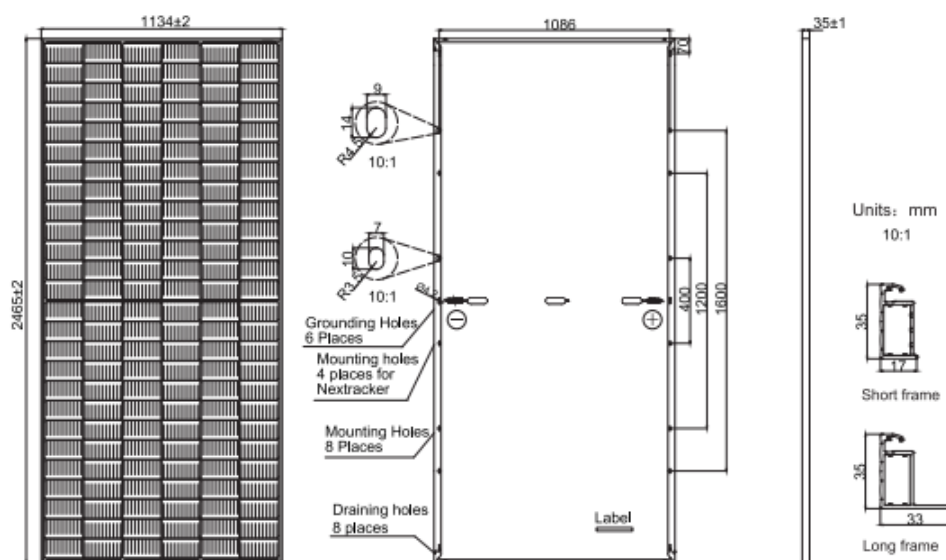
Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η χρήση του τύπου **H2700 MAX Duopitch**. Πρόκειται για μια ενισχυμένη κατασκευή της εταιρείας Alumil SOLAR, η οποία είναι ειδικά κατασκευασμένη και μεγάλης κλίμακας, ώστε να μπορεί να εξυπηρετεί τις ανάγκες του παρόντους έργου. Η μεταλλική κατασκευή του H2700 MAX Duopitch βασίζεται σε δοκούς και υποστυλώματα από ανθρακούχο χάλυβα με προστατευτική βαφή κατηγορίας C4, ενώ τα δευτερεύοντα στοιχεία στήριξης είναι από ανοδιωμένο αλουμίνιο κράματος 6005, το οποίο εξασφαλίζει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και μακροχρόνια αξιοπιστία. Η γεωμετρία της κατασκευής προβλέπει μέγιστο ύψος 2,80 μέτρα και ελάχιστο ύψος 2,15 μέτρα, με απόσταση μεταξύ των υποστυλωμάτων πέντε μέτρων, διασφαλίζοντας έτσι ευκολία στη στάθμευση και την κυκλοφορία των οχημάτων. Η κλίση της στέγης είναι έξι μοιρών, επιλογή που επιτρέπει ικανοποιητική απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στην απορροή υδάτων και στην προστασία από συσσώρευση χιονιού. Η αντοχή της κατασκευής σε φορτία είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς το σύστημα έχει σχεδιαστεί να αντέχει ταχύτητες ανέμου έως 120 km/h και χιονοπτώσεις έως 150 kg ανά τετραγωνικό μέτρο, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο ακόμη και για περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες. Η πιστοποίηση της κατασκευής βάσει των ευρωπαϊκών κανονισμών Eurocode 3 και 9, σε συνδυασμό με αναλύσεις CFD για την αεροδυναμική συμπεριφορά, παρέχουν επιπρόσθετη τεχνική αξιοπιστία.



Εικόνα 6 - Βάση στήριξης H2700 MAX DUOPITCH, Πηγή Alumil SOLAR

4.6.2 Επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ

Ύστερα από την επιλογή βάσης στήριξης, θα πρέπει να επιλεγεί και η κατάλληλη υποδομή Φ/Β πάνελ. Για τις ανάγκες του έργου, ύστερα από μελέτη αγοράς επιλέχθηκε το **JA Solar**, το οποίο διαθέτει ονομαστική ισχύ 550 Wp, τεχνολογίας Mono PERC half-cell, με διαστάσεις $2.278 \times 1.134 \times 30$ mm. Η επιλογή του συγκεκριμένου πάνελ έγινε με γνώμονα της συμβατότητάς του με τις γεωμετρικές απαιτήσεις της κατασκευής H2700 MAX Duorpitch, όσο και της διεθνούς αξιοπιστίας της εταιρείας που τα προσφέρει. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των JA Solar, είναι η ισχύς των 550Wp ανά πλαίσιο. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του carport, το οποίο υποστηρίζει πέντε πάνελ σε κάθε πλευρά πενταπλασιάζει την διαθέσιμη ισχύ του συστήματος.



Εικόνα 7 - JA SOLAR panel

4.6.3 Επιλογή μετατροπών (inverters)

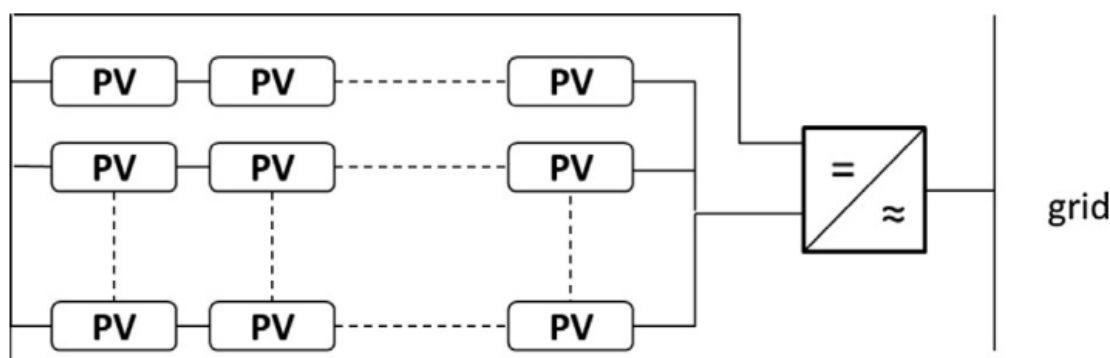
Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system M. Díez-Mediavilla, M.I. Dieste-Velasco, M.C. Rodríguez-Amigo, T. García-Calderón, C. Alonso-Tristán†

Για να μπορέσει να ολοκληρωθεί ένα σύστημα solar carport είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μετατροπών (inverters), οι οποίοι θα μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα DC σε εναλλασσόμενο AC. Οι κυρίαρχοι τρόποι με τους οποίους συνδέονται οι μετατροπείς είναι:

- κεντρικοί μετατροπείς (central inverters)
- μεμονωμένοι μετατροπείς (string inverters)

Κεντρικοί μετατροπείς (central inverters)

Η αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί κεντρικούς μετατροπείς, βασίζεται στην φιλοσοφία ότι τα Φ/Β πάνελ συνδέονται σε ομάδες, οι οποίες καταλήγουν σε έναν μεγάλο κεντρικό μετατροπέα. Η συγκεκριμένη μέθοδος ακολουθείται κυρίως σε μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, καθώς είναι χαμηλή σε κόστος ανά εγκατεστημένο kW, ενώ προσφέρει απλή σχεδίαση.



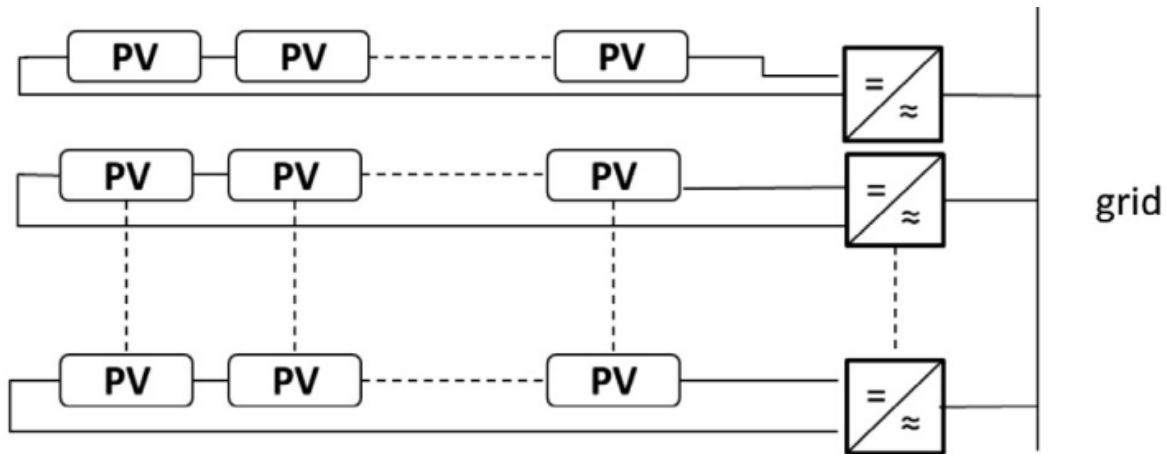
Διάγραμμα 1 - Díez-Mediavilla et al. (2014). Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system.

Στα θετικά στοιχεία ενός συστήματος με χρήση κεντρικού μετατροπέα είναι το χαμηλό αρχικό κόστος, καθώς απαιτείται ένας κεντρικός μετατροπέας μεγάλης ισχύος για εξυπηρέτηση ολόκληρου του δικτύου, απλότητα εγκατάστασης με λιγότερα περιφερειακά εξαρτήματα και υψηλή απόδοση μετατροπής (συνήθως 98% - 98,5%) - εφόσον διασφαλίζεται η πλήρης αποδοτικότητα των Φ/Β. Στον αντίποδα, ένα κεντρικό σύστημα μετατροπής είναι αρκετά ευαίσθητο σε βλάβες καθώς θα πρέπει να τεθεί ολόκληρη η εγκατάσταση εκτός λειτουργίας σε περίπτωση δυσλειτουργίας. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα του κεντρικού συστήματος είναι η ανομοιογένεια της λειτουργίας των πάνελ. Επειδή κάνουμε λόγο για μεγάλη κεντρική εγκατάσταση, υπάρχει πολύ υψηλή πιθανότητα μειωμένης απόδοσης σε περίπτωση όπου τα Φ/Β δεν λειτουργούν το ίδιο αποδοτικά όλα, ενώ οι τεράστιες καλωδιώσεις που το διέπουν, αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα απώλειας πρωτογενούς ρεύματος. Τέλος, σε περίπτωση επέκτασης υπάρχουν σημαντικά εμπόδια τα οποία απαιτούν ξανά επανασχεδίαση του συστήματος.

String inverters

Η αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί σύστημα με string inverters, διέπεται από ομάδες ξεχωριστών αυτόνομων πάνελ, όπου η κάθε ομάδα καταλήγει σε δικό της μετατροπέα. Κατά αυτόν τον τρόπο υπάρχουν πολλαπλοί μετατροπείς κατανεμημένοι σε ολόκληρη την εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης, καθώς χαρακτηρίζεται καλύτερη σε ανομοιογενείς συνθήκες (π.χ. μερική σκίαση) εξαιτίας των πολλών ξεχωριστών σημείων ανίχνευσης MPPT - Maximum Power Point Tracking που διαθέτει ο κάθε μετατροπέας. Επιπλέον σε περίπτωση βλάβης κάποιου από τα strings, δεν επηρεάζεται η λειτουργία των υπολοίπων. Επίσης οι μεμονωμένοι

μετατροπείς μειώνουν τις απώλειες του πρωτογενούς ρεύματος DC, καθώς οι καλωδιώσεις είναι σημαντικά μικρότερες από το κεντρικό σύστημα μετατροπών, προσφέροντας έτσι μεγάλη ευελιξία στον σχεδιασμό και ευνοϊκότερες συνθήκες συντήρησης. Στα μειονεκτήματα του συστήματος string inverters συγκαταλέγεται μεταξύ άλλων το υψηλό αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης, η αυξημένη πιθανότητα αστοχίας εξαιτίας της χρήσης πολλαπλών μηχανημάτων και η απαιτητική συντήρηση των



Διάγραμμα 2 - Díez-Mediavilla et al. (2014). Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system.

Για τις ανάγκες του έργου που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, και αναλογιζόμενοι όλες τις παραπάνω παραμέτρους, ως καταλληλότερη αρχιτεκτονική μέθοδος μετατροπής ρεύματος από DC σε AC, είναι η αρχιτεκτονική με string inverters. Παρόλο που υπάρχει υψηλότερο κόστος, τα οφέλη που προσφέρει εξυπηρετούν καλύτερα τις ανάγκες του έργου, όπως για παράδειγμα οι δυνατότητες επέκτασης, και οι μειωμένες πιθανότητες απώλειας πρωτογενούς ρεύματος εξαιτίας των μικρότερων καλωδιώσεων. Σε περίπτωση βλάβης η απώλεια είναι μικρή καθώς δεν βγαίνει εκτός λειτουργίας ολόκληρο το σύστημα, και δίνεται η δυνατότητα βέλτιστης προσαρμογής MPPT, καθώς κάθε μετατροπέας διαθέτει ξεχωριστό αλγόριθμο ανίχνευσης του βέλτιστου σημείου. (Alahakoon & Yu, 2016)

Κριτήριο	Central Inverter	String Inverter
Μέγιστη ισχύς	Μία καμπύλη MPPT για ολόκληρη την εγκατάσταση	Κάθε string διαθέσει ξεχωριστό σημείο MPPT
Αξιοπιστία	Σε περίπτωση βλάβης ολόκληρη η εγκατάσταση τίθεται εκτός λειτουργίας	Σε περίπτωση βλάβης επηρεάζεται μόνο η σειρά που έχει υποστεί την βλάβη

Απώλειες καλωδίωσης	Μεγαλύτερες αποστάσεις καλωδίωσης DC - > αυξημένη τάση απωλειών	Μικρότερες αποστάσεις καλωδιώσεων -> μικρές απώλειες
------------------------	--	---

Κλίμακα εφαρμογής

Μεγάλες εγκαταστάσεις

Μεσαίες και μικρές εγκαταστάσεις

Πίνακας 1 - Λειτουργικές διαφορές συστημάτων μετατροπών, ιδία επεξεργασία

Έτσι ο μετατροπέας που θα χρησιμοποιηθεί για αρχιτεκτονική με string inverters - modular approach είναι ο **Huawei SUN2000**. Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος μετατροπέα είναι η διαθεσιμότητά του στην Ελλάδα με υψηλού επιπέδου τεχνική υποστήριξη, η μεγάλη εμβέλεια σε string inverters και οι υψηλοί δείκτες απόδοσης 98.6% - 99%. Τέλος, υποστηρίζει λειτουργίες πολλαπλών MPPT, και διασύνδεση με συστήματα SCADA, ενώ ακολουθεί πρωτόκολλα IP65/66 προστασία για υπαίθρια τοποθέτηση κάτω από στέγαστρα.



Εικόνα 8 - Μετατροπέας Huawei SUN2000

4.6.4 Επιλογή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Το δίκτυο solar carport με ενσωματωμένο σύστημα IoT, συνιστά μια καινοτόμο προσέγγιση η οποία συμβάλλει με ουσιαστικό τρόπο στην ενεργειακή μετάβαση ενισχύοντας την βιώσιμη ανάπτυξη. Στο πλαίσιο επιδίωξης της ενεργειακής αυτονομίας της υπό εξέταση περιοχής του υποθετικού σεναρίου εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ στον υπαίθριου χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας, καθίσταται απαραίτητη η διερεύνηση και η ανάλυση των εναλλακτικών λύσεων που αφορούν τα συστήματα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας.

Καταρχήν θα πρέπει να υπογραμμιστεί το γεγονός, πως η πράσινη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα. Αυτό συμβαίνει διότι εμφανίζονται διακυμάνσεις που οφείλονται τόσο σε ημερήσιους, όσο και σε εποχικούς κύκλους. Πιο συγκεκριμένα,

κατά τους θερινούς μήνες η ηλιοφάνεια είναι σημαντικά περισσότερη σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που οδηγεί σε αυξομειώσεις παραγόμενης ενέργειας ανάλογα με την εκάστοτε περιοχή. Σε ημερήσιο επίπεδο παρατηρείται πως η μέγιστη ηλιοφάνεια δεν ακολουθείται σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τις ώρες αιχμής να μην υπάρχει η απαραίτητη ποσότητα να καλύψει όλες τις ενεργειακές ανάγκες. Έτσι, δημιουργείται η επιτακτική ανάγκη ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο θα μπορεί να καλύπτει τις παραπάνω ανάγκες ακόμη και σε ώρες τις οποίες η παραγωγή ενέργειας είναι μηδενική. (Biswas, Bhuyan, & Hasan, 2023)

Η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας είναι η ηλεκτροχημική αποθήκευση σε μπαταρίες. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι τεχνικές απαιτήσεις που θα πρέπει να έχει ένα σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες ώστε να μπορέσει να υποστηρίξει ένα έργο σαν το εξεταζόμενο, μεταξύ άλλων αποτελούν:

- ❖ **Υψηλός κύκλος ζωής:** Ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετεί πολλούς κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης με όσο το δυνατόν μικρότερη μείωση της χωρητικότητά του
- ❖ **Υψηλή αποδοτικότητα:** Αφορά την δυνατότητα παροχής σταθερής και αξιόπιστης απόδοσης ανεξάρτητα από την κατάσταση φόρτισης (SOC - State of Charge) της μπαταρίας, διατηρώντας υψηλά επίπεδα σε όρους χωρητικότητας ενέργειας Wh (Watt-hours) και σε όρους χωρητικότητα φόρτισης Ah (Ampere-hours)
- ❖ **Χαμηλή αυτοεκφόρτιση:** Η εποχική μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτεί την εξασφάλιση όσο το δυνατόν μικρότερης απώλειας κατά την αδράνεια, δηλαδή να υποστηρίζονται βαθύτερες εκφορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες, αποδίδοντας ακόμα και σε DoD (Depth of Discharge) 70–90%
- ❖ **Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης**
- ❖ **Υψηλή θερμική ανθεκτικότητα σε μεταβολές**

Σύμφωνα με τον πίνακα 2, οι διαθέσιμες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης είναι οι εξής:

Τεχνολογία	Χαρακτηριστικά	Κύκλος ζωής	Συντήρηση	Καταλληλότητα
Μολύβδου-οξέος (Lead-Acid, GEL, AGM)	Παραδοσιακή, χαμηλό κόστος	2-7 έτη	Μέτρια προς χαμηλή	Κατάλληλες για μεσαίες κλίμακας έργα, περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα
Νικελίου-Καδμίου (NiCd)	Υψηλή ανθεκτικότητα, λειτουργία σε ευρύ θερμοκρασιακό εύρος	10-15 έτη	Χαμηλή	Υψηλό κόστος, περιβαλλοντικά ζητήματα (τοξικότητα καδμίου)
Λιθίου (LiFePO₄, Li-ion)	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα με απόδοση >90%	> 4000 κύκλοι φόρτισης	Ελάχιστη	Βέλτιστη επιλογή για μεγάλης κλίμακας έργα (π.χ. airports), υψηλότερο αρχικό κόστος αλλά χαμηλό λειτουργικό

Πίνακας 2 - Τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης, ιδία επεξεργασία

Για τις ανάγκες που θέλουμε να καλυφθούν στα πλαίσια του παρόντος έργου, ως βέλτιστη επιλογή είναι οι **μπαταρίες λιθίου**. Παρά το γεγονός ότι οι μπαταρίες μολύβδου χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε μικρομεσαίες εφαρμογές εξαιτίας του χαμηλού κόστους, οι μπαταρίες λιθίου προσφέρουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ κόστους κύκλου ζωής, αξιοπιστίας και ενεργειακής πυκνότητας. Συγκεκριμένα για το έργο που εξετάζουμε οι LiFePO₄ υπερτερούν έναντι των υπολοίπων,

καθώς η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ενεργειακή αυτονομία, μειώνει το λειτουργικό κόστος και αναβαθμίζει σημαντικά την βιωσιμότητα της επένδυσης.

Το κύριο χαρακτηριστικό των μπαταριών Li-ion (ιδίως LiFePO₄) είναι ο μεγάλος κύκλος ζωής τους (4.000 - 6.000 κύκλους) συγκριτικά με τις παραδοσιακές μπαταρίες μολύβου οι οποίες έχουν σημαντικά χαμηλότερους κύκλους (500-1.000). Επιπλέον, σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, που οδηγεί σε εξοικονόμηση χώρου, αφού μιλάμε για ένα έργο που απαιτεί πολλές μπαταρίες ώστε να εξυπηρετηθούν οι ενεργειακές ανάγκες, και η υποστήριξη σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων όπως θα δούμε στην συνέχεια.



Εικόνα 9 - Μπαταρία Huawei LUNA2000-200KWH-2H1



Εικόνα 10 - Μπαταρία Tesla Megapack 2 XL

4.6.5 Επιλογή τύπου φόρτισης σταθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Η καινοτομία του συγκεκριμένου συστήματος είναι η δυνατότητά του για αυτοπαραγωγή και ιδιοκατανάλωση. Εκτός από την παραγωγή πράσινης ενέργειας, είναι σημαντική η διοχετευση της σε πηγές όπου εξασφαλίζουν την βιώσιμη ανάπτυξη. Για τις ανάγκες του παρόντος έργου, επιλέχθηκε η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ώστε να προαχθεί και η φιλοσοφία της

ηλεκτροκίνησης, αλλά και να φανεί η προστιθέμενη αξία που προσφέρει το δίκτυο IoT στη συνολική χρηστική αξία της ανάλυσης.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση υπάρχουν 3 διαφορετικοί τύποι φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

- a. Φόρτιση επιπέδου 1
- b. Φόρτιση επιπέδου 2
- c. Φόρτιση επιπέδου 3

Φόρτιση επιπέδου 1

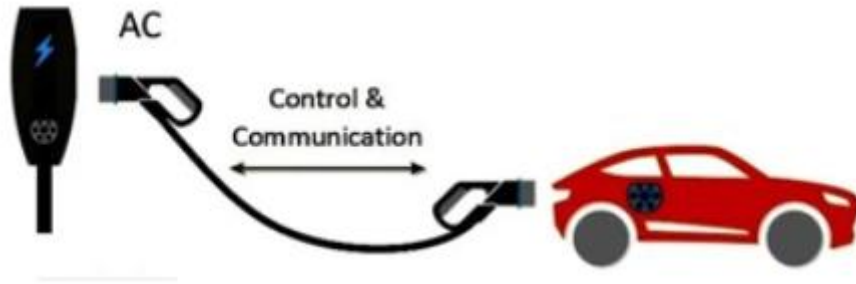
Το συγκεκριμένο είδος φόρτισης αποτελεί την πιο βασική μορφή, και ολοκληρώνεται χωρίς απαιτητικός εξοπλισμό, μέσω μιας τυπικής οικιακής πρίζας. Παρέχει 120V εναλλασσόμενου ρεύματος, γεγονός που την καθιστά αργή σε φόρτιση καθώς αποδίδει 12-16 Ampere - για μία πλήρη φόρτιση απαιτούνται έως και 20 ώρες. Η φόρτιση επιπέδου 1 συνιστά μια πολύ καλή και οικονομική επιλογή για οικιακή χρήση, όπου ο χρήστης επιθυμεί να φορτίζει το όχημά του κατά τη διάρκεια τη νύχτας όπου δεν χρησιμοποιείται.



Εικόνα 11 - Μαχαίρας, Ε. Χ. (2025). Προσομοίωση της διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Master's thesis).

Φόρτιση επιπέδου 2 - slow/normal charging

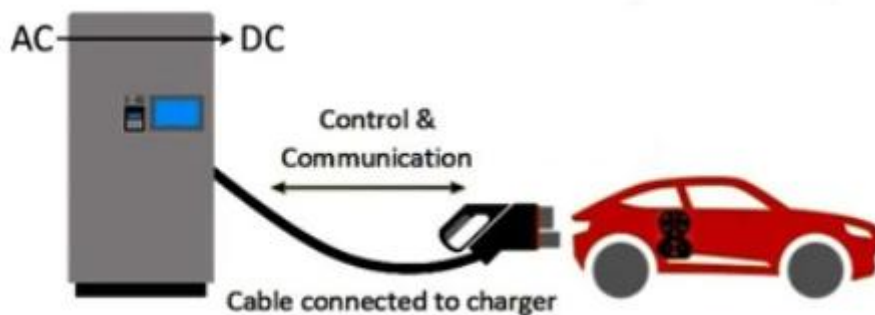
Η φόρτιση επιπέδου 2 απαιτεί χρήση αποκλειστικού σταθμού φόρτισης με εξειδικευμένο εξοπλισμό. Είναι σαφώς ταχύτερη από την φόρτιση επιπέδου 1 και αποδίδει 20-80 Ampere, όπου για μία πλήρη φόρτιση απαιτούνται 4-8 ώρες (ανάλογα και την μπαταρία του εκάστοτε αυτοκινήτου). Έχει ισχύ 240V εναλλασσόμενου ρεύματος, και συνήθως χρησιμοποιείται σε χώρους όπου τα οχήματα παραμένουν σταθμευμένα 2-8 ώρες (π.χ. πάρκινγκ & εμπορικά κέντρα). Η συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί μια αποδοτική λύση αφού υπάρχει καλή αναλογία κόστους/ωφέλειας σε έργα με μεγάλο αριθμό θέσεων.



Εικόνα 12 - Μαχαίρας, Ε. Χ. (2025). Προσομοίωση της διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Master's thesis).

Φόρτιση επιπέδου 3 - fast charging

Πρόκειται για την ταχύτερη μέθοδο έναντι των υπολοίπων, χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα και απαιτεί πολύ εξειδικευμένο εξοπλισμό και άριστη σχεδιασμό υποδομής. Η ισχύς του είναι 400-900V και αποδίδει 350-400 Ampere - γεγονός που την καθιστά ιδανική λύση για περιπτώσεις με γρήγορες στάσεις. Μία πλήρης φόρτιση διαρκεί 20-40 λεπτά της ώρας, γι' αυτό και αποτελεί την επιλογή με το υψηλότερο κόστος.



Εικόνα 13 - Μαχαίρας, Ε. Χ. (2025). Προσομοίωση της διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Master's thesis).

Ύστερα από την ανάλυση των απαιτήσεων του έργου που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, ως ιδανική λύση προτείνεται η εγκατάσταση **σταθμών φόρτισης επιπέδου 2 AC**. Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος είναι το σχετικά χαμηλό κόστος του, και οι ιδιαιτερότητες του χώρου - πρόκειται για ενδιάμεσο χώρο στάθμευσης σε στάση του μετρό, όπου η πληθώρα των αυτοκινήτων βρίσκεται εκεί για περισσότερες από 6 έως 9 ώρες την ημέρα. Έτσι ενώ θα ήταν αρκετά καλή επιλογή η φόρτιση επιπέδου 3, η οποία υποστηρίζει γρήγορη φόρτιση, θα ανέβαζε σημαντικά το κόστος ενώ παράλληλα δεν θα εξυπηρετούσε τον σκοπό ύπαρξης των σταθμών φόρτισης, αφού μετά το πέρας την πλήρους φόρτισης ο σταθμός θα παραμένει αναξιοποίητος σε περίπτωση που ο οδηγός είχε σταθμεύσει το όχημά του και κυκλοφορούσε στην υπόλοιπη πόλη με το μετρό όπως και συνηθίζεται. Πιο αναλυτικά σχετικά με το κόστος, ο φορτιστής που επιλέχθηκε τύπου 2 είναι ο **ABB Terra 22 kW** (1.444 ευρώ/ τμχ) ενώ ο αντίστοιχος φορτιστής επιπέδου 3 είναι ο **ABB Terra 50kW** (16.889 ευρώ/τμχ). Όπως παρατηρούμε η διαφορά στο αρχικό κόστος είναι τεράστια, οπότε αυτός είναι και ο λόγος που θα προτιμάται η φόρτιση επιπέδου 2 εναλλασσόμενου ρεύματος AC.



Εικόνα 14 - Τύποι σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

4.7.6 Επιλογή αισθητήρων IoT

Ένα σύγχρονο δίκτυο solar carport, απαιτεί την ενσωμάτωση IoT για έξυπνη διαχείριση και βελτιστοποίηση της ενεργειακής του λειτουργίας. Οι εγκατεστημένοι αισθητήρες, οι μετρητές και όλες οι συνδεδεμένες συσκευές επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο τόσο της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β συστήματα, αλλά και της κατανάλωσης από τους φορτιστές των ηλεκτρικών οχημάτων, της κατάστασης των μπαταριών κ.α. Τα δεδομένα που συλλέγονται και αναλύονται υποστηρίζουν την λήψη αποφάσεων, την ενεργειακή και οικονομική εξοικονόμηση καθιστώντας το solar carport όχι απλώς μια πηγή καθαρής ενέργειας, αλλά έναν κόμβο έξυπνης υποδομής. Έτσι το IoT σύστημα θα περιλαμβάνει:

- ❖ **Occupancy Sensors:** υπέρυθρος τοπικός αισθητήρας θέσης, ενημερώνει τους τελικούς χρήστες σχετικά με την διαθεσιμότητα των θέσεων στάθμευσης μέσω UI/APP. Προτεινόμενος αισθητήρας: *Milesight WS202 (LoRa IoT Sensor)* καθώς αποτελεί την ιδανική λύση για απομακρυσμένη παρακολούθηση, και υποστηρίζει σύνδεση με cloud πλατφόρμες.



Εικόνα 15 - Αισθητήρας ανίχνευσης θέσης Milesight WS202 (LoRa IoT Sensor)

- ❖ **Revenue grade energy meters:** Πρόκειται για μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής ακρίβειας, ο οποίος υποστηρίζει και τιμολόγηση κατανάλωσης. Χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκά συστήματα και φορτιστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων για αξιόπιστη καταγραφή κατανάλωσης ή παραγωγής. Δίνει τη δυνατότητα καταγραφής ανά σημείο φόρτισης έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν εύκολα φορτιστές με υψηλή ή χαμηλή χρήση με σκοπό να ανακατανεμηθούν οι πόροι. Επιπλέον προσφέρει δυνατότητες προγνωστικής συντήρησης και διαθέτει δεδομένα ανάλυσης απόδοσης carport για πλήρη αξιολόγηση της ενεργειακής αυτάρκειας καθώς βελτιστοποιεί το σύστημα αποθήκευσης επισημαίνοντας τις ώρες υψηλής ή χαμηλής ενεργειακής ζήτησης. Προτεινόμενος μετρητής: **Eastron SDM230-LoRa** πολυλειτουργικός μετρητής ενέργειας με ενσωματωμένη υποστήριξη LoRaWAN, ιδανικός για εφαρμογές IoT όπως solar carports, φορτιστές EV και βιομηχανικές εγκαταστάσεις



Εικόνα 16 - Αισθητήρας μέτρησης φόρτισης - Eastron SDM230-LoRa

- ❖ **String/module sensors:** Πρόκειται για αισθητήρες οι οποίοι παρακολουθούν απόδοση ανά σειρά Φ/Β ή ανά πάνελ και μετρούν τάση (V) και ρεύμα (I) για κάθε ένα από τα παραπάνω, και ταυτόχρονα υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο την ισχύ. Η κρισιμότητα εγκατάστασής του έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί και ανιχνεύει τα σφάλματα και την μειωμένη απόδοση των

πάνελ ,καθώς υπολογίζει την απόκλιση από την αναμενόμενη απόδοση. Επιπλέον διαθέτει αισθητήρες μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας (πυρανόμετρα). Τέλος βελτιστοποιεί το σύστημα συντήρησης καθώς αποδίδει πραγματικά την αίτια υπολειτουργίας του συστήματος εστιάζοντας στο πρόβλημα αποφεύγοντας τις προληπτικές συντηρήσεις που δεν βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα. Προτεινόμενος αισθητήρας: SDM630MCT-LoRaWAN-MID



Εικόνα 17 - Αισθητήρας string/module SDM630MCT-LoRaWAN-MID

- ❖ **Inverter/battery sensor:** Πρόκειται για αισθητήρες που παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την απόδοση των μετατροπέων και την κατάσταση των μπαταριών. Επιπλέον μετρούν την τάση, το ρεύμα, την θερμοκρασία, την κατάσταση φόρτισης (SOC), τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης καθώς την παραγωγή και κατανάλωση της ενέργειας. Επιπλέον ενισχύουν την ασφάλεια του συστήματος καθώς ανιχνεύουν την υπερθέρμανση και την υπερφόρτιση (εάν υπάρξει), και έχουν την δυνατότητα να ενεργοποιούν/απενεργοποιούν φορτία με βάση την τρέχουσα κατάσταση της μπαταρίας. Προτεινόμενος αισθητήρας: **NKE Watteco Battery Charge/Usage Sensor** μιας και επιτρέπει την αποστολή των δεδομένων του σε δίκτυο LoRaWan και έχει σχετικά χαμηλό κόστος έναντι των υπολοίπων της αγοράς.



Εικόνα 18 - Αισθητήρας κατάστασης μπαταρίας/μετατροπέα NKE Watteco Battery Charge/Usage Sensor

- ❖ **Μετεωρολογικός σταθμός:** Η εγκατάσταση μετεωρολογικού σταθμού σε φωτοβολταϊκή στέγη στάθμευσης (solar carport), σε συνδυασμό με τεχνολογίες Internet of Things (IoT), προσφέρει ένα πλήρως ψηφιοποιημένο και αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης και βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης. Ακριβής συσχέτιση παραγωγής με περιβαλλοντικές συνθήκες

Μετρήσεις όπως η ηλιακή ακτινοβολία (irradiance), θερμοκρασία περιβάλλοντος και πάνελ, σχετική υγρασία και ταχύτητα/διεύθυνση ανέμου επιτρέπουν τη συνεχή αξιολόγηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος μέσω δεικτών όπως το Performance Ratio (PR) και η Specific Yield (kWh/kWp).

Προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance)

Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών ή πτώσης στην απόδοση (π.χ. λόγω υπερθέρμανσης, σκίασης, ρύπανσης ή βλάβης), μειώνοντας έτσι το κόστος συντήρησης και αποτρέποντας εκτεταμένες βλάβες. Βελτιστοποίηση ενεργειακής διαχείρισης (Smart Energy Management) Η ενσωμάτωση μετεωρολογικών δεδομένων στις αλγοριθμικές στρατηγικές διαχείρισης φορτίων (όπως EV charging ή ενεργειακή αποθήκευση) επιτρέπει δυναμική προσαρμογή με βάση τις καιρικές συνθήκες, αυξάνοντας την αυτοκατανάλωση και μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο. Προτεινόμενος αισθητήρας: Eleven Parameter Weather Station for LoRaWAN



Εικόνα 19 - Μετεωρολογικός σταθμός Eleven Parameter Weather Station for LoRaWAN

4.6.7 Επιλογή υποδομής δικτύου

Το συγκεκριμένο έργο έχει μερικές ιδιαιτερότητες, καθώς αποτελείται από πολλές διαφορετικές συσκευές, οι οποίες θα πρέπει η κάθε μια ξεχωριστά να λαμβάνει τα δεδομένα από το πεδίο και να τα αποστέλλει σε ένα κεντρικό σύστημα. Για τον λόγο αυτό έγινε η επιλογή του πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται πολλά χρόνια και αποτελεί μια ασφαλή και οικονομική λύση η οποία εξυπηρετεί τους σκοπούς ενός έργου που συνδυάζει σύστημα αποθήκευσης, IoT και φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι δυνατότητες που παρέχει είναι η αξιόπιστη επικοινωνία σε αποστάσεις ακτίνας 15 χιλιομέτρων (σε ανοιχτό πεδίο) ή 3 χιλιομέτρων σε αστικό-ημιαστικό πεδίο.

Στην ουσία πρόκειται για μία κεντρική πύλη (gateway), η οποία επικοινωνεί με τους εγκατεστημένους αισθητήρες μέσω του φάσματος συχνοτήτων ISM (συνήθως 868 MHz στην Ευρώπη), και εν συνεχεία αποστέλλει τα δεδομένα σε διακομιστές cloud μέσω Ethernet ή σύνδεσης 4G. Με αυτόν τον τρόπο το κόστος παραμένει χαμηλό, αφού η συγκεκριμένη τεχνολογία καλύπτει με μια μόνο πύλη την επικοινωνία όλων των αισθητήρων που θα εγκατασταθούν στο σύστημα, καθιστώντας την την ιδανική επιλογή.

Προτεινόμενο σύστημα: **LoRaWAN gateway**



Εικόνα 20 - LoRaWAN gateway

Επιλογή συστήματος διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System - EMS)

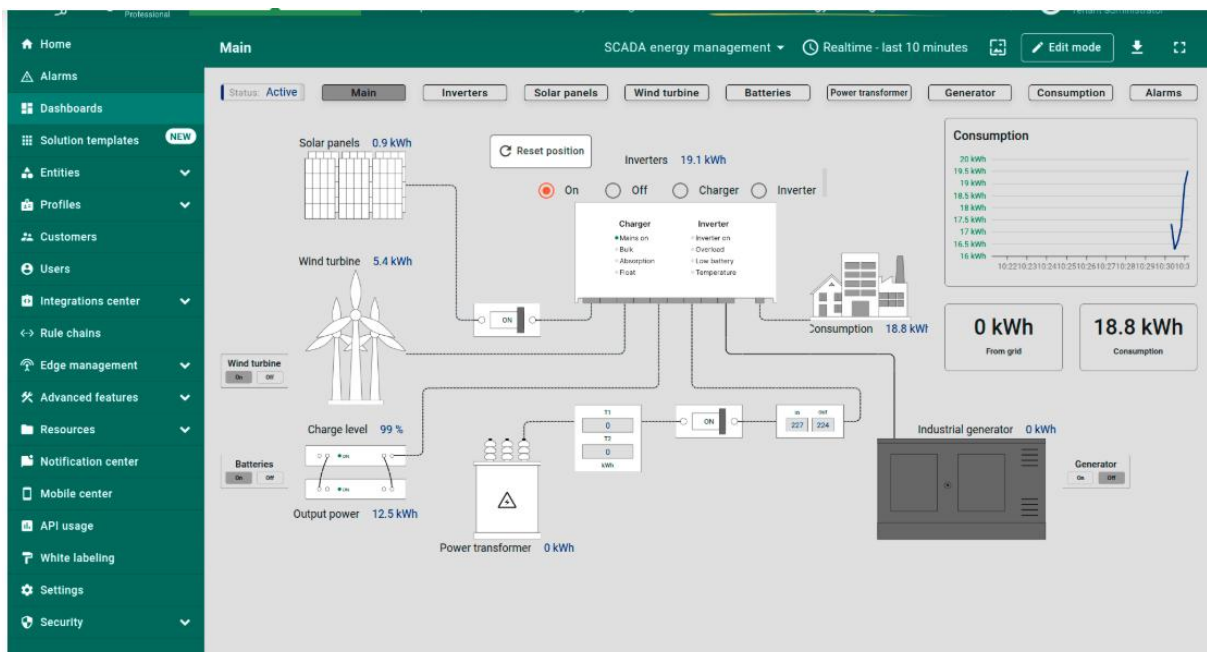
Το έργο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, αποτελεί μια τεχνική και οικονομική πρόκληση, καθώς απαιτεί την διασύνδεση πολλών διαφορετικών υποσυστημάτων. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ για τη δημιουργία solar carport με ενσωματωμένους αισθητήρες IoT, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων απαιτεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας ώστε να διασφαλιστεί η εύρυθμη λειτουργία του. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται η επένδυση σε ένα αξιόπιστο και διαλειτουργικό σύστημα EMS, το οποίο θα υποστηρίζει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες που χρειάζεται το εξεταζόμενο σύστημα.

Με τον όρο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης (EMS), εννοούμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο θα παρακολουθεί δεδομένα παραγωγής, κατανάλωσης και αποθήκευσης ενέργειας, που προέρχονται από εγκαταστάσεις με φωτοβολταϊκά πάνελ. Η σημαντικότητά του άγεται στο γεγονός των δυνατοτήτων που προσφέρει για βέλτιστη χρήση της διαθέσιμης ενέργειας, της μείωσης του κόστους λειτουργίας του έργου και φυσικά η ορθή διαχείριση των φορτίων για μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης.

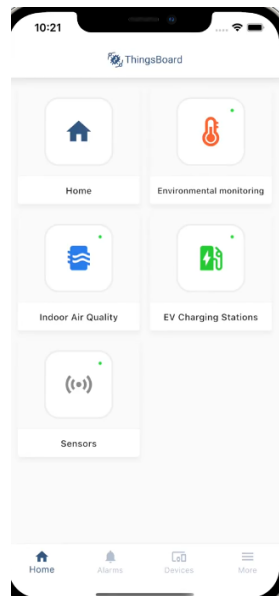
Στην περίπτωση που εξετάζει η παρούσα εργασία, στο έργο θα εγκατασταθούν και σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων, το οποίο χρήζει περαιτέρω ανάπτυξη του λογισμικού EMS. Έτσι με τις κατάλληλες επεκτάσεις, ένα τέτοιου είδους σύστημα δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης της λειτουργίας των φορτιστών και της δυναμικής διαχείρισης της ισχύος, ενώ παράλληλα υπολογίζει την

ενεργειακή κατανάλωση μετά από κάθε χρήση. Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, δύναται να αξιοποιηθεί και για εμπορική χρήση σχετικά με τις υπηρεσίες φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Σε συνεργασία με τους Revenue-grade energy meters που έχουν εγκατασταθεί στους σταθμούς φόρτισης, το EMS μπορεί και υπολογίζει το κόστος φόρτισης, επιτρέποντας στους χρήστες να πληρώσουν με ασφάλεια και ευκολία την συγκεκριμένη υπηρεσία.

Για τις ανάγκες του παρόντος έργου, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS που θα χρησιμοποιηθεί είναι το **ThingsBoard**, μια πλατφόρμα IoT ανοιχτού κώδικα το οποίο προσφέρει ποικίλες λειτουργίες όπως: συλλογή δεδομένων φόρτισης σε πραγματικό χρόνο, παρακολούθηση και οπτικοποίηση των ενεργειακών ροών, την κατάσταση λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων, αυτοματισμούς και κανόνες rule engine για έλεγχο των φορτίσεων για διαχείριση της ενέργειας, υποστήριξη application για τους χρήστες ώστε να ολοκληρώνουν τις πληρωμές τους και σύνδεση με εξωτερικά API για υποστήριξη προληπτικής συντήρησης.



Εικόνα 21 - Προσομοίωση συστήματος EMS - ThingsBoard



Εικόνα 22 - Προσομοίωση συστήματος EMS - ThingsBoard Mobile App for Users

4.7 Εκτίμηση παραγωγής ενέργειας

Ύστερα από την τεχνική αξιολόγηση του έργου, είναι ωφέλιμο να προσεγγίσουμε την παραγόμενη ενέργεια της εγκατάστασης, ώστε με αυτόν τον τρόπο να μπορέσει να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της επένδυσης και η βιωσιμότητα του έργου. Η παρούσα ανάλυση πραγματοποιείται την ετήσια παραγωγή ενέργειας ενός συστήματος solar carport συνολικής ισχύος **682kWp**, τα οποία έχουν εγκατασταθεί στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας (38.023°,23.835°).

Για την προσομοίωση του μοντέλου εκτίμησης της ετήσιας παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων PVGIS-SARAH3, καθώς διαθέτει δεδομένα από δορυφορικά εργαλεία υψηλής ακρίβειας για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ευρώπη. Χαρακτηριστικές παραδοχές της προσομοίωσης είναι η τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου των πάνελ, το έτος αναφοράς 2023 και οι συνολικές απώλειες του συστήματος υπολογισμένες στο 14%.

Όπως αναφέραμε και στις τεχνικές προδιαγραφές του έργου, η κλίση των πάνελ είναι στις 6° και ο προσανατολισμός -179° - όπως ορίζεται για τις εγκαταστάσεις Φ/Β στην Ευρώπη (Umer, Aslam, Rabbani, & Hanif, 2019). Η κλίση των carport με βάση τη βιβλιογραφία, φαίνεται πως είναι η βέλτιστη¹ για τέτοιου είδους εγκαταστάσεις, παρότι η προτεινόμενη κλίση για την Αττική κυμαίνεται μεταξύ 25° και 30°. Ωστόσο, η χαμηλή γωνία φαίνεται να αντισταθμίζεται από τον νότιο προσανατολισμό, καθώς μεγιστοποιεί την ηλιακή πρόσπτωση.

¹ Η γωνία των 6° υποδηλώνει την λειτουργικότητα και τους περιορισμούς των βάσεων στήριξης

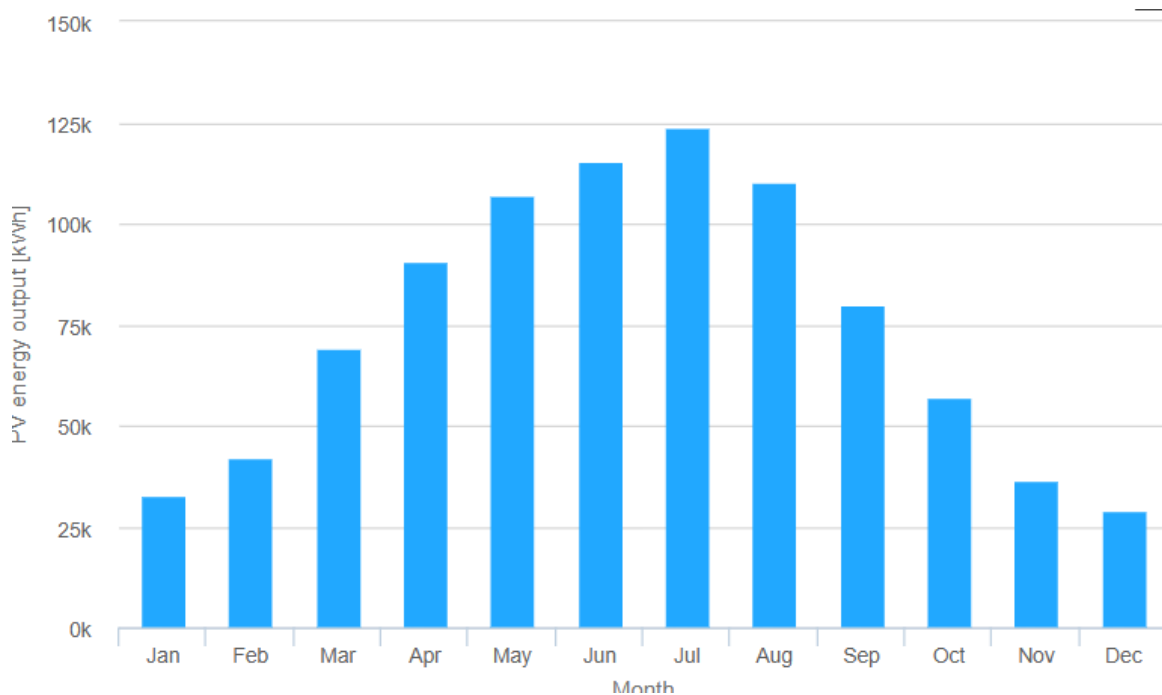
Σύμφωνα με τον πίνακα 3, το μοντέλου υπολόγισε την ετήσια παραγωγή ενέργειας στις **893.400 kWh**, ενώ η ετήσια ακτινοβολία στο επίπεδο των πάνελ ανέρχεται σε **1.698,19 kWh/m²**, η μεταβλητότητα από έτος σε έτος εκτιμάται στις **±15.937 kWh**, δηλαδή περίπου 1,78%, γεγονός που υποδηλώνει σταθερότητα στην παραγωγή και χαμηλό κλιματικό ρίσκο. Τα παραπάνω δεδομένα τεκμηριώνονται και συμφωνούν σε πολύ μεγάλο ποσοστό αν αναλογιστούμε τις κλιματικές συνθήκες της Αττικής, τις απώλειες του συστήματος αλλά και την ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής. Αναφορικά με την ανάλυση των απωλειών, σύμφωνα με την βιβλιογραφία ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του συστήματος είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες και η μικρή ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες λόγω γωνίας πρόσπτωσης ανέρχονται σε -3,98%, ενώ οι φασματικές επιδράσεις περιορίζονται στο -0,43%. Το άθροισμα των επιμέρους απωλειών οδηγεί σε συνολική απώλεια απόδοσης -22,22%, ποσοστό που ευθυγραμμίζεται με τις διεθνείς προδιαγραφές για σταθερές εγκαταστάσεις χωρίς ιχνηλάτες (trackers).

Provided inputs:	
Location [Lat/Lon]:	38.023,23.835
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-SARAH3
PV technology:	Crystalline Silicon (2025)
PV installed [kWp]:	682
System loss [%]:	14
Simulation outputs:	
Slope angle [°]:	6
Azimuth angle [°]:	-179
Yearly PV energy production [kWh]:	893400.35
Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1698.19
Year-to-year variability [kWh]:	15937.03
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-3.98
Spectral effects [%]:	0.43
Temperature and low irradiance [%]:	-6.98
Total loss [%]:	-22.86

Πίνακας 3 - Εκτίμηση ετήσιας παραγωγής ενέργειας - PVGIS-SARAH3

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο που μας δίνει η παραπάνω ανάλυση είναι και η κατανομή της ετήσιας παραγωγής μετά την εγκατάσταση των Φ/Β πάνελ στο solar carport. Όπως φαίνεται και στο γράφημα 5 παρατηρείται μια έντονη διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας, με υψηλότερη παραγωγή να εμφανίζεται τον Ιούλιο, ενώ τις μικρότερες τιμές τις παρατηρούμε τους χειμερινούς μήνες και πιο συγκεκριμένα τον Ιανουάριο. Θα λέγαμε λοιπόν, πως υπάρχει μεγάλη εποχικότητα και αυτό επιφέρει πολλά αποτελέσματα όπως υπερκάλυψη των ενεργειακών αναγκών κατά τους θερινούς μήνες και

μειωμένη παραγωγή κατά τους χειμερινούς. Τα παραπάνω, μεταβάλλουν σημαντικά τα οικονομικά αποτελέσματα και τελικά την αξιολόγηση του έργου, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο.



Γράφημα 7 - Κατανομή παραγωγής ενέργειας ανά μήνα - PVGIS-SARAH3

4.8 Ανάλυση οικονομικών απαιτήσεων

Μετά την εκτίμηση των τεχνικών απαιτήσεων του έργου, σειρά έχει η οικονομική ανάλυση. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές οικονομικές παράμετροι που αφορούν το έργο, με βάση των οποίων θα αξιολογηθεί η επένδυση. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει ανάλυση των οικονομικών δεικτών που αφορούν τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (Capital Expenditures - CAPEX), τα λειτουργικά έξοδα (Operational Expenditures - OPEX), η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value - NPV), ο εσωτερικός ρυθμός απόδοσης (Internal Rate of Return - IRR) και η χρονική περίοδος απόσβεσης (Payback Period) σε τρία διαφορετικά σενάρια:

Σενάριο 1: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Σενάριο 2: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT με μερική αποθήκευση ενέργειας

Σενάριο 3: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT με μεγάλη αποθήκευση ενέργειας για ενεργειακή αυτονομία

Οι παραπάνω δείκτες θα μας βοηθήσουν να εξετάσουμε πλήρως κάθε ένα από τα σενάρια υποδομής σε πολυεπίπεδο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της ανάλυσης του CAPEX θα μελετηθούν οι αρχικές επενδύσεις που απαιτούνται για την υλοποίηση του έργου και αφορούν δαπάνες για εξοπλισμό και εγκατάσταση, υποδομές κλπ., ενώ από την ανάλυση του OPEX θα εξεταστούν τα λειτουργικά έξοδα που συνδέονται με τη συντήρηση και τη λειτουργία του εξοπλισμού. Παράλληλα η ΚΠΑ (NPV) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες αξιολόγησης μια επένδυσης καθώς λαμβάνει υπόψη την παρούσα αξία των μελλοντικών χρηματοροών προσαρμοσμένες στις αναμενόμενες αποδόσεις, ενώ ο δείκτης IRR μας αποδίδει τον ρυθμό με τον οποίο η επένδυση θα παράγει κέρδη συγκριτικά με το κόστος του κεφαλαίου. Τέλος η ανάλυση του δείκτη Payback Period μας δείχνει σε ποιο χρονικό πλαίσιο θα καλυφθεί η αρχική επένδυση (CAPEX) και από ποιο έτος και έπειτα θα αρχίσει η επένδυση να αποφέρει καθαρά έσοδα.

Σενάριο 1: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Το σενάριο 1 αφορά την εγκατάσταση ενός δικτύου solar carport (συνολικής ισχύος 682 kwp) στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας, στο οποίο θα υπάρχει ενσωμάτωση δικτύου IoT, σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων και σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

Το ύψος της αρχικής επένδυσης του σεναρίου 1 σύμφωνα με τον πίνακα 4 ανέρχεται στις **2.013.420,10 €** το οποίο περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης, το κόστος του εξοπλισμού, το κόστος του δικτύου IoT, το κόστος των εγκαταστάσεων και το κόστος των αδειών/μελετών (κατά προσέγγιση).

Κατηγορία εξοπλισμού	Περιγραφή	Τύπος	Μονάδες	Τιμή/μονάδα	Συνολικό κόστος
Φωτοβολταϊκό σύστημα	Βάσεις στήριξης	H2700 MAX DUOPITCH	155	6.500,00 €	1.007.500,00 €
	Φωτοβολταϊκά πάνελ	JA Solar 550wp	1240	123,69 €	153.375,60 €
	Μετατροπέας	Huawei SUN2000	5	6.669,00 €	33.345,00 €
Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	Φορτιστές EV	ABB Terra 22kW	80	1.444,70 €	115.576,00 €
Δίκτυο IoT	Αισθητήρες θέσεων	Milesight WS202	620	58,00 €	35.960,00 €

	Μετρητές ενέργειας	Eastron SDM230	35	89,90 €	3.146,50 €
	String/module sensor	SDM630MCT-LoRaWAN-MID	5	139,00 €	695,00 €
	Αισθητήρες inverter/battery	NKE WATTECO Intens'O	6	193,00 €	1.158,00 €
	Μετεωρολογικός σταθμός	ELEVEN PARAMETER WEATHER STATION	1	3.387,00 €	3.387,00 €
	LoRaWAN Gateway	with LTE	1	289,00 €	289,00 €
	Ανάπτυξη λογισμικού IoT	ThingsBoard	1	8.988,00 €	8.988,00 €
Έξοδα εγκατάστασης	Εγκατάσταση βάσεων στήριξης, πάνελ, sensors		1	360.000,00 €	360.000,00 €
	Καλωδιώσεις/ηλεκτρικά DC/AC		1	150.000,00 €	150.000,00 €
	Θεμελίωση βάσεων στήριξης		1	80.000,00 €	80.000,00 €
Άδειες/Μελέτες	Περιβαλλοντικές, πολεοδομικές κ.α.		1	60.000,00 €	60.000,00 €
					2.013.420,10 €

Πίνακας 4 - Υπολογισμός κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX σεναρίου 1

Αναφορικά με τις λειτουργικές δαπάνες του σεναρίου 1, σύμφωνα με τους πίνακες 5, 6, και 7, εκτιμάται ότι ανέρχονται στις **34.510,65 €**, το οποίο χωρίζεται σε κόστος συντήρησης εξοπλισμού και κόστος λογισμικών αδειών χρήσης. Για την παρούσα εργασία, επειδή πρόκειται για τεχνοοικονομικό έργο, προτιμήθηκε η μέθοδος υπολογισμού OPEX με την μέθοδο bottom-up², καθώς δείχνει με μεγαλύτερη ακρίβεια ποιο στοιχείο του CAPEX επηρεάζει (και κατά πόσο) τα λειτουργικά έξοδα

Κόστος συντήρησης εξοπλισμού			
Εξοπλισμός	Σύνολο CAPEX (€)	Δείκτης συντήρησης (R_class %)	Ετήσιο OPEX (€)
Φωτοβολταϊκά πάνελ (Συντήρηση, καθαρισμός κλπ)	153.375,60 €	0,9%	1.380,38 €
Μετατροπέας	33.345,00 €	1%	333,45 €
Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	115.576,00 €	2%	2.311,52 €
Δίκτυο IoT	53.623,00 €	10%	5.362,30 €

² Μέσω της μεθόδου bottom-up για την ανάλυση του OPEX, παρέχεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η εκτίμησή του, καθώς εξετάζεται κάθε στοιχείο του έργου ξεχωριστά, όπου σε αντίθεση με την μέθοδο top-down, η οποία βασίζεται σε γενικές εκτιμήσεις ή ποσοστά του CAPEX, η bottom-up αθροίζει τα επιμέρους λειτουργικά κόστη που εκτιμώνται για κάθε στοιχείο του έργου.

Balance (Υποδομές, άδειες, BOP κλπ)	610.000,00 €	1%	6.100,00 €
			15.487,65 €

Πίνακας 5 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 1: Κόστος συντήρησης εξοπλισμού

Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης		
Στοιχείο κόστους	Τιμή μονάδας (€)	Ετήσιο OPEX (€)
Cloud licence	Σταθερό κόστος = 8.988 €	8.988,00€
Αναβάθμιση συσκευών	30 €/h x 0,5h = 15 €	10.035,00€
		19.023,00 €

Πίνακας 6 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 1: Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης

Είδος	Συνολικό ετήσιο OPEX (€)
Hardware OPEX	15.487,65 €
Software OPEX	19.023,00 €
	34.510,65 €

Πίνακας 7 - Σύνολο Λειτουργικών εξόδων OPEX σεναρίου 1

Σχετικά με την ανάλυση της Καθαρής Παρούσας Αξίας, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε σύμφωνα με τον πίνακα 8, το συνολικό κόστος της επένδυσης, το οποίο είναι στα **2.013.420,10 €**, το λειτουργικό κόστος στα **34.510,65 €**, την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος η οποία είναι **893.400,35 kWh**, με μέση τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο στα **0,25 €/kWh**, τη συνολική κατανάλωση του συστήματος η οποία υπολογίστηκε³ στις **5.170.000 kWh/έτος** και την εξοικονόμηση από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω Φ/Β στις **89.340 € ετησίως**, με βάση την αποτίμηση 0,10 €/kWh μέσω net metering. Ειδικότερα, αν υποθέταμε πως αγοράζαμε όλη την ενέργεια τότε θα υπήρχε ένα κόστος ύψους 1.292.500€ (αφού 5.170.000 kWh * 0,25€ kWh). Τέλος τα έσοδα από την φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων εκτιμήθηκαν⁴ στις **153.000 €** με βάση την καθημερινή χρήση των 80 φορτιστών και χρέωση **0,40 €/kWh**. Έτσι τα συνολικά έσοδα έχουν ύψος **242.340 €**, ενώ η **καθαρή ετήσια χρηματοροή** (μετά την αφαίρεση του OPEX) διαμορφώνεται στα **207.829,3 €**.

Για τις ανάγκες υπολογισμού της ΚΠΑ, χρησιμοποιήθηκε ως προεξοφλητικό επιτόκιο discount rate 3% το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον σε κοινωνικά και δημόσια έργα (Fregonara & Ferrando, 2023) ενώ σύμφωνα με διεθνείς πρακτικές ο χρονικός ορίζοντας αξιολόγησης του έργου ορίστηκε στα 20 έτη.

³ 80 φορτιστές x 22 kW x 8 ώρες/ημέρα x 365 = 5.139.200 kWh/έτος + 30.000 kWh για IoT

⁴ 80 φορτιστές x 1 φόρτιση/ημέρα x 22 kWh x 0,40 €/kWh x 365 ημέρες

CAPEX	2.013.420,10 €
OPEX	34.510,65 €
Παραγωγή ενέργειας	893.400,35 kWh
Μέση τιμή kWh	0,25 €
Κατανάλωση συστήματος	5.170.000 kWh
Εξοικονόμηση από παραγωγή ενέργειας	89.340€
Έσοδα από φόρτιση EV (80 φορτιστές, 1 φορτίσεις/ημέρα, 20 kWh/όχημα, 0,40 €/kWh) τον χρόνο	153.000,00 €
Σύνολο εσόδων	242.340,00 €
Καθαρή χρηματοροή	207.829,35 €
Discount rate	3%
Χρονικός ορίζοντας	20 έτη

Πίνακας 8 - Δεδομένα σεναρίου 1 για υπολογισμό ΚΠΑ

Σύμφωνα με τον πίνακα 9 όπου αναλύει την ΚΠΑ του έργου, φαίνεται να υπολογίστηκε στις **-934.864,28 €** ενώ ο IRR στο **8%**. Αυτό υπονοεί ότι η επένδυση δεν αποτελεί βιώσιμη επιλογή, με κοινωνικά αποδεκτό συντελεστή προεξόφλησης 3%. Τέλος το έργο αποσβένεται πλήρως στο 10ο έτος του (Payback Period), καθώς τότε είναι που καλύπτεται πλήρως το ύψος της αρχικής επένδυσης πίνακας 10.

Έτος	Καθαρή Χρηματοροή (€)	Συντελεστής Προεξόφλησης (3%)	Παρούσα Αξία (€)
0	-2.013.420,10 €	1,000	-2.013.420,10 €
1	207.829,35 €	0,971	201.776,07 €
2	207.829,35 €	0,943	195.899,09 €
3	207.829,35 €	0,915	190.193,30 €
4	207.829,35 €	0,888	184.653,69 €
5	207.829,35 €	0,863	179.275,42 €
6	207.829,35 €	0,837	174.053,81 €
7	207.829,35 €	0,813	168.984,28 €
8	207.829,35 €	0,789	164.062,41 €
9	207.829,35 €	0,766	159.283,89 €
10	207.829,35 €	0,744	154.644,55 €
11	207.829,35 €	0,722	150.140,34 €

12	207.829,35 €	0,701	145.767,32 €
13	207.829,35 €	0,681	141.521,67 €
14	207.829,35 €	0,661	137.399,68 €
15	207.829,35 €	0,642	133.397,75 €
16	207.829,35 €	0,623	129.512,38 €
17	207.829,35 €	0,605	125.740,17 €
18	207.829,35 €	0,587	122.077,84 €
19	207.829,35 €	0,570	118.522,17 €
20	207.829,35 €	0,554	115.070,07 €
			1.078.555,82 €

ΚΠΑ	-934.864,28 €
IRR	8%

Πίνακας 9 - Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) & IRR σεναρίου 1 με Συντελεστή Προεξόφλησης 3% για Χρονικό Ορίζοντα 20 Ετών

Έτος	Καθαρή Χρηματοροή (€)	Συρρευστική Χρηματοροή (€)
0	-2.013.420,10 €	-2.013.420,10 €
1	207.829,35 €	-1.805.590,75 €
2	207.829,35 €	415.658,70 €
3	207.829,35 €	623.488,05 €
4	207.829,35 €	831.317,40 €
5	207.829,35 €	1.039.146,75 €
6	207.829,35 €	1.246.976,10 €
7	207.829,35 €	1.454.805,45 €
8	207.829,35 €	1.662.634,80 €
9	207.829,35 €	1.870.464,15 €
10	207.829,35 €	2.078.293,50 €
11	207.829,35 €	2.286.122,85 €
12	207.829,35 €	2.493.952,20 €

13	207.829,35 €	2.701.781,54 €
14	207.829,35 €	2.909.610,89 €
15	207.829,35 €	3.117.440,24 €
16	207.829,35 €	3.325.269,59 €
17	207.829,35 €	3.533.098,94 €
18	207.829,35 €	3.740.928,29 €
19	207.829,35 €	3.948.757,64 €
20	207.829,35 €	4.156.586,99 €

Πίνακας 10 - Υπολογισμός έτους απόσβεσης σεναρίου 1 (Payback Period)

Έτσι, το σενάριο 1 χρήζει περαιτέρω διερεύνησης ως επενδυτική κίνηση, καθώς παρά το γεγονός της αρνητικής ΚΠΑ, ο ισχυρός δείκτης IRR και η δυνατότητα απόσβεσης του κόστους κεφαλαίου σε 10 χρόνια το καθιστά αρκετά ελκυστικό έργο, ιδιαίτερα αν εφαρμοστούν ορισμένες μετατροπές - λόγου χάριν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας όπως θα εξετάσουμε στα σενάρια 2 & 3.

Σενάριο 2: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT με μερική αποθήκευση ενέργειας

Το σενάριο 2 αφορά την εγκατάσταση ενός δικτύου solar carport (συνολικής ισχύος 682 kwp) στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας, στο οποίο θα υπάρχει ενσωμάτωση δικτύου IoT, σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων και σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας με μερική αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα θα ενσωματωθούν τρεις μπαταρίες συνολικής χωρητικότητας 600 kWh για αποθήκευση ενέργειας και αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας του συστήματος, μειώνοντας την ανάγκη για αγορά ενέργειας σε ώρες όπου δεν υφίσταται παραγωγή.

Το ύψος της αρχικής επένδυσης του σεναρίου 2 σύμφωνα με τον πίνακα 11 ανέρχεται στις **2.495.274,97 €** το οποίο περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης, το κόστος του εξοπλισμού, το κόστος του δικτύου IoT, το κόστος των εγκαταστάσεων και το κόστος των αδειών/μελετών (κατά προσέγγιση), ενώ το ύψος των λειτουργικών δαπανών OPEX υπολογίστηκε στις **46.557,0 €** (Πίνακας 12,13,14).

Κατηγορία εξοπλισμού	Περιγραφή	Τύπος	Μονάδες	Τιμή/μονάδα	Συνολικό κόστος
Φωτοβολταϊκό σύστημα	Βάσεις στήριξης	H2700 MAX DUOPITCH	155	6.500,00 €	1.007.500,00 €
	Φωτοβολταϊκά πάνελ	JA Solar 550wp	1240	123,69 €	153.375,60 €
	Μετατροπέας	Huawei SUN2000	5	6.669,00 €	33.345,00 €
Αποθήκευση ενέργειας	Σύστημα	Huawei LUNA2000-	3	160.618,29 €	481.854,87 €

	αποθήκευσης	200KWH-2H1			
Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	Φορτιστές EV	ABB Terra 22kW	80	1.444,70 €	115.576,00 €
Δίκτυο IoT	Αισθητήρες θέσεων	Milesight WS202	620	58,00 €	35.960,00 €
	Μετρητές ενέργειας	Eastron SDM230	35	89,90 €	3.146,50 €
	String/module sensor	SDM630MCT-LoRaWAN-MID	5	139,00 €	695,00 €
	Αισθητήρες inverter/battery	NKE WATTECO Intens'O	6	193,00 €	1.158,00 €
	Μετεωρολογικός σταθμός	ELEVEN PARAMETER WEATHER STATION	1	3.387,00 €	3.387,00 €
	LoRaWAN Gateway	with LTE	1	289,00 €	289,00 €
	Ανάπτυξη λογισμικού IoT	ThingsBoard	1	8.988,00 €	8.988,00 €
Έξοδα εγκατάστασης	Εγκατάσταση βάσεων στήριξης, πάνελ, sensors		1	360.000,00 €	360.000,00 €
	Καλωδιώσεις/ηλεκτρικά DC/AC		1	150.000,00 €	150.000,00 €
	Θεμελίωση βάσεων στήριξης		1	80.000,00 €	80.000,00 €
Άδειες/Μελέτες	Περιβαλλοντικές, πολεοδομικές κ.α.		1	60.000,00 €	60.000,00 €
					2.495.274,97 €

Πίνακας 11 - Υπολογισμός κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX σεναρίου 2

Κόστος συντήρησης εξοπλισμού			
Εξοπλισμός	Σύνολο CAPEX (€)	Δείκτης συντήρησης (R_class %)	Ετήσιο OPEX (€)
Φωτοβολταϊκά πάνελ (Συντήρηση, καθαρισμός κλπ)	153.375,60 €	0,9%	1.380,38 €
Μετατροπέας	33.345,00 €	1%	333,45 €
Αποθήκευση ενέργειας	481.854,87 €	2,50%	12.046,37 €
Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	115.576,00 €	2%	2.311,52 €
Δίκτυο IoT	53.623,00 €	10%	5.362,30 €
Balance (Υποδομές, άδειες, BOP κλπ)	610.000,00 €	1%	6.100,00 €

	27.534,02 €
--	-------------

Πίνακας 12 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 2: Κόστος συντήρησης εξοπλισμού

Κόστος λογισμικών-αδειών χρήσης		
Στοιχείο κόστους	Τιμή μονάδας (€)	Ετήσιο OPEX (€)
Cloud licence	Σταθερό κόστος = 8.988 €	8.988,00€
Αναβάθμιση συσκευών	30 €/h x 0,5h = 15 €	10.035,00€
		19.023,00 €

Πίνακας 13 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 2: Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης

Είδος	Συνολικό ετήσιο OPEX (€)
Hardware OPEX	27.534,02 €
Software OPEX	19.023,00 €
	46.557,02 €

Πίνακας 14 - Σύνολο Λειτουργικών εξόδων OPEX σεναρίου 2

Όπως παρατηρούμε, η ειδοποιός διαφορά του σεναρίου 2 είναι η εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνολικής χωρητικότητας 600 kWh. Αυτό έχει άμεσα αποτελέσματα τόσο στο ύψος της αρχικής επένδυσης όσο και στα ετήσια λειτουργικά έξοδα. Σχετικά με το ύψος της συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας υπολογίστηκε στις 219.000 kWh (600 kWh x 365 ημέρες), όπου η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των αναγκών του συστήματος, εξοικονομώντας την αγορά ενέργειας σε 54.750 €, ενώ η υπολειπόμενη παραγόμενη ενέργεια αποδίδεται στο δίκτυο μέσω net metering, οδηγώντας σε συνολική εξοικονόμηση στις 122.190 € ετησίως.

CAPEX	2.495.274,97 €
OPEX	46.557,02 €
Παραγωγή ενέργειας	893.400,35 kWh
Μέση τιμή kWh	0,25 €
Κατανάλωση συστήματος	5.170.000 kWh
Αποθήκευση ενέργειας	219.000 kWh
Εξοικονόμηση από χρήση μπαταριών	54.750,00€
Εξοικονόμηση από net metering (υπόλοιπη ενέργεια)	67.440,00€
Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας	122.190,00€

Έσοδα από φόρτιση EV (80 φορτιστές, 1 φορτίσεις/ημέρα, 20 kWh/όχημα, 0,40 €/kWh) τον χρόνο	153.000,00 €
Σύνολο εσόδων	275.190,00 €
Καθαρή χρηματοροή	228.632,98 €
Discount rate	3%
Χρονικός ορίζοντας	20 έτη

Πίνακας 15 - Δεδομένα σεναρίου 2 για υπολογισμό ΚΠΑ

Σύμφωνα με τον Πίνακα 16, όπου παρουσιάζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) του έργου, αυτή εκτιμάται στα **-1.708.583,65 €**, ενώ ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) ανέρχεται σε **6%**. Στο 10ο έτος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών, έγινε η παραδοχή ότι πραγματοποιείται αντικατάσταση των μπαταριών, γεγονός που μειώνει τη χρηματοροή εκείνου του έτους κατά το αντίστοιχο κόστος αγοράς. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 17, το έργο αποσβένεται πλήρως στο 12ο έτος (Payback Period), καθώς τότε εξοφλείται πλήρως το αρχικό ύψος της επένδυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν δεν είχε πραγματοποιηθεί η αντικατάσταση των μπαταριών, ή εναλλακτικά, αν μέσω της χρήσης IoT τεχνολογιών είχε επιτευχθεί παράταση της διάρκειας ζωής τους, τότε η απόσβεση θα είχε επιτευχθεί στο 10ο έτος.

Έτος	Καθαρή Χρηματοροή (€)	Συντελεστής Προεξόφλησης (3%)	Παρούσα Αξία (€)
0	-2.495.274,97 €	1,000	-2.495.274,97 €
1	228.632,98 €	0,971	221.973,76 €
2	228.632,98 €	0,943	215.508,51 €
3	228.632,98 €	0,915	209.231,56 €
4	228.632,98 €	0,888	203.137,44 €
5	228.632,98 €	0,863	197.220,82 €
6	228.632,98 €	0,837	191.476,52 €
7	228.632,98 €	0,813	185.899,53 €
8	228.632,98 €	0,789	180.484,98 €
9	228.632,98 €	0,766	175.228,14 €
10	68.014,69 €	0,744	50.609,32 €
11	228.632,98 €	0,722	165.169,33 €
12	228.632,98 €	0,701	160.358,57 €
13	228.632,98 €	0,681	155.687,93 €
14	228.632,98 €	0,661	151.153,33 €

15	228.632,98 €	0,642	146.750,81 €
16	228.632,98 €	0,623	142.476,51 €
17	228.632,98 €	0,605	138.326,71 €
18	228.632,98 €	0,587	134.297,78 €
19	228.632,98 €	0,570	130.386,19 €
20	228.632,98 €	0,554	126.588,54 €
			786.691,32 €

ΚΠΑ	-1.708.583,65 €
IRR	6%

Πίνακας 16 - Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) & IRR σεναρίου 2 με Συντελεστή Προεξόφλησης 3% για Χρονικό Ορίζοντα 20 Ετών

Έτος	Καθαρή Χρηματοροή (€)	Συρρευστική Χρηματοροή (€)
0	-2.495.274,97 €	-2.495.274,97 €
1	228.632,98 €	-2.266.641,99 €
2	228.632,98 €	457.265,96 €
3	228.632,98 €	685.898,93 €
4	228.632,98 €	914.531,91 €
5	228.632,98 €	1.143.164,89 €
6	228.632,98 €	1.371.797,87 €
7	228.632,98 €	1.600.430,84 €
8	228.632,98 €	1.829.063,82 €
9	228.632,98 €	2.057.696,80 €
10	68.014,69 €	2.125.711,49 €
11	228.632,98 €	2.354.344,47 €
12	228.632,98 €	2.582.977,44 €
13	228.632,98 €	2.811.610,42 €
14	228.632,98 €	3.040.243,40 €
15	228.632,98 €	3.268.876,38 €
16	228.632,98 €	3.497.509,36 €
17	228.632,98 €	3.726.142,33 €
18	228.632,98 €	3.954.775,31 €

19	228.632,98 €	4.183.408,29 €
20	228.632,98 €	4.412.041,27 €

Πίνακας 17 - Υπολογισμός έτους απόσβεσης σεναρίου 2 (Payback Period)

Αξιοποιώντας τους οικονομικούς δείκτες που υπολογίστηκαν προηγουμένως, παρατηρούμε ότι η δυνατότητα για αποθήκευση ενέργειας μειώνει κατά ένα μέρος την εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο, αυξάνοντας κατά τινά τρόπο την εξοικονόμηση της ενέργειας. Ωστόσο η ΚΠΑ παραμένει αρνητική και μειώνεται και ο IRR εξαιτίας του μεγαλύτερου CAPEX και OPEX που επιφέρει η ενσωμάτωση των μπαταριών. Επιπλέον, η περίοδος αποπληρωμής ανέρχεται στα 12 έτη γεγονός που δεν αντανακλά την οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Ωστόσο η ενσωμάτωση ενός μεγαλύτερου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας θα εξοικονομούσε επιπλέον χρήματα, αλλά ταυτόχρονα θα αύξανε σημαντικά τα έσοδα καθώς θα υποστήριζε τη δυνατότητα νυχτερινής φόρτισης των οχημάτων καθιστώντας την επένδυση πιο ελκυστική όπως θα δούμε στο σενάριο 3.

Σενάριο 3: Εγκατάσταση δικτύου solar carport με ενσωμάτωση αισθητήρων IoT με μεγάλη αποθήκευση ενέργειας για ενεργειακή αυτονομία

Στο σενάριο 3, εξετάζεται η εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας, με το σύστημα Tesla Megapack 2 XL, συνολικού κόστους 1,8 εκατ. ευρώ. Έτσι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες διαμορφώνονται στις **3.813.420,10 €**, ενώ το ετήσιο λειτουργικό κόστος στις **79.510,65 €**, οδηγώντας σε ετήσια εξοικονόμηση **223.350,09 €**.

Κατηγορία εξοπλισμού	Περιγραφή	Τύπος	Μονάδες	Τιμή/μονάδα	Συνολικό κόστος
Φωτοβολταϊκό σύστημα	Βάσεις στήριξης	H2700 MAX DUOPITCH	155	6.500,00 €	1.007.500,00 €
	Φωτοβολταϊκά πάνελ	JA Solar 550wp	1240	123,69 €	153.375,60 €
	Μετατροπέας	Huawei SUN2000	5	6.669,00 €	33.345,00 €
Αποθήκευση ενέργειας	Σύστημα αποθήκευσης	Tesla Megapack 2 XL	1	1.800.000,00 €	1.800.000,00 €
Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	Φορτιστές EV	ABB Terra 22kW	80	1.444,70 €	115.576,00 €
Δίκτυο IoT	Αισθητήρες θέσεων	Milesight WS202	620	58,00 €	35.960,00 €
	Μετρητές ενέργειας	Eastron SDM230	35	89,90 €	3.146,50 €
	String/module	SDM630MCT-LoRaWAN-	5	139,00 €	695,00 €

	sensor	MID			
	Αισθητήρες inverter/battery	NKE WATTECO Intens'O	6	193,00 €	1.158,00 €
	Μετεωρολογικός σταθμός	ELEVEN PARAMETER WEATHER STATION	1	3.387,00 €	3.387,00 €
	LoRaWAN Gateway	with LTE	1	289,00 €	289,00 €
	Ανάπτυξη λογισμικού IoT	ThingsBoard	1	8.988,00 €	8.988,00 €
Έξοδα εγκατάστασης	Εγκατάσταση βάσεων στήριξης, πάνελ, sensors		1	360.000,00 €	360.000,00 €
	Καλωδιώσεις/ηλεκτρικά DC/AC		1	150.000,00 €	150.000,00 €
	Θεμελίωση βάσεων στήριξης		1	80.000,00 €	80.000,00 €
Άδειες/Μελέτες	Περιβαλλοντικές, πολεοδομικές κ.α.		1	60.000,00 €	60.000,00 €
					3.813.420,10 €

Πίνακας 18 - Υπολογισμός κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX σεναρίου 3

Κόστος συντήρησης εξοπλισμού			
Εξοπλισμός	Σύνολο CAPEX (€)	Δείκτης συντήρησης (R_class %)	Ετήσιο OPEX (€)
Φωτοβολταϊκά πάνελ (Συντήρηση, καθαρισμός κλπ)	153.375,60 €	0,9%	1.380,38 €
Μετατροπέας	33.345,00 €	1%	333,45 €
Αποθήκευση ενέργειας	1.800.000,00 €	2,50%	45.000,00 €
Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	115.576,00 €	2%	2.311,52 €
Δίκτυο IoT	53.623,00 €	10%	5.362,30 €
Balance (Υποδομές, άδειες, BOP κλπ)	610.000,00 €	1%	6.100,00 €
			60.487,65 €

Πίνακας 19 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 3: Κόστος συντήρησης εξοπλισμού

Κόστος λογισμικών-αδειών χρήσης		
Στοιχείο κόστους	Τιμή μονάδας (€)	Ετήσιο OPEX (€)
Cloud licence	Σταθερό κόστος = 8.988 €	8.988,00€

Αναβάθμιση συσκευών	30 €/h x 0,5h = 15 €	10.035,00€
		19.023,00 €

Πίνακας 20 - Λειτουργικά έξοδα OPEX σεναρίου 3: Κόστος λογισμικών - αδειών χρήσης

Είδος	Συνολικό ετήσιο OPEX (€)
Hardware OPEX	60.487,65 €
Software OPEX	19.023,00 €
	79.510,65 €

Πίνακας 21 - Σύνολο Λειτουργικών εξόδων OPEX σεναρίου 3

Για το συγκεκριμένο σενάριο, φαίνεται πως η δυνατότητα του συστήματος μπορεί και αποθηκεύει όλη την παραγόμενη ενέργεια και την αποδίδει όταν χρειάζεται. Πιο συγκεκριμένα, η δυνατότητα αποθήκευσης ανέρχεται στις 1.423.500 kWh ετησίως γεγονός που υπερκαλύπτει την ετήσια παραγωγή του solar carport. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει περιθώριο αποθήκευσης ενέργειας και από το δίκτυο όταν είναι οικονομικά συμφέρον - φαινόμενο Arbitrage (Cetinkaya, U,2023).

Για τον λόγο αυτό η υποδομή του συστήματος περιλαμβάνει υποστήριξη δύο φορτίσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά σταθμό φόρτισης την ημέρα, γεγονός που εκτοξεύει τα συνολικά έσοδα της εγκατάστασης σε 690.550,09€, δημιουργώντας μια καθαρή χρηματοροή στα 611.039,44 € Πίνακας 22. Έτσι υπολογίστηκε η ΚΠΑ στα **1.463.883,66 €** και ο IRR **15%** γεγονός που υποδεικνύει τη μεγάλη οικονομική βιωσιμότητα του έργου, και αποτελεί μια αξιόλογη επένδυση. Ο χρόνος απόσβεσης υπολογίστηκε ότι θα πραγματοποιηθεί στο 7ο έτος με την παραδοχή ότι θα υπάρξει αντικατάσταση της μπαταρίας στο 10 έτος όπως προτείνει ο κατασκευαστής. Παρατηρούμε λοιπόν πως η αντικατάσταση της μπαταρίας υλοποιείται αφού έχει επέλθει η συνολική απόσβεση του έργου, επικυρώνοντας με αυτό τον τρόπο τα πολλαπλά οικονομικά οφέλη που προσφέρει η επένδυση.

Έτος	Καθαρή Χρηματοροή (€)	Συντελεστής Προεξόφλησης (3%)	Παρούσα Αξία (€)
0	-3.813.420,10 €	1,000	-3.813.420,10 €
1	611.039,44 €	0,971	593.242,17 €
2	611.039,44 €	0,943	575.963,27 €
3	611.039,44 €	0,915	559.187,64 €
4	611.039,44 €	0,888	542.900,63 €
5	611.039,44 €	0,863	527.087,99 €
6	611.039,44 €	0,837	511.735,91 €
7	611.039,44 €	0,813	496.830,98 €
8	611.039,44 €	0,789	482.360,17 €

9	611.039,44 €	0,766	468.310,85 €
10	611.039,44 €	0,744	454.670,73 €
11	611.039,44 €	0,722	441.427,89 €
12	611.039,44 €	0,701	428.570,77 €
13	611.039,44 €	0,681	416.088,12 €
14	611.039,44 €	0,661	403.969,05 €
15	611.039,44 €	0,642	392.202,96 €
16	611.039,44 €	0,623	380.779,58 €
17	611.039,44 €	0,605	369.688,91 €
18	611.039,44 €	0,587	358.921,27 €
19	611.039,44 €	0,570	348.467,25 €
20	611.039,44 €	0,554	338.317,72 €
			5.277.303,76 €

ΚΠΑ	1.463.883,66 €
IRR	15%

Πίνακας 22 - Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) & IRR σεναρίου 3 με Συντελεστή Προεξόφλησης 3% για Χρονικό Ορίζοντα 20 Ετών

Έτος	Καθαρή Χρηματοροή (€)	Συρρεντική Χρηματοροή (€)
0	-3.773.420,10 €	-3.773.420,10 €
1	611.039,44 €	-3.162.380,66 €
2	611.039,44 €	1.222.078,87 €
3	611.039,44 €	1.833.118,31 €
4	611.039,44 €	2.444.157,75 €
5	611.039,44 €	3.055.197,19 €
6	611.039,44 €	3.666.236,62 €
7	611.039,44 €	4.277.276,06 €
8	611.039,44 €	4.888.315,50 €
9	611.039,44 €	5.499.354,93 €
10	-1.188.960,56 €	4.310.394,37 €
11	611.039,44 €	4.921.433,81 €

12	611.039,44 €	5.532.473,25 €
13	611.039,44 €	6.143.512,68 €
14	611.039,44 €	6.754.552,12 €
15	611.039,44 €	7.365.591,56 €
16	611.039,44 €	7.976.630,99 €
17	611.039,44 €	8.587.670,43 €
18	611.039,44 €	9.198.709,87 €
19	611.039,44 €	9.809.749,30 €
20	611.039,44 €	10.420.788,74 €

Πίνακας 23 - Υπολογισμός έτους απόσβεσης σεναρίου 3 (Payback Period)

5. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η ανάλυση των αποτελεσμάτων αποδεικνύει πως η ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT αποτελεί μια στρατηγική επιλογή για την ενεργειακή πολιτική της Ελλάδας και όχι μόνο. Τα μακροπρόθεσμα οφέλη της αξιοποίησης του IoT, συντάσσουν ένα νέο υπόδειγμα ενεργειακής διακυβέρνησης, στο οποίο η έγκυρη πληροφόρηση αποκτά κεντρικό άξονα λήψης αποφάσεων. Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκε ολιστικά η ενσωμάτωση τεχνολογιών Internet of Things (IoT) με σκοπό την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας. Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε εστίασε τόσο στο θεωρητικό υπόβαθρο των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το οικοσύστημα του IoT και της ενεργειακής αυτονομίας, όσο και στην ανάλυση ευρωπαϊκών περιπτώσεων όπου εφάρμοσαν επιτυχώς τις παραπάνω πρακτικές. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι βασικές έννοιες του IoT, το οποίο αποτελεί ένα τεχνολογικό οικοσύστημα με δυναμική αλληλεπίδραση αισθητηρίων και συσκευών, και οι τεχνολογίες επικοινωνίας και αρχιτεκτονικής που το υποστηρίζουν (όπως δίκτυα LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi και ZigBee). Το κυριότερο κομμάτι της θεωρητικής προσέγγισης, βασίστηκε στην διερεύνηση των ευεργετικών πλεονεκτημάτων που επιφέρει η ενσωμάτωσή του ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί η ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η συλλογή δεδομένων πραγματικού χρόνου, η βελτιστοποίηση κατανάλωσης και αποθήκευσης και οι αλγόριθμοι υποστήριξης προληπτικής συντήρησης, αποτελούν μερικά από τα κύρια οφέλη που προσφέρει η εγκατάσταση IoT σε ένα ενεργειακό πάρκο. Εν συνεχεία, έγινε η θεωρητική προσέγγιση του όρου της ενεργειακής αυτονομίας – ενός ενεργειακού συστήματος με δυνατότητα ολικής ή μερικής κάλυψης των ενεργειακών του αναγκών, ενώ παράλληλα μελετήθηκαν οι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να καταστήσουν δυνατή μια τέτοια μετάβαση.

Στο τρίτο μέρος της παρούσας εργασίας, το θεωρητικό πλαίσιο ενισχύθηκε με τις μελέτες περίπτωσης ευρωπαϊκών παραδειγμάτων, στις οποίες υιοθετήθηκαν οι παραπάνω πρακτικές. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε το έργο της ενεργειακής νήσου της Δανίας, το Bornholm, κατά το οποίο αναδείχθηκαν τα αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας με κύριο συστατικό τη χρήση έξυπνων δικτύων και αισθητήρων IoT, το πιλοτικό έργο της Ελλάδας στην Τήλο, το οποίο αφορά την ανάπτυξη του πρώτου υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα, και τέλος στο διευρωπαϊκό πρόγραμμα InterConnect H2020, κατά το οποίο αναπτύχθηκαν οι ψηφιακές πλατφόρμες διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας με διαλειτουργικά συστήματα IoT.

Με γνώμονα τις ευρωπαϊκές αυτές πρακτικές, ολοκληρώθηκε η εκπόνηση της σχεδίασης μιας τεχνοοικονομικής ανάλυσης για την εφαρμογή τους σε ελληνικό πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα, έγινε μελέτη για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού δικτύου τύπου solar carport στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας, συνυφασμένο σε τρεις άξονες – την παραγωγή πράσινης ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ, την αποθήκευση μέσω συστημάτων μπαταριών, την φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων και την παρακολούθηση και διαχείριση της ενέργειας μέσω εγκατάστασης αισθητήρων IoT και πλατφόρμας EMS. Τέλος, το έργο αξιολογήθηκε με βάση την ποσοτική ανάλυση κόστους-οφέλους (CAPEX/OPEX) με παράλληλη χρηματοοικονομική εκτίμηση μέσω δεικτών όπως NPV, IRR και Payback Period για διάστημα 20 ετών. Για την πληρέστερη

ανάλυση εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια τα οποία διέφεραν ως προς το επίπεδο αποθήκευσής τους. Πιο συγκεκριμένα το σενάριο 1 δεν είχε καθόλου σύστημα αποθήκευσης, το σενάριο 2 είχε μικρής κλίμακας και το σενάριο 3 πλήρη αποθηκευτική ικανότητα.

Σύμφωνα με το σενάριο 1, από την ανάλυση των κεφαλαιουχικών δαπανών, ήταν εκείνο με το χαμηλότερο CAPEX, αλλά με την μικρότερη δυνατότητα ενεργειακής ευελιξίας, εξαιτίας της μεγαλύτερης εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο κατά τις ώρες χωρίς παραγωγή ενέργειας. Παρά την αρνητική ΚΠΑ, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ήταν στα 5,2%, γεγονός που υποδεικνύει ότι το έργο θα μπορούσε να είναι πλήρως οικονομικά αποδεκτό με μερικές μεταβολές ως προς το επίπεδο αποθήκευσης. Αναφορικά με το σενάριο 2, όπου υποστηρίζει μερική αποθήκευση ενέργειας, φαίνεται πως μειώνεται σημαντικά η εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο. Η ενσωμάτωση ωστόσο ενός συστήματος αποθήκευσης, εμπεριέχει ένα σημαντικό κόστος που επηρεάζει αρνητικά τόσο το CAPEX όσο και το OPEX. Έτσι από τους χρηματοοικονομικούς δείκτες παρατηρούμε πως η ΚΠΑ συνεχίζει να είναι αρνητική, αλλά ο IRR βελτιώνεται στο 8,7%, ενώ η περίοδος απόσβεσης ήταν στα 12 έτη (συνυπολογίζοντας την αντικατάσταση του συστήματος αποθήκευσης στα 10 έτη). Παρατηρούμε λοιπόν, πως το παραπάνω έργο αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη λύση, η οποία με βελτιώσεις στο επίπεδο αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να εξασφαλίσει υψηλότερα έσοδα από την φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων κατά τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια και να μηδενίσει την εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο, καταστρώνοντας το σενάριο 3 την πλέον συμφέρουσα οικονομικά και ενεργειακά λύση. Πιο συγκεκριμένα, με μια επένδυση ύψους 1,8 εκατομμύρια ευρώ επιπλέον, το σενάριο 3 ενσωματώνει ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με χωρητικότητα μεγαλύτερη από την παραγωγική δυνατότητα, ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί και την τεχνική του Arbitrage. Έτσι αυξάνονται τα έσοδα από τις φορτίσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και αυξάνεται η εξοικονόμηση κόστους αγοράς ενέργειας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μεταβληθούν οι χρηματοοικονομικοί δείκτες σε θετική ΚΠΑ και IRR 12,3% με περίοδο απόσβεσης στα 8 έτη. Τα παραπάνω οικονομικά αποτελέσματα αποδεικνύουν την οικονομική βιωσιμότητα του έργου και την θετική αξιολόγηση της επένδυσης.

Σημαντικό είναι να αναφέρουμε το γεγονός πως η εγκατάσταση αισθητήρων με δυνατότητα επικοινωνίας μέσω LoRaWAN, αλλά και η ανάπτυξη της πλατφόρμας EMS μέσω του ThingsBoard, επέτρεψε την εποπτεία των δεδομένων απόδοσης, παραγωγής και κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας σημαντικά στην διασφάλιση χαμηλότερου OPEX και παράταση της λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων, μέσω της στοχευμένης συντήρησης που υποστήριζε και της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης που έχουν οι ίδιοι οι αισθητήρες. Πιο αναλυτικά, τα δεδομένα που συλλέγονται από τους εγκατεστημένους αισθητήρες στο πεδίο, μέσω της cloud εφαρμογής και των αλγορίθμων που αναλύουν τα δεδομένα και υλοποιούν προγνωστική συντήρηση, δίνουν την δυνατότητα προειδοποίησης τυχών σφαλμάτων και αστοχιών ή υπερφορτώσεις δικτύου που ενδεχομένως να δημιουργήσουν βλάβη.

Καταλήγοντας, η παρούσα εργασία ανέδειξε τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η συνέργεια ΑΠΕ και IoT για ενεργειακή αυτονομία, καθιστώντας τον παραπάνω συνδυασμό μια τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά βιώσιμη λύση. Το υποθετικό έργο εγκατάστασης φωτοβολταϊκού δικτύου τύπου solar carport στον υπαίθριο χώρο στάθμευσης της στάσης του μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας, απέδειξε ότι η τοπική αποκεντρωμένη ενεργειακή διαχείριση μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας, καθώς οι τεχνολογίες IoT και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων αποτελούν τους πυλώνες της ευφυούς παρακολούθησης για την δυναμική αντιστοίχιση προσφοράς και ζήτησης. Επιπλέον, τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα είναι προφανή, καθώς μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές CO₂ και προάγεται η πράσινη ενέργεια. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παραληφθούν οι τεχνοοικονομικές προκλήσεις. Με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και πληροφορίες, οι κεφαλαιουχικές δαπάνες ενός

τέτοιου έργου, δεν μπορούν να κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα εξαιτίας της αναγκαιότητας εξειδικευμένου προσωπικού, τεχνολογικών αλλά και θεσμικών περιορισμών. Παραπάνω, η αστική ενεργειακή αυτονομία δεν περιορίζεται πλέον στην θεωρητική επιδίωξη, αλλά αποτελεί μια ρεαλιστική προοπτική βασισμένη στην τεχνολογική καινοτομία και οικονομική βιωσιμότητα.

6. Βιβλιογραφία

- Alaa, M., Zaidan, A., Talal, M., & Kiah, M. L. (χ.χ.). A review of smart home applications based on Internet of Things. *Journal of Network and Computer Applications*.
- Alahakoon, D., & Yu, X. (2016). *Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey*.
- Biswas, S., Bhuyan, M., & Hasan, K. (2023). *IoT-based automated solar panel cleaning and monitoring technique*.
- Bornholm is a green energy island. (n.d.). Retrieved from <https://bornholm.info/en/bornholm-is-a-green-energy-island>
- Boyle, G. (2003). *Renewable Energy*. Oxford OUP.
- Boyle, G., Everett, B., & Ramage, J. (2004). *Energy Systems and Sustainability*. Oxford OUP.
- Buschmann, P., & Leidreiter, A. (2015). *Criteria for a Sustainable Transformation towards "100% Renewable Energy": Starting an International Dialogue*.
- Callum, R., & Bradley, F. (2018). *Energy Autonomy in sustainable communities - A review of key issues*.
- CHAUREY, A., & DEAMB, S. (1992). *BATTERY STORAGE FOR PV POWER SYSTEMS: AN OVERVIEW*.
- Ciocia, A., Amato, A., Di Leo, P., Fichera, S., Malgaroli, G., Spertino, F., & Tzanova, S. (2021). *Self-Consumption and self-sufficiency in photovoltaic systems: Effect of grid limitation and storage installation*.
- Dericioglu, C., Yirik, E., Unal, E., Cuma, M., Onur, U., & Tumay, M. (2018). *A review of charging technologies for commercial electric vehicles*.
- Doukas, H. (2022). *Energy Transitions, Intelligence, and Big Data: Towards a Prosumer Concept with Energy Autonomy*.
- Droege, P. (2018). *100% Renewable: Energy Autonomy in action*.
- Elijah, O., Rahman, A., Orikumhi, C., & Leow, Y. (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics: Benefits and Challenges.
- Energy Island Bornholm*. (n.d.). Retrieved from <https://www.energiobornholm.dk/en>
- Fregonara, E., & Ferrando, D. G. (2023). *The discount rate in the evaluation of project economic-environmental sustainability*.
- Ghafoor, M., Amin, A., & Khalid, M. (2024). *Design of IoT-based solar array cleaning system with enhanced performance and efficiency*.
- Giehl, J., Hentschel, D., Ciprian, L., & Weibezahn, J. (2025). Fueling the future: Optimizing Power-to-X production in renewable energy hubs through flexible operating units.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.
- Gungor, V., Sahin, D., & Kocak, T. (2013). *Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards*. IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- Hansen, A. S., Manniche, J., & Larsen, K. T. (2024, December). Navigating sustainable transition processes at the local level: The case of Energy Island Bornholm. *Environmental Innovation and Societal Transitions*.
- Hassan, A., Cipcigan, L., & Jenkins, N. (2017). *Optimal battery storage operation for PV systems with tariff incentives*.
- IEA. (2018). *Energy Efficiency*.
- Jindal, F., & Jamar, R. (2018). *Future challenges of internet of things*.
- Kabalci, E. (2016). *A survey on smart metering and smart grid communication*.

- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (2007). *Renewable Energy - Technology, Economics and Environment*.
- Krishan, O., & Suhag, S. (2019). An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *International Journal of Energy Research*, pp. 6,171-6,210.
- Ktenidis, P., & Boulogiorgou, D. (2020, February). TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition. *ScienceDirect*, pp. 397-403.
- Kumar, R., & Smys, S. (2018). *A novel report on architecture protocols and applications in Internet of Things (IoT)*.
- Lytras, M., & Serban, A. (2020). Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe - Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities. *IEEE*.
- M. Díez-Mediavilla, M.I. Dieste-Velasco, & M.C. Rodr. (2014). *Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system*.
- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review.
- Malkina-Pykh, I., & Pykh, Y. (2002). *Sustainable Energy: Resources, Technology and Planning*.
- Menniti, D., Pinnarelli, A., Sorrentino, N., Vizza, P., Barone, G., Brusco, G., . . . Polizzi, G. (2022). Enabling Technologies for Energy Communities: Some Experimental Use Cases.
- Morrish, J., Arnott, M., & Hatton, M. (2023, May). Global IoT Forecast Report. *Transforma Insights*.
- Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., & Hunt, J. (2020). Internet of Things (IoT) and the Energy Sector.
- Notton, G., Nivet, M.-L., Zafirakis, D., Motte, F., Voyant, C., & Fouilloy, A. (2017). Tilos, the first autonomous renewable green islane in the Mediterranean: A Horizon 2020 project.
- Ray, P. (2018). *A survey on Internet of Things architectures*. Kind Saud University Computer and Information Sciences.
- Shafiq, M. S. (2020). *SMART SOLAR CARPORT SYSTEM*.
- Shubhangi, K., & Mukund, K. (2018). Energy Autonomy in IoT Technologies.
- Siano, P. (2014). *Demand response and smart grids*.
- Terras, J. M., Simão, T., Rua, D., Coelho, F., Gouveia, C., Bessa, R., . . . Glennung, K. (2020). Fostering the relation and the connectivity between smart homes and grids—InterConnect project. *CIREN CP767*, pp. 761-764.
- Tosatto, A., Martinez Beseler, X., Østergaard, J., Pinson, P., & Chtzivasileiadis, S. (2022). North Sea Energy Islands: Impact on national markets and grids. p. 127.
- Tsala, S. (2023). *Institutional & regulatory framework for island energy autonomy: The project of Tilos*. Master thesis, University of Piraeus, Department of International & European Studies, Piraeus. Retrieved from https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/15287/Tsala_20037.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- U., C. (2023). *Battery energy storage systems in different countries for arbitrage services*.
- Umer, F., Aslam, M. S., Rabbani, M. S., & Hanif, M. J. (2019). *Design and optimization of solar carport canopies for maximum power generation and efficiency at Bahawalpur*.
- Van de Bergh, K., & Delarue, E. (2015, June). Cycling of conventional power plants: Technical limits and actual costs. *ScienceDirect*, pp. 70-77.
- Wuppertal Institut. (2018). Defining Energy Efficiency.
- Xu, L. D., & He, W. (2014). Internet of Things in Industries: "A Survey".
- Zafirakis, D., & Kaldellis, J. (2020). Tilos, an autonomous Greek island thanks to a PV/Wind/Zebra battery plant and a smart Energy Management System. pp. 1-4.
- Zafirakis, D., Chalvatzis, K., Baiocchi, G., & Daskalakis, G. (2016). The value of arbitrage for energy storage: Evidence from European electricity markets. pp. 971-986.

- Zainab, H., Hesham, A., & Mahmoud, M. (2015). Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges, and Recent Research Directions.
- Zhou, K., & Fu, C. (2016). *Big data driven smart energy management: From big data to big insights. Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- Ασημακόπουλος, Δ., Αραμπατζής, Γ., Αγγελής - Δημάκης, Α., Καρταλίδης, Α., & Τσιλιγκρίδης, Γ. (2015). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Δυναμικό και Τεχνολογίες.
- Βασιλείου, Ι. (2017). *Ευρωπαϊκή Ένωση & Ενέργεια: Η Πορεία προς το 2050, Σκέψεις, Ιδέες, και Συμπεράσματα.*
- Γελεγένης, Ι., & Αξαόπουλος, Π. (2005). Πηγές Ενέργειας: Συμβατικές και Ανανεώσιμες.
- Γιαλελή, Α. (2023). Ο ρόλος της καινοτομίας στον κλάδο της ενέργειας.
- Δρεπανιώτης. (2019). Ενεργειακή Αυτονομία.
- Ραχιώτης. (2012). Το Θεσμικό Πλαίσιο των ΑΠΕ στην Ελλάδα - Ορόλος του ρυθμιστή. Στο *Ημερίδα Ινστιτούτου Θερβάντες - Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Ισπανία.
- Τσούτσος, Θ., & Κανάκης, Ι. (2016). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Τεχνολογίες & Περιβάλλον.

Σύνδεσμοι

Fortune Business Insights. (n.d.). *U.S. Commercial Solar Carport Market*. Retrieved from <https://www.fortunebusinessinsights.com/u-s-commercial-solar-carport-market-109096>

<https://www.renel.gr/solar-carport-solutions/>

<https://alumilsolar.com/etaireia/poioi-eimaste/>

<https://www.ecoflow.com/us/blog/what-is-solar-carport>

<https://wanhos.com/understanding-solar-carport-cost-a-comprehensive-guide-for-commercial-applications/>

<https://shifftosolar.nl/en/blog/how-much-does-a-solar-carport-cost/>

metalbuildingconnect.com/2025/03/08/smart-carports-integrating-iot-for-efficiency-and-maintenance/

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας εξοπλισμού

	Είδος εξοπλισμού	Μοντέλο	Τιμή	Πηγή
Βάση στήριξης		H2700 MAX Duopitch	6.500,00 €	https://alumilsolar.com/proionta/h2700-solar-carport/
Ηλιακά πάνελ		JA Solar 550Wp	123,69 €	https://www.skroutz.gr/s/62363369/ja-solar-fotovoltaike-panel-550w-2278x1134x30mm.html?google_shopping=true&srsId=AfmBOorW88ExyByfzh3NkHaa51nj4VUYZLMIp6e7ZT36SrsgwltqzrWmI8E

Μετατροπέας		Huawei SUN2000	6.669,00 €	https://www.europe-solarstore.com/huawei-sun2000-185-ktl-h1.html
Σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων		ABB Terra 22 kW	1.444,70 €	ABB Terra AC 22kW Τριφασικός Type 2 BestPrice.gr
Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (σενάριο 2)		Huawei LUNA2000-200KWH-2H1	160.618,29 €	https://www.senetic.gr/product/LUNA2000-200KWH-2H1
Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (σενάριο 3)		Tesla Megapack 2 XL	1.800.000,00 €	https://www.tesla.com/megapack/design
Occupancy Sensor		Milesight WS202 (LoRa IoT Sensor)	58,00 €	https://nsys.gr/en/product/milesight-ws202-iot-lorawan-cowork-pir-light-sensor/

Revenue grade energy meter		Eastron SDM230-LoRa	89,90 €	https://www.eastronroup.com/product/iot-solutions/singlenphase-lorawan-multifunction-energy-meter-for-iot-solutions.html
String/module sensors		SDM630MCT-LoRaWAN-MID	139,00 €	https://www.eastroneurope.com/products/view/sdm630mct-lorawan-mid
Inverter/battery sensor		NKE Watteco Battery Charge/Usage Sensor	193,00 €	https://www.iotmining.eu/en/lorawan-sensor/144-lorawan-battery-charge-and-usage-monitoring-sensor-nke-watteco.html

Μετεωρολογικός σταθμός		ELEVEN PARAMETER WEATHER STATION	3.387,00 €	https://www.iotsystems.lv/en/shop/sensors-lorawan-6/dl-atm41-001-eleven-parameter-weather-station-for-lorawan-166#attribute_values=1
LoRaWAN Gateway		LoRaWAN Gateway with LTE	289,00 €	https://www.decentlab.com/products/total-solar-radiation-sensor-for-lorawan