



Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας (ΣΘΕΤ)
Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση στα Πληροφοριακά Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη και βελτιστοποίηση μικροδικτύου σταθμού φόρτισης
ηλεκτρικών οχημάτων**

Κανδάκης Κωνσταντίνος (Α.Μ.166316)

Επιβλέπων καθηγητής: Καψάλης Βασίλειος

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής: Καστανιώτης Δημήτρης

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Στοιχεία Διπλωματικής Εργασίας

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας: Ανάπτυξη και βελτιστοποίηση μικροδικτύου σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας (στην Αγγλική): Design and optimization of a microgrid-based electric vehicle charging station

Γενική Κατηγορία:

- Ενεργειακή διαχείριση κατανεμημένων ενεργειακών πόρων
- Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Θεματικό Πεδίο:

- Έξυπνα δίκτυα
- Μικροδίκτυα
- Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Σημείωση:

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Περίληψη

Με την παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η σχεδίαση, υλοποίηση και αξιολόγηση ενός ευφυούς συστήματος διαχείρισης μικροδικτύου για σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Το προτεινόμενο σύστημα ενσωματώνει υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSEs), φωτοβολταϊκό σύστημα (PV), σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS) και σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο, με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση και τον συντονισμένο έλεγχο των επιμέρους στοιχείων.

Η αρχιτεκτονική της τελικής λύσης βασίζεται σε σαφή διαχωρισμό ρόλων μεταξύ του επιπέδου ενεργειακής βελτιστοποίησης, του επιπέδου διασύνδεσης και ελέγχου και των επιμέρους ενεργειακών πόρων. Το FlexMeasures λειτουργεί ως το κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης (EMS), αναλαμβάνοντας τη μοντελοποίηση των ενεργειακών πόρων, τη διαχείριση μετρήσεων, προβλέψεων και τιμών ενέργειας, καθώς και τον υπολογισμό των βέλτιστων προγραμμάτων λειτουργίας.

Η επικοινωνία του EMS με τα επιμέρους υποσυστήματα πραγματοποιείται μέσω του Fledge, το οποίο λειτουργεί ως ενδιάμεση πλατφόρμα συλλογής, μεταφοράς και διαχείρισης δεδομένων. Στο Fledge έχουν αναπτυχθεί προσαρμοσμένα plugins για τη διασύνδεση με το FlexMeasures, καθώς και για την επικοινωνία με τους σταθμούς φόρτισης μέσω του πρωτοκόλλου OCPP 1.6J. Οι προσομοιωτές των ηλεκτρικών οχημάτων και των EVSE χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της λειτουργίας των φορτιστών και την ανταλλαγή δεδομένων και εντολών με το σύστημα.

Παράλληλα, το Fledge χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση με τα ενεργειακά υποσυστήματα του μικροδικτύου, όπως το φωτοβολταϊκό σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (BESS), επιτρέποντας τη συλλογή τηλεμετρίας και τη μεταφορά των αντίστοιχων εντολών λειτουργίας. Το Flex Dispatcher plugin λειτουργεί ως μηχανισμός συντονισμού της εκτέλεσης των βελτιστοποιημένων προγραμμάτων, μετατρέποντας τα schedules που υπολογίζονται από το FlexMeasures σε εντολές λειτουργίας προς τα επιμέρους υποσυστήματα.

Με τον τρόπο αυτό, το FlexMeasures αναλαμβάνει τη λήψη των ενεργειακών αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση, το Fledge core τη διασύνδεση και ανταλλαγή δεδομένων με τα ενεργειακά στοιχεία, ενώ Flex Dispatcher plugin του Fledge τον συντονισμό και την εφαρμογή των προγραμματισμένων εντολών. Η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους

στοιχείων πραγματοποιείται μέσω REST APIs και δεδομένων σε μορφή JSON, ενώ για την επικοινωνία με τους σταθμούς φόρτισης χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο OCPP 1.6J.

Η λειτουργία του συστήματος αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων, χωρίς τη χρήση φυσικού εξοπλισμού, με τη χρήση προσομοιωτών και μοντελοποιημένων ενεργειακών δεδομένων για τα EVSEs, τη φωτοβολταϊκή παραγωγή και το σύστημα αποθήκευσης. Η βελτιστοποίηση λαμβάνει υπόψη προβλέψεις της φωτοβολταϊκής παραγωγής και δυναμικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται στις τιμές της αγοράς επόμενης ημέρας (Day-Ahead market).

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης εξετάζονται διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, με έμφαση στη συντονισμένη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, στην αξιοποίηση της τοπικά παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας και στη λειτουργία του BESS.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηρίξει τη συντονισμένη λειτουργία των επιμέρους ενεργειακών πόρων ενός σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η αξιοποίηση των προβλέψεων φωτοβολταϊκής παραγωγής, των δυναμικών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και του συστήματος αποθήκευσης επιτρέπει την προσαρμογή της λειτουργίας των EVSEs και του BESS στις εκάστοτε ενεργειακές συνθήκες, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοποίησης της τοπικής παραγωγής του σταθμού.

Abstract

English Title: Design and optimization of a microgrid-based electric vehicle charging station

Author Name: Kandakis Konstantinos

This thesis investigates the design, implementation, and evaluation of an intelligent energy management system for an electric vehicle (EV) charging station. The proposed system integrates electric vehicle supply equipment (EVSEs), a photovoltaic (PV) generation system, a battery energy storage system (BESS), and a connection to the public power grid, aiming at the coordinated management and optimization of the available energy resources.

The proposed architecture is based on a clear separation of roles and relies on open-source technologies. FlexMeasures operates as the central Energy Management System (EMS), responsible for modeling the microgrid, managing measurements, forecasts, and electricity prices, and calculating optimized operating schedules. Fledge provides the communication and data integration layer between the EMS and the energy assets, while custom plugins enable the exchange of data and commands with the different subsystems. The Flex Dispatcher plugin in Fledge coordinates the execution of the optimized schedules and translates them into control commands for the EVSEs and the BESS. Communication between the system components is implemented through REST APIs and JSON-based data exchange, while OCPP 1.6J is used for communication with the EV charging infrastructure.

The system is evaluated through simulation, without the use of physical hardware, using dedicated simulators for EV charging stations, photovoltaic generation, and battery energy storage. The optimization process incorporates photovoltaic generation forecasts and dynamic electricity prices based on Day-Ahead market data. The PV forecasts are automatically obtained through an external weather-data service, while electricity market prices are retrieved and processed automatically for use by the energy management system. Different operating conditions are examined to evaluate the ability of the proposed architecture to coordinate EV charging, photovoltaic generation, and energy storage.

The simulation results demonstrate that the proposed system can effectively coordinate the operation of the EV charging station and its energy resources. The integration of PV generation, BESS, dynamic electricity prices, and optimized EV charging schedules

improves the utilization of locally generated renewable energy and reduces the energy cost of the charging station.

Keywords: Electric Vehicle Charging Station, Microgrid, Energy Management System, FlexMeasures, Fledge, Photovoltaic Generation, Battery Energy Storage System, EV Charging Optimization, Dynamic Electricity Pricing.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Βασίλη Καψάλη, για την καθοδήγηση, την επιστημονική υποστήριξη και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική τόσο στη διαμόρφωση του αντικειμένου της εργασίας όσο και στην ολοκλήρωσή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συν-επιβλέποντα καθηγητή κ. Καστανιώτη Δημήτρη για τις χρήσιμες συμβουλές, τις τεχνικές κατευθύνσεις και το ενδιαφέρον που επέδειξε σε κρίσιμα στάδια της υλοποίησης.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για τη διαρκή στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η συμβολή τους υπήρξε ανεκτίμητη.

Περιεχόμενα

Στοιχεία Διπλωματικής Εργασίας	2
Περίληψη.....	3
Abstract	5
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα.....	8
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Σκοπός και Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας.....	14
1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα	15
1.3 Μεθοδολογία της Έρευνας και Προσέγγιση Αξιολόγησης.....	16
1.4 Διάρθρωση της Εργασίας.....	18
2. ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	20
2.1 Ανάλυση Απαιτήσεων Συστήματος	20
2.1.1 Λειτουργικές Απαιτήσεις	21
2.1.2 Μη Λειτουργικές Απαιτήσεις.....	22
2.2 Επιλογή Τεχνολογιών και Πλατφορμών	22
2.3 Αρχιτεκτονική Σχεδίασης και Βασικές Σχεδιαστικές Αρχές	25
2.4 Περιγραφή των Υποσυστημάτων.....	27
2.4.1 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (FlexMeasures).....	28
2.4.2 Επίπεδο Διασύνδεσης (Fledge Middleware).....	28
2.4.3 Custom Plugins	28
2.4.4 Υποδομές Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	29
2.4.5 Φωτοβολταϊκό Σύστημα	29
2.4.6 Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	29
2.4.7 Δημόσιο Ηλεκτρικό Δίκτυο και Υπηρεσίες Προβλέψεων.....	30
2.4.8 Συγκεντρωτικός Πίνακας Υποσυστημάτων.....	30
2.5 Ροή Δεδομένων και Λειτουργία της Προτεινόμενης Αρχιτεκτονικής.....	31
2.6 Σύνοψη Κεφαλαίου	34
3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ	35
3.1 Περιβάλλον Ανάπτυξης	35
3.2 Παραμετροποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (FlexMeasures)	38
3.2.1 Μοντελοποίηση των Ενεργειακών Πόρων (Assets)	39
3.2.2 Μοντελοποίηση των Αισθητήρων (Sensors)	41
3.2.3 Ενσωμάτωση Εξωτερικών Δεδομένων μέσω API.....	43
3.3 Ανάπτυξη Μηχανισμού Συλλογής Τηλεμετρίας (North Plugin)	46
3.3.1 Custom Flex NorthPlugin	48
3.3.2 REST API και Μορφότυπο Ανταλλαγής Δεδομένων	51
3.3.3 Μορφή Εντολών Ελέγχου και Επικοινωνία με τα Υποσυστήματα	53
3.4 Ανάπτυξη Μηχανισμού Ελέγχου Σεναρίων (Scenario Controller).....	55
3.5 Ανάπτυξη Προσομοιωμένων Ενεργειακών Υποσυστημάτων	57
3.5.1 Προσομοιωμένο Υποσύστημα Σταθμού Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	58

3.5.2	Προσομοιωμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα και Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας.....	60
3.6	Ολοκλήρωση του Closed-Loop Συστήματος.....	63
3.7	Σύνοψη Κεφαλαίου 3	65
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	66
4.1	Περιγραφή του Περιβάλλοντος Πειραματικής Αξιολόγησης	67
4.2	Παραδοχές και Παράμετροι Προσομοίωσης	69
4.3	Σενάριο Αξιολόγησης – Συντονισμένη Φόρτιση Δύο Ηλεκτρικών Οχημάτων ..	70
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	74
5.1	Επαλήθευση της Συλλογής Τηλεμετρίας	74
5.2	Αποτελέσματα Ενεργειακής Βελτιστοποίησης.....	76
5.3	Εφαρμογή των Προγραμμάτων Λειτουργίας στα Υποσυστήματα	79
5.4	Επαλήθευση της Closed-Loop Λειτουργίας	80
5.5	Συζήτηση και Αποτίμηση της Προτεινόμενης Πλατφόρμας	81
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	83
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Κώδικας και συνοδευτικό υλικό	85
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 - Βασικές τεχνολογίες και ο ρόλος τους στην προτεινόμενη πλατφόρμα	24
Εικόνα 2 - Λογική αρχιτεκτονική της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης	26
Εικόνα 3 – Telemetry Data Flow της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής	32
Εικόνα 4 - Control Flow της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής	33
Εικόνα 5 – Διάγραμμα Υλοποίησης.....	37
Εικόνα 6 – Πόροι FlexMeasures (assets)	38
Εικόνα 7 – Πόροι FlexMeasures EV Charging Station (assets)	39
Εικόνα 8 – Αισθητήρες συστήματος FlexMeasures (sensors)	41
Εικόνα 9 - Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του plugin FlexMeasures-weather και καταχώρισή της στον αισθητήρα irradiance του FlexMeasures	44
Εικόνα 10 - Πρόβλεψη φωτοβολταϊκής ισχύος που προκύπτει από την πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας	44
Εικόνα 11 - Αυτόματη ενημέρωση του αισθητήρα grid_price στο FlexMeasures με τις υπολογισμένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας	45
Εικόνα 12 – Τηλεμετρία Fledge Custom North Plugin	47
Εικόνα 13 – Πίνακας ρυθμίσεων Custom Flex NorthPlugin	48
Εικόνα 14 – Στιγμιότυπο κώδικα Custom Flex NorthPlugin.....	49
Εικόνα 15 – Παράθυρο καταγραφής συμβάντων πλατφόρμας Fledge.....	50
Εικόνα 16 – Παράδειγμα μηνύματος τηλεμετρίας από τα PV-BESS simulated συστήματα προς το Fledge core.....	52
Εικόνα 17 – Παράδειγμα μηνύματος τηλεμετρίας από το Fledge core προς το FlexMeasures	53
Εικόνα 18 – Κώδικας δημιουργίας και αποστολής JSON payload τηλεμετρίας μέσω HTTP POST	54
Εικόνα 19 – Κώδικας δημιουργίας και αποστολής JSON payload τηλεμετρίας μέσω HTTP POST	55
Εικόνα 20 – Περιβάλλον εφαρμογής scenario controller	56
Εικόνα 21 - Δημιουργία OCPP μηνύματος για αποστολή Charging Profile (OCPP Server->EVSEs).....	59
Εικόνα 22 - Δημιουργία OCPP μηνύματος για αποστολή Status (EVSEs->OCPP Server)	59
Εικόνα 23 – Μέρος του κώδικα που ανανεώνει τις τιμές του BESS	62
Εικόνα 24 - Πειραματικό Σενάριο, Λειτουργική ροή του μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης της προτεινόμενης πλατφόρμας.	66
Εικόνα 25 - Ενημέρωση των χρονικών σειρών τηλεμετρίας στο FlexMeasures κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου.	75
Εικόνα 26 – Αποτέλεσμα λειτουργίας του συστήματος για 5 συνεχόμενες ημέρες	77
Εικόνα 27 - Βελτιστοποιημένο πρόγραμμα λειτουργίας (Optimized Schedule) που παρήχθη από το FlexMeasures κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου.	78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 – Λίστα Τεχνολογιών / Ρόλων.....	24
Πίνακας 2 - Ερμηνεία της αρχιτεκτονικής.....	26
Πίνακας 3 - Υποσυστήματα της προτεινόμενης πλατφόρμας	30
Πίνακας 4 - Περιβάλλον Ανάπτυξης.....	37
Πίνακας 5 - Ενεργειακοί πόροι που μοντελοποιήθηκαν στο FlexMeasures.....	40
Πίνακας 6 - Βασικοί αισθητήρες του συστήματος	42
Πίνακας 7 - Μεταβλητές που προσομοιώνονται.....	61
Πίνακας 8 - Στάδια λειτουργίας του closed-loop μηχανισμού.....	64
Πίνακας 9 - Βασικά στοιχεία του περιβάλλοντος αξιολόγησης	68
Πίνακας 10 - Παράμετροι προσομοίωσης	70
Πίνακας 11 – Στόχοι του Σεναρίου	72
Πίνακας 13 - Επαλήθευση συλλογής τηλεμετρίας.....	76
Πίνακας 14 - Έλεγχοι επαλήθευσης.....	76
Πίνακας 15 - Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	78
Πίνακας 16 - Περιεχόμενο του παραγόμενου schedule	78
Πίνακας 17 - Επαλήθευση Closed-Loop.....	81

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ακρωνύμιο	Περιγραφή (Αγγλικά)	Απόδοση στα Ελληνικά
API	Application Programming Interface	Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών
BESS	Battery Energy Storage System	Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας με Συσσωρευτές
CSMS	Charging Station Management System	Σύστημα Διαχείρισης Σταθμών Φόρτισης
DER	Distributed Energy Resources	Κατακεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι
Docker	Docker Container Platform	Πλατφόρμα Εικονικοποίησης Εφαρμογών (Containers)
EMS	Energy Management System	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας
EV	Electric Vehicle	Ηλεκτρικό Όχημα
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment	Σταθμός Φόρτισης Ηλεκτρικού Οχήματος
JSON	JavaScript Object Notation	Μορφότυπος Ανταλλαγής Δεδομένων JSON
OCPP	Open Charge Point Protocol	Ανοικτό Πρωτόκολλο Επικοινωνίας Σταθμών Φόρτισης
PV	Photovoltaic	Φωτοβολταϊκό Σύστημα
REST	Representational State Transfer	Αρχιτεκτονική Υπηρεσιών REST
SoC	State of Charge	Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) δημιουργεί νέες απαιτήσεις για τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σταθμοί φόρτισης εξελίσσονται από απλά σημεία κατανάλωσης σε ενεργούς ενεργειακούς κόμβους, οι οποίοι αλληλεπιδρούν τόσο με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο όσο και με τοπικούς ενεργειακούς πόρους, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS).

Η ανεξέλεγκτη φόρτιση πολλών οχημάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αιχμές ισχύος, αυξημένο λειτουργικό κόστος και μεγαλύτερη επιβάρυνση του ηλεκτρικού δικτύου. Παράλληλα, η αυξανόμενη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εισάγει επιπλέον αβεβαιότητα, καθώς η διαθέσιμη παραγωγή εξαρτάται από μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας στους σταθμούς φόρτισης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα τόσο για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος όσο και για τη μείωση του ενεργειακού κόστους και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Στο πλαίσιο αυτό, τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) αναλαμβάνουν τον συντονισμό των επιμέρους ενεργειακών πόρων, αξιοποιώντας δεδομένα πραγματικού χρόνου, προβλέψεις παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργικούς περιορισμούς των διαθέσιμων υποσυστημάτων. Μέσω κατάλληλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, τα EMS μπορούν να υπολογίζουν δυναμικά προγράμματα λειτουργίας, επιτυγχάνοντας εξισορρόπηση μεταξύ ενεργειακού κόστους, αξιοποίησης της παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας και ικανοποίησης των απαιτήσεων φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων απαιτεί τη συνεργασία πολλαπλών ετερογενών τεχνολογιών, όπως συστήματα ενεργειακής διαχείρισης, πλατφόρμες συλλογής τηλεμετρίας, πρωτόκολλα επικοινωνίας με σταθμούς φόρτισης και μηχανισμούς ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Η διασύνδεση αυτών των τεχνολογιών σε μία ενιαία πλατφόρμα αποτελεί σημαντική τεχνική πρόκληση, ιδιαίτερα όταν απαιτείται η πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας διαχείρισης ενέργειας για σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία ενσωματώνει φωτοβολταϊκή παραγωγή, σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και υποδομές φόρτισης EV. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται σε τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού και υλοποιεί έναν πλήρη μηχανισμό closed-loop ενεργειακής διαχείρισης, όπου η τηλεμετρία των επιμέρους ενεργειακών πόρων συλλέγεται, επεξεργάζεται και αξιοποιείται για την παραγωγή βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας, τα οποία εφαρμόζονται αυτόματα στις προσομοιωμένες συσκευές μέσω κατάλληλων διεπαφών επικοινωνίας.

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης πραγματοποιείται μέσω ενός περιβάλλοντος προσομοίωσης που αναπαριστά ένα ρεαλιστικό μικροδίκτυο σταθμού φόρτισης. Στο περιβάλλον αυτό προσομοιώνονται οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η φωτοβολταϊκή παραγωγή, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και η αλληλεπίδρασή τους με το κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, επιτρέποντας την πλήρη επαλήθευση της λειτουργίας του συστήματος και της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ όλων των υποσυστημάτων.σκοπιά.

1.1 Σκοπός και Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας διαχείρισης ενέργειας (EMS) για ένα μικροδίκτυο σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η προτεινόμενη πλατφόρμα συνδυάζει υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE), φωτοβολταϊκό σύστημα (PV), σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS) και σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση των διαθέσιμων πόρων.

Η εργασία βασίζεται στην αξιοποίηση τεχνολογιών ανοικτού λογισμικού και στην ανάπτυξη μηχανισμών διασύνδεσης μεταξύ ετερογενών υποσυστημάτων, ώστε να επιτυγχάνεται η συνεχής ανταλλαγή δεδομένων, η εκτέλεση διαδικασιών βελτιστοποίησης και η αυτόματη εφαρμογή των παραγόμενων αποφάσεων ελέγχου. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιείται το FlexMeasures ως κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, ενώ αναπτύσσονται κατάλληλοι μηχανισμοί middleware και προσομοίωσης που επιτρέπουν την πλήρη λειτουργία του συστήματος σε περιβάλλον δοκιμών.

Ειδικότεροι στόχοι της διπλωματικής εργασίας είναι:

- η σχεδίαση μιας επεκτάσιμης αρχιτεκτονικής μικροδικτύου βασισμένης σε τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού,
- η παραμετροποίηση του FlexMeasures για τη μοντελοποίηση του υπό μελέτη μικροδικτύου,
- η ανάπτυξη μηχανισμών συλλογής τηλεμετρίας και ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων,
- η ανάπτυξη προσομοιωτών για τους σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, το φωτοβολταϊκό σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας,
- η ανάπτυξη custom plugins σε Python για τη διασύνδεση του middleware με το EMS και την ανταλλαγή σημάτων ελέγχου,
- η υλοποίηση ενός πλήρους μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης, μέσω του οποίου η τηλεμετρία των ενεργειακών πόρων οδηγεί στην παραγωγή βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας και στην αυτόματη εφαρμογή τους στα προσομοιωμένα υποσυστήματα,
- η αξιολόγηση της λειτουργίας της προτεινόμενης πλατφόρμας μέσω ρεαλιστικών σεναρίων προσομοίωσης, με χρήση δύο σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, φωτοβολταϊκής παραγωγής και συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

Η επιτυχής ολοκλήρωση των παραπάνω στόχων επιτρέπει την επαλήθευση της λειτουργικότητας μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης, η οποία είναι σε θέση να συλλέγει δεδομένα από πολλαπλές πηγές, να εκτελεί διαδικασίες βελτιστοποίησης και να εφαρμόζει δυναμικά τις παραγόμενες αποφάσεις ελέγχου, προσομοιώνοντας τη λειτουργία ενός πραγματικού έξυπνου μικροδικτύου.

1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκει να διερευνήσει κατά πόσο μία ολοκληρωμένη πλατφόρμα ενεργειακής διαχείρισης μπορεί να υποστηρίξει την αποδοτική λειτουργία ενός μικροδικτύου σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, συνδυάζοντας τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού, μηχανισμούς επικοινωνίας και αλγορίθμους βελτιστοποίησης.

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία επιχειρεί να απαντήσει στα ακόλουθα **Ερευνητικά Ερωτήματα**:

ΕΕ1. Είναι δυνατή η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης και επεκτάσιμης αρχιτεκτονικής, βασισμένης αποκλειστικά σε τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού, η οποία να υποστηρίζει τη

συνεργασία ενός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) με υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, φωτοβολταϊκά συστήματα και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας;

ΕΕ2. Μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, εξασφαλίζοντας τη συνεχή ροή τηλεμετρίας και την έγκαιρη αποστολή σημάτων ελέγχου προς τις ενεργειακές διατάξεις του μικροδικτύου;

ΕΕ3. Είναι δυνατή η υλοποίηση ενός πλήρως αυτοματοποιημένου μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης, στον οποίο οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου αξιοποιούνται για την παραγωγή και εφαρμογή βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας;

ΕΕ4. Πώς επηρεάζει η αξιοποίηση προβλέψεων φωτοβολταϊκής παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας κατά τη δημιουργία προγραμμάτων φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης;

ΕΕ5. Κατά πόσο η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να αξιολογηθεί επιτυχώς μέσω ενός περιβάλλοντος προσομοίωσης, αναπαριστώντας ρεαλιστικά τη λειτουργία ενός σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με ενσωματωμένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και σύστημα αποθήκευσης;

Η απάντηση στα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού και της υλοποίησης της προτεινόμενης πλατφόρμας, της ανάπτυξης των απαιτούμενων μηχανισμών διασύνδεσης και επικοινωνίας, καθώς και της αξιολόγησης της λειτουργίας της μέσω ολοκληρωμένων σεναρίων προσομοίωσης και πειραματικών δοκιμών.

1.3 Μεθοδολογία της Έρευνας και Προσέγγιση Αξιολόγησης

Η ανάπτυξη της προτεινόμενης πλατφόρμας ακολούθησε μία μεθοδολογία σταδιακής σχεδίασης, υλοποίησης, ολοκλήρωσης και αξιολόγησης, με στόχο τη δημιουργία ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος ενεργειακής διαχείρισης για σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η μεθοδολογία αυτή βασίστηκε στην αρχή της σταδιακής ολοκλήρωσης των επιμέρους υποσυστημάτων, επιτρέποντας την ανεξάρτητη ανάπτυξη, τον έλεγχο και την επαλήθευση της λειτουργίας κάθε επιμέρους συνιστώσας πριν από την ενσωμάτωσή της στο συνολικό σύστημα.

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε η μελέτη των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, καθώς και η διερεύνηση διαθέσιμων λύσεων ανοικτού λογισμικού για τη μοντελοποίηση ενεργειακών πόρων, τη συλλογή τηλεμετρίας

και τη διαχείριση υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιλέχθηκαν οι βασικές τεχνολογικές πλατφόρμες που αποτέλεσαν τον πυρήνα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής [1].

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος και καθορίστηκαν οι διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον διαχωρισμό των λειτουργιών του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας, του επιπέδου διασύνδεσης (middleware) και των ενεργειακών πόρων, ώστε να επιτευχθεί μία επεκτάσιμη και ευέλικτη αρχιτεκτονική, ικανή να υποστηρίξει την ενσωμάτωση διαφορετικών συσκευών και τεχνολογιών.

Ακολούθησε η υλοποίηση της πλατφόρμας, η οποία περιλάμβανε την παραμετροποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας, την ανάπτυξη των απαραίτητων μηχανισμών διασύνδεσης και την υλοποίηση προσομοιωμένων ενεργειακών υποσυστημάτων που αναπαριστούν τις βασικές συνιστώσες ενός πραγματικού μικροδικτύου. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν οι απαραίτητοι μηχανισμοί ανταλλαγής τηλεμετρίας και σημάτων ελέγχου, επιτρέποντας την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων.

Η ολοκλήρωση της υλοποίησης πραγματοποιήθηκε μέσω της σταδιακής διασύνδεσης όλων των υποσυστημάτων και της επαλήθευσης της ορθής λειτουργίας των επιμέρους διεπαφών. Αρχικά επαληθεύτηκε η επιτυχής μεταφορά δεδομένων τηλεμετρίας προς το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, στη συνέχεια η εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και τέλος η αυτόματη εφαρμογή των παραγόμενων προγραμμάτων λειτουργίας στα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα, ολοκληρώνοντας έναν πλήρη μηχανισμό closed-loop ενεργειακής διαχείρισης.

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης πραγματοποιείται μέσω ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος προσομοίωσης, το οποίο αναπαριστά ένα μικροδίκτυο αποτελούμενο από δύο σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, φωτοβολταϊκό σύστημα, σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα επιμέρους υποσυστήματα ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την εκτέλεση ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της πλατφόρμας υπό διαφορετικές συνθήκες.

Η αξιολόγηση επικεντρώνεται κυρίως στην επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας της συνολικής αρχιτεκτονικής και του μηχανισμού ολοκλήρωσης των επιμέρους υποσυστημάτων. Εξετάζεται η επιτυχής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ όλων των επιπέδων του συστήματος, η δυνατότητα παραγωγής και εφαρμογής βελτιστοποιημένων

προγραμμάτων λειτουργίας, καθώς και η συνολική αξιοπιστία της προτεινόμενης πλατφόρμας κατά την εκτέλεση ολοκληρωμένων σεναρίων λειτουργίας.

1.4 Διάρθρωση της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζουν σταδιακά το θεωρητικό υπόβαθρο, τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας, η σημασία της ενεργειακής διαχείρισης σε σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ο σκοπός και οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας, τα ερευνητικά ερωτήματα, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη και αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση και ο σχεδιασμός του προτεινόμενου συστήματος. Παρουσιάζονται οι λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις, οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν, η τελική αρχιτεκτονική της λύσης, τα επιμέρους υποσυστήματα και οι διεπαφές επικοινωνίας που υποστηρίζουν τη συνεργασία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση της πλατφόρμας. Παρουσιάζεται η παραμετροποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας, η ανάπτυξη των μηχανισμών διασύνδεσης, η υλοποίηση των προσομοιωμένων ενεργειακών υποσυστημάτων και η ολοκλήρωση του μηχανισμού ανταλλαγής τηλεμετρίας και σημάτων ελέγχου που επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος σε περιβάλλον closed-loop.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία αξιολόγησης της προτεινόμενης λύσης. Περιγράφεται το περιβάλλον δοκιμών, τα σενάρια λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν, οι παραδοχές της προσομοίωσης και οι δείκτες αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Αναλύεται η συμπεριφορά της πλατφόρμας κατά την εκτέλεση των σεναρίων αξιολόγησης, παρουσιάζονται τα παραγόμενα προγράμματα λειτουργίας, τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης και αξιολογείται η συνολική απόδοση του συστήματος.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, αξιολογείται η επίτευξη των στόχων που τέθηκαν κατά την έναρξη της έρευνας και

διατυπώνονται προτάσεις για πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις της προτεινόμενης πλατφόρμας.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση και ο σχεδιασμός της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης για μικροδίκτυο σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Αρχικά αναλύονται οι λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος, οι οποίες προκύπτουν από την ανάγκη συντονισμένης διαχείρισης των ενεργειακών πόρων ενός σύγχρονου σταθμού φόρτισης, όπως οι υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η φωτοβολταϊκή παραγωγή, το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και η σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν για την υλοποίηση της προτεινόμενης λύσης, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα και στη διαμόρφωση μιας αρθρωτής (modular) αρχιτεκτονικής, η οποία επιτρέπει την ανεξάρτητη ανάπτυξη, επέκταση και αντικατάσταση των επιμέρους υποσυστημάτων χωρίς να επηρεάζεται η συνολική λειτουργία της πλατφόρμας.

Τέλος, παρουσιάζεται η τελική αρχιτεκτονική του συστήματος, οι ρόλοι των επιμέρους υποσυστημάτων, οι διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ τους και η συνολική ροή δεδομένων και σημάτων ελέγχου που υποστηρίζει την υλοποίηση ενός πλήρους μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης.

2.1 Ανάλυση Απαιτήσεων Συστήματος

Η ανάπτυξη ενός ευφυούς συστήματος διαχείρισης ενέργειας για μικροδίκτυο σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων προϋποθέτει τη συνεργασία πολλαπλών ενεργειακών πόρων και ετερογενών πληροφοριακών συστημάτων. Σε αντίθεση με ένα συμβατικό πληροφοριακό σύστημα, όπου η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιείται συνήθως μεταξύ ομοειδών εφαρμογών, στην παρούσα εργασία απαιτείται η ολοκλήρωση διαφορετικών ενεργειακών διατάξεων, πρωτοκόλλων επικοινωνίας και μηχανισμών λήψης αποφάσεων σε μία ενιαία πλατφόρμα.

Βασικός στόχος του συστήματος είναι η συλλογή δεδομένων λειτουργίας από όλους τους ενεργειακούς πόρους του μικροδικτύου, η επεξεργασία των δεδομένων αυτών από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) και η παραγωγή βελτιστοποιημένων αποφάσεων ελέγχου, οι οποίες εφαρμόζονται αυτόματα στις αντίστοιχες ενεργειακές διατάξεις.

Με βάση τους στόχους της εργασίας, τις απαιτήσεις του υπό μελέτη μικροδικτύου και τις ιδιαιτερότητες των επιμέρους τεχνολογιών, προέκυψαν οι ακόλουθες λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις.

2.1.1 Λειτουργικές Απαιτήσεις

Η πλατφόρμα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίζει τη συλλογή τηλεμετρίας από όλους τους ενεργειακούς πόρους του μικροδικτύου. Συγκεκριμένα, απαιτείται η λήψη δεδομένων σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος, την κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και τη συνολική ανταλλαγή ισχύος με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο.

Παράλληλα, το σύστημα πρέπει να υποστηρίζει την εισαγωγή εξωτερικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, όπως προβλέψεις φωτοβολταϊκής παραγωγής, τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και λοιπές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία του μικροδικτύου.

Κρίσιμη λειτουργική απαίτηση αποτελεί η δυνατότητα δημιουργίας βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας για τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους. Το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας οφείλει να επεξεργάζεται τα διαθέσιμα δεδομένα και να υπολογίζει κατάλληλα προγράμματα φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς και αντίστοιχες εντολές λειτουργίας για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Επιπλέον, απαιτείται η αυτόματη μεταφορά των παραγόμενων προγραμμάτων λειτουργίας προς τις αντίστοιχες ενεργειακές διατάξεις, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, επιτρέποντας την υλοποίηση ενός πλήρως αυτοματοποιημένου μηχανισμού ενεργειακής διαχείρισης.

Τέλος, το σύστημα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς επανατροφοδότησης (feedback) του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας με τις πραγματικές μετρήσεις λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων, ώστε κάθε νέα διαδικασία βελτιστοποίησης να βασίζεται στην τρέχουσα κατάσταση του μικροδικτύου.

2.1.2 Μη Λειτουργικές Απαιτήσεις

Πέραν των λειτουργικών απαιτήσεων, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν και οι μη λειτουργικές απαιτήσεις, οι οποίες καθορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης πλατφόρμας.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος πρέπει να είναι αρθρωτή (modular), επιτρέποντας την ανεξάρτητη ανάπτυξη και συντήρηση των επιμέρους υποσυστημάτων. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η αντικατάσταση ή επέκταση μεμονωμένων συνιστωσών χωρίς να απαιτείται ανασχεδιασμός της συνολικής πλατφόρμας.

Επιπλέον, το σύστημα πρέπει να είναι επεκτάσιμο (scalable), ώστε να μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό σταθμών φόρτισης, πρόσθετους ενεργειακούς πόρους ή νέες υπηρεσίες ενεργειακής διαχείρισης χωρίς ουσιώδεις αλλαγές στη βασική αρχιτεκτονική.

Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων πρέπει να βασίζεται σε ανοικτά πρότυπα επικοινωνίας και διεπαφές (open standards), διασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών και λογισμικών.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε επίσης στη χρήση τεχνολογιών ανοικτού λογισμικού (Open Source Software), τόσο για λόγους διαφάνειας και δυνατότητας παραμετροποίησης όσο και για τη δυνατότητα αναπαραγωγής της προτεινόμενης λύσης από άλλους ερευνητές ή οργανισμούς.

Τέλος, η προτεινόμενη πλατφόρμα πρέπει να υποστηρίζει αξιόπιστη λειτουργία σε περιβάλλον συνεχούς ανταλλαγής δεδομένων, εξασφαλίζοντας την ορθή αλληλουχία των μηνυμάτων τηλεμετρίας, των διαδικασιών βελτιστοποίησης και της εφαρμογής των παραγόμενων αποφάσεων ελέγχου.

2.2 Επιλογή Τεχνολογιών και Πλατφορμών

Μετά την ανάλυση των απαιτήσεων του συστήματος, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση διαθέσιμων τεχνολογιών και πλατφορμών που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την υλοποίηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Βασικό κριτήριο επιλογής αποτέλεσε η δυνατότητα ανάπτυξης μίας πλήρως λειτουργικής πλατφόρμας βασισμένης σε λογισμικό ανοικτού κώδικα, η οποία να υποστηρίζει την ενεργειακή διαχείριση ενός μικροδικτύου, την επικοινωνία με υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και την εύκολη ενσωμάτωση πρόσθετων ενεργειακών πόρων.

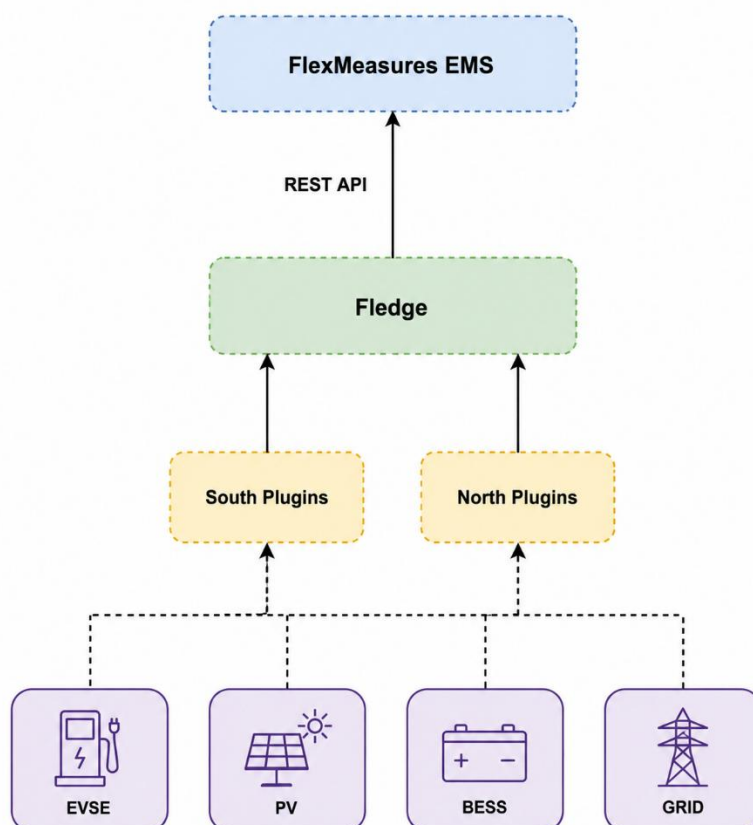
Για την υλοποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας επιλέχθηκε η πλατφόρμα FlexMeasures, η οποία αποτελεί ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα σχεδιασμένο για εφαρμογές ευφυούς ενεργειακής διαχείρισης. Το FlexMeasures παρέχει μηχανισμούς αποθήκευσης χρονικών σειρών, μοντελοποίησης ενεργειακών πόρων, διαχείρισης προβλέψεων και εκτέλεσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης, αποτελώντας τον κεντρικό πυρήνα λήψης αποφάσεων της προτεινόμενης πλατφόρμας [2].

Για τη διασύνδεση των επιμέρους ενεργειακών υποσυστημάτων με το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας επιλέχθηκε η πλατφόρμα Fledge, η οποία λειτουργεί ως επίπεδο middleware μεταξύ των ενεργειακών διατάξεων και του EMS. Η χρήση του Fledge επιτρέπει τη συλλογή τηλεμετρίας, τη μεταφορά δεδομένων από διαφορετικές πηγές και την ανάπτυξη προσαρμοσμένων μηχανισμών επικοινωνίας μέσω επεκτάσιμης αρχιτεκτονικής βασισμένης σε plugins [3].

Η επικοινωνία με τις υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων βασίστηκε στο πρωτόκολλο OCPP 1.6J, ένα ανοικτό πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ σταθμών φόρτισης και συστημάτων κεντρικής διαχείρισης [4]. Η επιλογή του OCPP επιτρέπει τη ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός πραγματικού σταθμού φόρτισης και διασφαλίζει τη συμβατότητα της προτεινόμενης λύσης με σύγχρονες εμπορικές υποδομές.

Η ανάπτυξη των μηχανισμών ολοκλήρωσης πραγματοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία επιλέχθηκε λόγω της εκτεταμένης υποστήριξης βιβλιοθηκών για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης, της δυνατότητας γρήγορης ανάπτυξης λογισμικού και της άμεσης διασύνδεσής της με τις πλατφόρμες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία [5].

Για την απομόνωση των επιμέρους υπηρεσιών και την απλοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης και εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία Docker, επιτρέποντας την ανεξάρτητη εκτέλεση των βασικών υπηρεσιών της πλατφόρμας σε διακριτά containers [6]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση διευκολύνει σημαντικά τόσο τη συντήρηση όσο και τη μελλοντική επέκταση του συστήματος.



Εικόνα 1 - Βασικές τεχνολογίες και ο ρόλος τους στην προτεινόμενη πλατφόρμα

Κατά την πορεία της υλοποίησης διαπιστώθηκε ότι η διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων απαιτούσε λειτουργίες οι οποίες δεν καλύπτονταν πλήρως από τις διαθέσιμες δυνατότητες των επιλεγμένων πλατφορμών. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν εξειδικευμένα λογισμικά στοιχεία σε μορφή custom plugins και προσομοιωμένων ενεργειακών υποσυστημάτων, τα οποία υλοποιούν τη συλλογή τηλεμετρίας, την ανταλλαγή δεδομένων με το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και την εφαρμογή των παραγόμενων αποφάσεων ελέγχου.

Τεχνολογία	Ρόλος
FlexMeasures	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS)
Fledge	Middleware και Data Gateway
Python	Ανάπτυξη custom plugins και simulators
Docker	Containerization των υπηρεσιών
OCPP	Επικοινωνία με EV Chargers
REST API	Διασύνδεση μεταξύ υποσυστημάτων

Πίνακας 1 – Λίστα Τεχνολογιών / Ρόλων

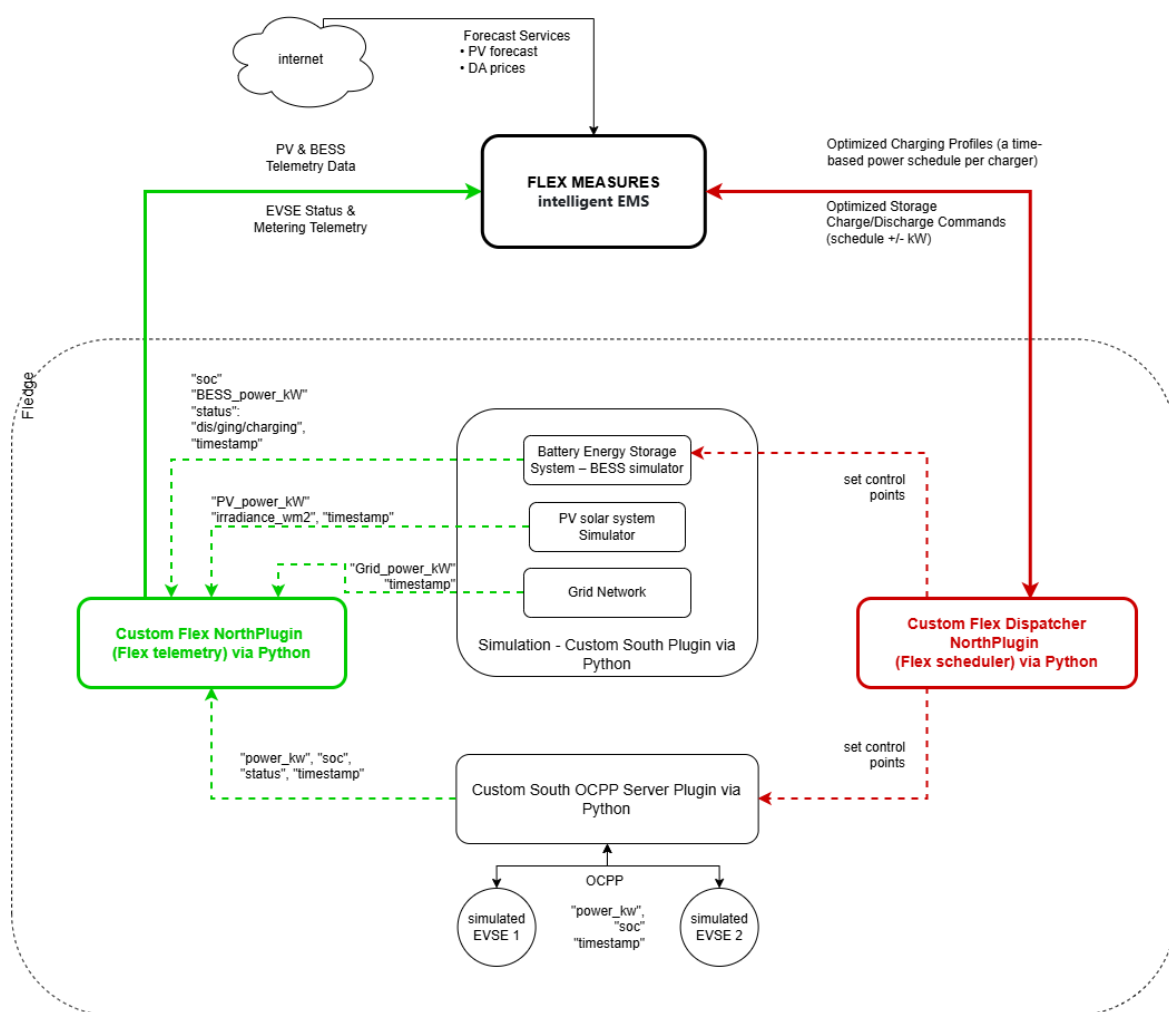
Οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν συνεργάζονται συμπληρωματικά, σχηματίζοντας μία ενιαία πλατφόρμα ενεργειακής διαχείρισης, στην οποία κάθε υποσύστημα αναλαμβάνει έναν σαφώς καθορισμένο ρόλο, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό βαθμό εξάρτησης από τα υπόλοιπα στοιχεία της αρχιτεκτονικής.

2.3 Αρχιτεκτονική Σχεδίασης και Βασικές Σχεδιαστικές Αρχές

Η ανάπτυξη της προτεινόμενης πλατφόρμας βασίστηκε στην υιοθέτηση μιας αρθρωτής (modular) αρχιτεκτονικής, η οποία διαχωρίζει σαφώς τις λειτουργίες συλλογής δεδομένων, ενεργειακής βελτιστοποίησης και εφαρμογής αποφάσεων ελέγχου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέχθηκε ώστε κάθε υποσύστημα να μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, να επεκτείνεται ανεξάρτητα και να αντικαθίσταται χωρίς να επηρεάζεται η συνολική λειτουργία της πλατφόρμας.

Στον πυρήνα της αρχιτεκτονικής βρίσκεται το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS), το οποίο είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων, την αξιοποίηση προβλέψεων παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που οδηγούν στη δημιουργία προγραμμάτων λειτουργίας για τους ενεργειακούς πόρους του μικροδικτύου.

Μεταξύ του EMS και των ενεργειακών διατάξεων παρεμβάλλεται ένα επίπεδο middleware, το οποίο αναλαμβάνει τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Η επιλογή αυτής της ενδιάμεσης βαθμίδας αποσκοπεί στην αποσύζευξη (decoupling) των ενεργειακών πόρων από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, επιτρέποντας την ανεξάρτητη εξέλιξη των δύο επιπέδων και την εύκολη ενσωμάτωση νέων συσκευών ή υπηρεσιών.



Εικόνα 2 - Λογική αρχιτεκτονική της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης

Στοιχείο	Ρόλος
FlexMeasures	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) και εκτέλεση βελτιστοποίησης
Forecast Services	Παροχή προβλέψεων παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας
Flex Telemetry Plugin	Συλλογή και αποστολή τηλεμετρίας προς το EMS
Dispatcher Plugin	Μετατροπή των schedules σε εντολές ελέγχου
EVSE Simulators	Προσομοίωση σταθμών φόρτισης και ανταλλαγή μηνυμάτων OCPP
BESS Simulator	Προσομοίωση λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης
PV Simulator	Προσομοίωση φωτοβολταϊκής παραγωγής
Grid Simulator	Προσομοίωση ανταλλαγής ισχύος με το δίκτυο

Πίνακας 2 - Ερμηνεία της αρχιτεκτονικής

Η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιείται μέσω δύο διακριτών ροών πληροφορίας. Η πρώτη αφορά τη συνεχή αποστολή τηλεμετρίας από τους ενεργειακούς πόρους προς το

Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και περιλαμβάνει μετρήσεις όπως η κατάσταση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, η διαθέσιμη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος, η κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και η ανταλλαγή ισχύος με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η δεύτερη αφορά την αποστολή σημάτων ελέγχου από το EMS προς τα υποσυστήματα, τα οποία προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης και καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας των επιμέρους ενεργειακών διατάξεων.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη δυνατότητα συνεχούς ανατροφοδότησης του συστήματος (feedback). Κάθε εντολή που εφαρμόζεται στους ενεργειακούς πόρους μεταβάλλει την κατάσταση λειτουργίας τους, η οποία καταγράφεται εκ νέου μέσω της τηλεμετρίας και αποστέλλεται στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό υλοποιείται ένας πλήρης μηχανισμός closed-loop ενεργειακής διαχείρισης, όπου κάθε νέα διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται στην πραγματική κατάσταση του μικροδικτύου.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό των επιπέδων συλλογής δεδομένων, λήψης αποφάσεων και εφαρμογής ελέγχου, διασφαλίζοντας υψηλό βαθμό επεκτασιμότητας, ευελιξίας και διαλειτουργικότητας. Παράλληλα, διευκολύνει την αξιολόγηση της πλατφόρμας σε περιβάλλον προσομοίωσης, καθώς κάθε υποσύστημα μπορεί να λειτουργήσει είτε με πραγματικές συσκευές είτε με προσομοιωμένα ενεργειακά μοντέλα, χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στη συνολική αρχιτεκτονική.ελέγχου.

2.4 Περιγραφή των Υποσυστημάτων

Η προτεινόμενη πλατφόρμα αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών υποσυστημάτων, καθένα από τα οποία επιτελεί συγκεκριμένο λειτουργικό ρόλο στο πλαίσιο της ενεργειακής διαχείρισης του μικροδικτύου. Ο διαχωρισμός των λειτουργιών αυτών επιτρέπει την ανεξάρτητη ανάπτυξη, τη συντήρηση και την επέκταση των επιμέρους μονάδων, ενώ παράλληλα διευκολύνει την ενσωμάτωση νέων ενεργειακών πόρων χωρίς τροποποίηση της συνολικής αρχιτεκτονικής.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά υποσυστήματα της προτεινόμενης πλατφόρμας και ο ρόλος που επιτελεί το καθένα κατά τη λειτουργία του συστήματος.

2.4.1 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (FlexMeasures)

Το FlexMeasures αποτελεί τον κεντρικό πυρήνα λήψης αποφάσεων της προτεινόμενης πλατφόρμας και λειτουργεί ως Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS). Είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων λειτουργίας, την αξιοποίηση προβλέψεων παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης [2].

Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τους περιορισμούς λειτουργίας του μικροδικτύου, το EMS παράγει βελτιστοποιημένα προγράμματα φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα και αντίστοιχα προγράμματα λειτουργίας για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Τα αποτελέσματα αυτά αποστέλλονται στο επίπεδο διασύνδεσης, το οποίο αναλαμβάνει την εφαρμογή τους στα αντίστοιχα υποσυστήματα.

2.4.2 Επίπεδο Διασύνδεσης (Fledge Middleware)

Το Fledge λειτουργεί ως ενδιάμεσο επίπεδο διασύνδεσης μεταξύ του EMS και των ενεργειακών πόρων του μικροδικτύου. Βασική του αποστολή είναι η συλλογή τηλεμετρίας από τις ενεργειακές διατάξεις, η κανονικοποίηση των δεδομένων και η ασφαλής μεταφορά τους προς το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας [3].

Παράλληλα, μέσω κατάλληλων μηχανισμών επέκτασης (plugins), το Fledge υποστηρίζει την αντίστροφη ροή πληροφορίας, μεταφέροντας τις αποφάσεις που λαμβάνονται από το EMS προς τα αντίστοιχα υποσυστήματα [3].

2.4.3 Custom Plugins

Δεδομένου ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική απαιτούσε λειτουργίες οι οποίες δεν υποστηρίζονται εγγενώς από τις διαθέσιμες πλατφόρμες, αναπτύχθηκε ένα σύνολο εξειδικευμένων plugins σε γλώσσα Python.

Τα plugins αυτά αναλαμβάνουν τη συλλογή τηλεμετρίας από τα προσομοιωμένα υποσυστήματα, τη μετατροπή των δεδομένων στην κατάλληλη μορφή για το EMS, τη λήψη των αποτελεσμάτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης και τη μετατροπή τους σε εντολές ελέγχου, οι οποίες εφαρμόζονται στους αντίστοιχους ενεργειακούς πόρους.

Η ανάπτυξη των συγκεκριμένων plugins αποτελεί βασικό στοιχείο της προτεινόμενης πλατφόρμας, καθώς επιτρέπει την πλήρη αυτοματοποίηση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των επιμέρους επιπέδων του συστήματος.

2.4.4 Υποδομές Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν τα βασικά ελεγχόμενα φορτία του μικροδικτύου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούνται δύο προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης, οι οποίοι υποστηρίζουν την ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω του πρωτοκόλλου OCPP.

Η λειτουργία των συστημάτων αγωγίμης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων διέπεται από απαιτήσεις που καθορίζονται στο πρότυπο IEC 61851-1 [7]. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούνται δύο προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης. Οι σταθμοί αυτοί αποστέλλουν συνεχώς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας τους, την παρεχόμενη ισχύ φόρτισης και την κατάσταση φόρτισης των συνδεδεμένων οχημάτων, ενώ παράλληλα λαμβάνουν δυναμικά προγράμματα φόρτισης που παράγονται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.

2.4.5 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αναπαριστά την τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του μικροδικτύου. Κατά τη λειτουργία της πλατφόρμας παρέχει πληροφορίες σχετικά με την παραγόμενη ισχύ, οι οποίες αξιοποιούνται από το EMS κατά τη διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Η διαθέσιμη παραγωγή συνδυάζεται με τις αντίστοιχες προβλέψεις, επιτρέποντας στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας να προγραμματίζει αποτελεσματικότερα τη λειτουργία των υπολοίπων ενεργειακών πόρων.

2.4.6 Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας λειτουργεί ως μηχανισμός εξισορρόπησης του μικροδικτύου. Το EMS παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και υπολογίζει πότε αυτή πρέπει να φορτίζει ή να εκφορτίζει, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή, τη ζήτηση των φορτιστών και τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αντίστοιχες εντολές μεταφέρονται μέσω του middleware και εφαρμόζονται στον προσομοιωμένο συσσωρευτή.

2.4.7 Δημόσιο Ηλεκτρικό Δίκτυο και Υπηρεσίες Προβλέψεων

Το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί την κύρια πηγή τροφοδοσίας του μικροδικτύου όταν η τοπική παραγωγή και το σύστημα αποθήκευσης δεν επαρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Παράλληλα, το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας αξιοποιεί εξωτερικές υπηρεσίες προβλέψεων, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αναμενόμενη φωτοβολταϊκή παραγωγή και τις προβλεπόμενες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν βασικές εισόδους της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

2.4.8 Συγκεντρωτικός Πίνακας Υποσυστημάτων

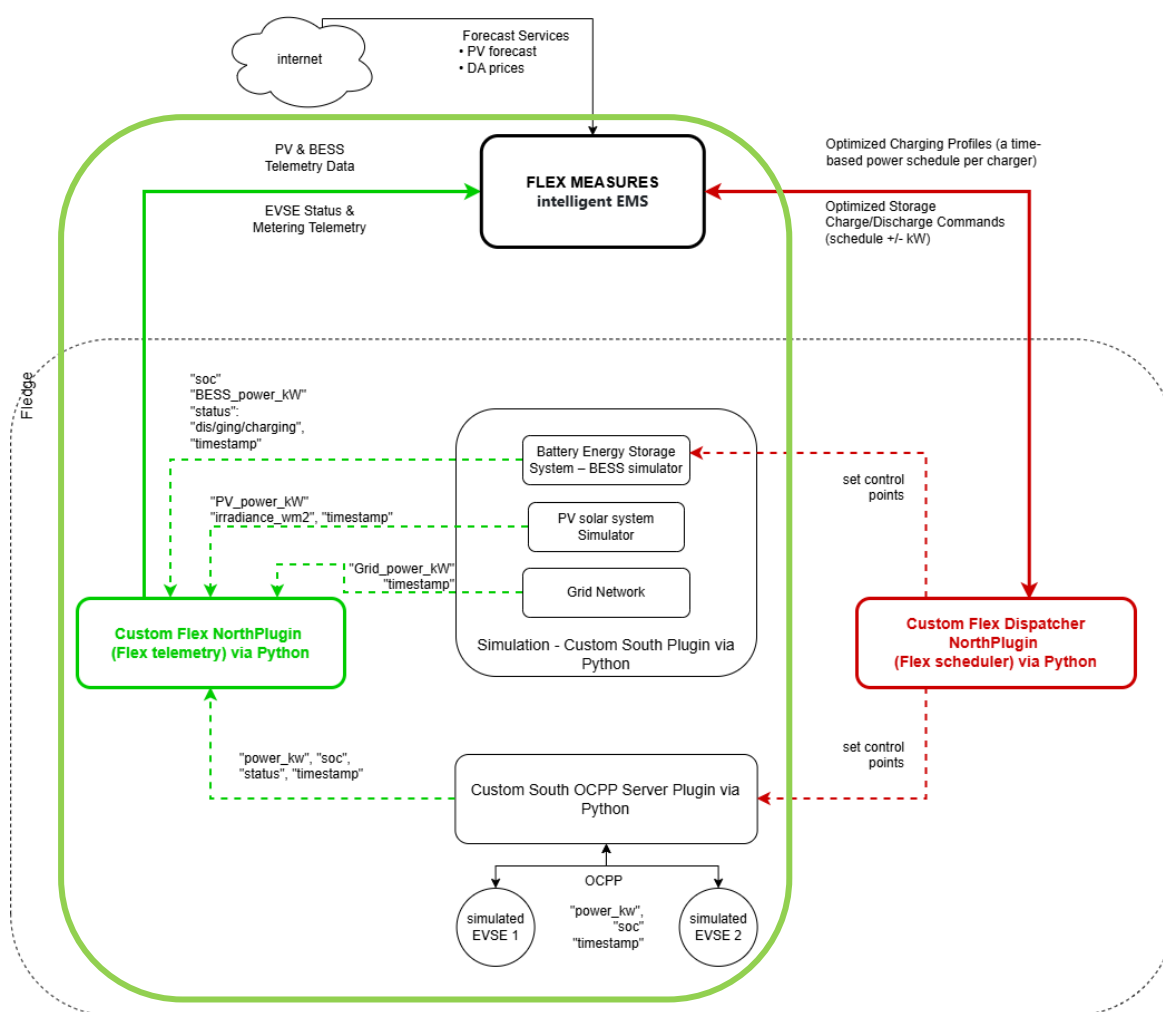
Υποσύστημα	Κύριος ρόλος	Είσοδοι	Έξοδοι
FlexMeasures	Βελτιστοποίηση	Telemetry, Forecasts	Schedules
Fledge	Middleware	Telemetry, Commands	Measurements
Flex Telemetry Plugin	Αποστολή δεδομένων	Simulators	EMS
Dispatcher Plugin	Εκτέλεση schedules	EMS	Control commands
EVSE Simulators	Προσομοίωση φόρτισης	Charging Profiles	Telemetry
BESS Simulator	Προσομοίωση αποθήκευσης	Charge/Discharge Commands	SoC, Power
PV Simulator	Προσομοίωση παραγωγής	Forecast	PV Power
Grid Simulator	Προσομοίωση δικτύου	System Load	Grid Power

Πίνακας 3 - Υποσυστήματα της προτεινόμενης πλατφόρμας

2.5 Ροή Δεδομένων και Λειτουργία της Προτεινόμενης Αρχιτεκτονικής

Η λειτουργία της προτεινόμενης πλατφόρμας βασίζεται στη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, με σκοπό τη δυναμική ενεργειακή διαχείριση του μικροδικτύου. Η συνολική διαδικασία περιλαμβάνει τη συλλογή τηλεμετρίας από τους ενεργειακούς πόρους, την επεξεργασία των δεδομένων από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και την εφαρμογή των αποφάσεων ελέγχου που προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή δεδομένων από τις ενεργειακές διατάξεις του μικροδικτύου. Οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποστέλλουν περιοδικά πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας τους, την παρεχόμενη ισχύ φόρτισης, την καταναλισκόμενη ενέργεια και την κατάσταση φόρτισης των συνδεδεμένων οχημάτων. Παράλληλα, το φωτοβολταϊκό σύστημα παρέχει δεδομένα σχετικά με την παραγόμενη ισχύ, ενώ το σύστημα αποθήκευσης αποστέλλει πληροφορίες για την κατάσταση φόρτισης, την ισχύ φόρτισης ή εκφόρτισης και τη συνολική διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα.



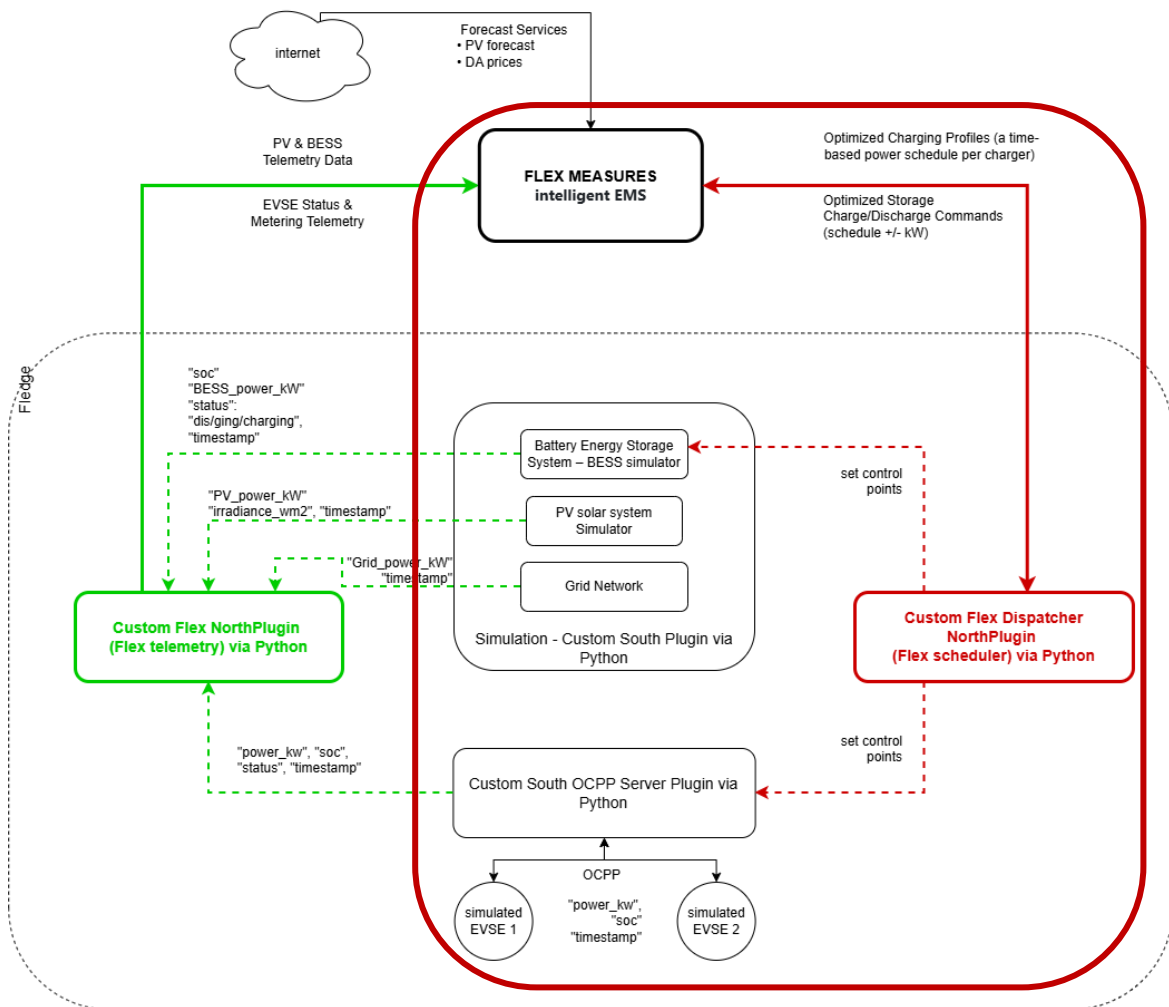
Εικόνα 3 – Telemetry Data Flow της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Τα δεδομένα που παράγονται από τα επιμέρους ενεργειακά υποσυστήματα συλλέγονται από το επίπεδο middleware (fledge-core) και προωθούνται στον Custom Flex NorthPlugin, όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος της πληρότητας, η αντιστοίχιση των μεταβλητών με τους αντίστοιχους αισθητήρες του FlexMeasures, η προσαρμογή των μονάδων μέτρησης όπου απαιτείται και η δημιουργία του αντίστοιχου JSON payload. Η τελική μεταφορά προς το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας πραγματοποιείται μέσω REST API. Έτσι αποστέλλονται στο FlexMeasures, όπου αποθηκεύονται ως χρονικές σειρές και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Παράλληλα με την τηλεμετρία, το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας λαμβάνει εξωτερικά δεδομένα που σχετίζονται με την αναμενόμενη λειτουργία του μικροδικτύου, όπως προβλέψεις φωτοβολταϊκής παραγωγής και τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνδυασμός

δεδομένων πραγματικού χρόνου και προβλέψεων επιτρέπει στο EMS να διαμορφώνει ολοκληρωμένη εικόνα της ενεργειακής κατάστασης του συστήματος.

Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τους λειτουργικούς περιορισμούς του μικροδικτύου, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης, μέσω της οποίας παράγονται δυναμικά προγράμματα φόρτισης για κάθε σταθμό φόρτισης καθώς και αντίστοιχα προγράμματα φόρτισης ή εκφόρτισης για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.



Εικόνα 4 - Control Flow της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιστρέφονται στον μηχανισμό ελέγχου ως schedules, τα οποία περιλαμβάνουν τις επιθυμητές τιμές λειτουργίας ανά ενεργειακό πόρο και χρονικό βήμα. Ο Custom Flexdispatcher Plugin του Fledge αναλαμβάνει την ανάκτηση των schedules, τη μετατροπή τους στη μορφή που απαιτεί το αντίστοιχο υποσύστημα και την αποστολή των τελικών control setpoints προς τα EVSE και το BESS. Μετά την εφαρμογή των εντολών, οι νέες καταστάσεις των ενεργειακών πόρων

καταγράφονται ως τηλεμετρία και εισάγονται εκ νέου στον επόμενο κύκλο βελτιστοποίησης. Οι σταθμοί φόρτισης εφαρμόζουν τα νέα προγράμματα φόρτισης, ενώ το σύστημα αποθήκευσης προσαρμόζει τη λειτουργία του σύμφωνα με τις παραγόμενες εντολές. Με τον τρόπο αυτό κάθε νέα διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται πάντοτε στην πραγματική κατάσταση του συστήματος, υλοποιώντας έναν πλήρη μηχανισμό closed-loop ενεργειακής διαχείρισης.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει στο μικροδίκτυο να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβολές της ζήτησης, της διαθέσιμης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και των συνθηκών του ηλεκτρικού δικτύου, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

2.6 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις που οδήγησαν στον σχεδιασμό της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης, οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν για την υλοποίησή της, καθώς και η τελική αρχιτεκτονική του συστήματος. Επιπλέον, περιγράφηκαν τα επιμέρους υποσυστήματα και αναλύθηκε η ροή των δεδομένων και των σημάτων ελέγχου που υποστηρίζουν τη λειτουργία ενός πλήρους μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης. Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε η υλοποίηση της προτεινόμενης πλατφόρμας, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν η ανάλυση των απαιτήσεων, οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν και η αρχιτεκτονική της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υλοποίησης της πλατφόρμας, καθώς και η ανάπτυξη των επιμέρους λογισμικών στοιχείων που απαιτήθηκαν για την ολοκλήρωση του συστήματος.

Η υλοποίηση δεν περιορίστηκε στην παραμετροποίηση υφιστάμενων εργαλείων ανοικτού λογισμικού, αλλά περιλάμβανε την ανάπτυξη εξειδικευμένων μηχανισμών διασύνδεσης, τη δημιουργία προσομοιωμένων ενεργειακών υποσυστημάτων και την ολοκλήρωση όλων των επιπέδων επικοινωνίας που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού μηχανισμού ενεργειακής διαχείρισης.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διασύνδεση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας με τα υπόλοιπα υποσυστήματα της πλατφόρμας, στην ανάπτυξη των απαραίτητων διεπαφών επικοινωνίας και στην υλοποίηση ενός μηχανισμού συνεχούς ανταλλαγής δεδομένων και σημάτων ελέγχου. Η διαδικασία αυτή κατέστησε δυνατή την πλήρη ολοκλήρωση ενός συστήματος closed-loop, στο οποίο τα δεδομένα τηλεμετρίας οδηγούν δυναμικά στη λήψη αποφάσεων ενεργειακής διαχείρισης και οι αποφάσεις αυτές εφαρμόζονται αυτόματα στα επιμέρους ενεργειακά υποσυστήματα.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά το περιβάλλον ανάπτυξης, η παραμετροποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας, η ανάπτυξη των μηχανισμών διασύνδεσης και των προσομοιωμένων ενεργειακών υποσυστημάτων, καθώς και η ολοκλήρωση της συνολικής πλατφόρμας.

3.1 Περιβάλλον Ανάπτυξης

Η ανάπτυξη και η αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον Linux, αξιοποιώντας το λειτουργικό σύστημα Linux Mint 22.3, το οποίο επιλέχθηκε λόγω της συμβατότητάς του με τις τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία και της σταθερότητάς του κατά την ανάπτυξη εφαρμογών βασισμένων σε Python και Docker.

Η πλατφόρμα αποτελείται από ένα σύνολο ανεξάρτητων λογισμικών υπηρεσιών, οι οποίες συνεργάζονται μέσω διεπαφών επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων. Για την υλοποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα FlexMeasures έκδοσης 0.30.2, εγκατεστημένη απευθείας στο λειτουργικό σύστημα (native installation). Το FlexMeasures χρησιμοποιεί ως σύστημα διαχείρισης βάσης δεδομένων την PostgreSQL, στην οποία αποθηκεύονται οι χρονικές σειρές μετρήσεων, οι προβλέψεις, οι ενεργειακοί πόροι και τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης [8].

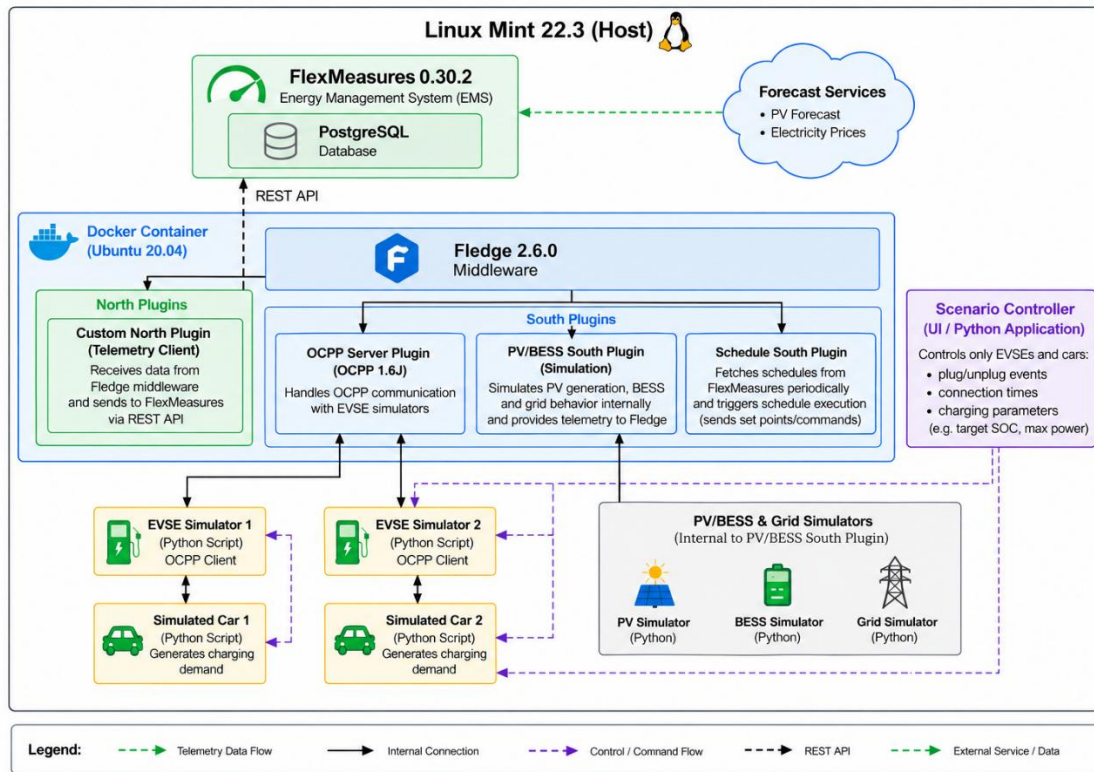
Το επίπεδο middleware υλοποιήθηκε με την πλατφόρμα Fledge έκδοσης 2.6.0, η οποία εκτελείται σε απομονωμένο περιβάλλον Docker Container βασισμένο σε λειτουργικό σύστημα Ubuntu 20.04 [6]. Η χρήση container επέτρεψε την ανεξάρτητη διαχείριση του middleware, την ευκολότερη παραμετροποίηση των υπηρεσιών και την απομόνωση του περιβάλλοντος εκτέλεσης από το υπόλοιπο σύστημα.

Οι μηχανισμοί διασύνδεσης που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας υλοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες εφαρμογές σε γλώσσα Python [5]. Οι εφαρμογές αυτές αναλαμβάνουν τη συλλογή τηλεμετρίας από τα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα, την ανταλλαγή δεδομένων με το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και την εφαρμογή των παραγόμενων προγραμμάτων λειτουργίας στα αντίστοιχα υποσυστήματα. Η επιλογή ανεξάρτητων εφαρμογών, αντί της ενσωμάτωσής τους στο middleware, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία κατά την ανάπτυξη, τον έλεγχο και τη μελλοντική επέκταση της πλατφόρμας.

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του μικροδικτύου αναπτύχθηκαν εφαρμογές Python που αναπαριστούν τη συμπεριφορά των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, του φωτοβολταϊκού συστήματος και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Οι εφαρμογές αυτές παράγουν δεδομένα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο και αποκρίνονται στις εντολές που λαμβάνουν από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, επιτρέποντας την αξιολόγηση της συνολικής λειτουργίας της πλατφόρμας χωρίς την ανάγκη χρήσης πραγματικού εξοπλισμού.

Η επικοινωνία με τους προσομοιωμένους σταθμούς φόρτισης βασίστηκε στο πρωτόκολλο OCPP 1.6J. Ο OCPP Server υλοποιήθηκε ως plugin του Fledge, λειτουργώντας ως σημείο διασύνδεσης μεταξύ των προσομοιωμένων φορτιστών και του υπόλοιπου συστήματος. Μέσω του συγκεκριμένου μηχανισμού καθίσταται δυνατή τόσο η λήψη δεδομένων

τηλεμετρίας όσο και η αποστολή δυναμικών προγραμμάτων φόρτισης που παράγονται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.



Εικόνα 5 – Διάγραμμα Υλοποίησης

Στοιχείο	Έκδοση / Τεχνολογία
Operating System	Linux Mint 22.3
FlexMeasures	0.30.2
Database	PostgreSQL
Middleware	Fledge 2.6.0
Container Platform	Docker
Programming Language	Python 3.x
Communication Protocol	OCPP 1.6J
EV Simulators	Python
PV/BESS Simulator	Python

Πίνακας 4 - Περιβάλλον Ανάπτυξης

Η τελική διάταξη του περιβάλλοντος ανάπτυξης αποτελεί έναν συνδυασμό υπηρεσιών εγκατεστημένων απευθείας στο λειτουργικό σύστημα, απομονωμένων υπηρεσιών σε Docker containers και ανεξάρτητων εφαρμογών Python. Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε

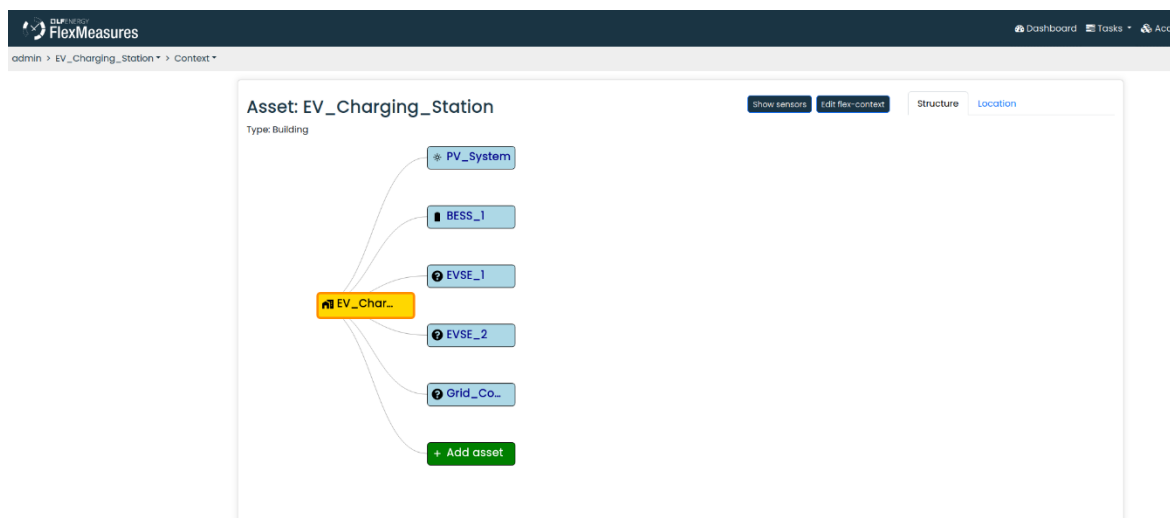
ώστε να εξασφαλίζεται ευκολία ανάπτυξης, υψηλή επεκτασιμότητα και σαφής διαχωρισμός των επιμέρους λειτουργικών επιπέδων της προτεινόμενης πλατφόρμας.

3.2 Παραμετροποίηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (FlexMeasures)

Η λειτουργία του FlexMeasures βασίζεται στη μοντελοποίηση όλων των ενεργειακών πόρων ως διακριτών στοιχείων (assets), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω μίας ιεραρχικής δομής και συνοδεύονται από τα αντίστοιχα σύνολα μετρήσεων (sensors). Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας να διαχειρίζεται διαφορετικούς τύπους ενεργειακών πόρων με ενιαίο τρόπο, ανεξάρτητα από τη φυσική τους υλοποίηση.

Για την υποστήριξη της προτεινόμενης πλατφόρμας κρίθηκε απαραίτητη η παραμετροποίηση του FlexMeasures, ώστε να αναπαριστά τη δομή και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μικροδικτύου. Η διαδικασία αυτή περιλάμβανε τη δημιουργία της ιεραρχίας των ενεργειακών πόρων, τον ορισμό των απαιτούμενων αισθητήρων, τη διαμόρφωση των παραμέτρων λειτουργίας κάθε υποσυστήματος και τη σύνδεσή τους με τις υπηρεσίες βελτιστοποίησης του EMS.

Η παραμετροποίηση πραγματοποιήθηκε με τρόπο ώστε το FlexMeasures να μπορεί να λαμβάνει δεδομένα τηλεμετρίας από τα επιμέρους υποσυστήματα, να αποθηκεύει τις αντίστοιχες χρονικές σειρές στη βάση δεδομένων και να χρησιμοποιεί τις πληροφορίες αυτές κατά τη διαδικασία παραγωγής βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας.



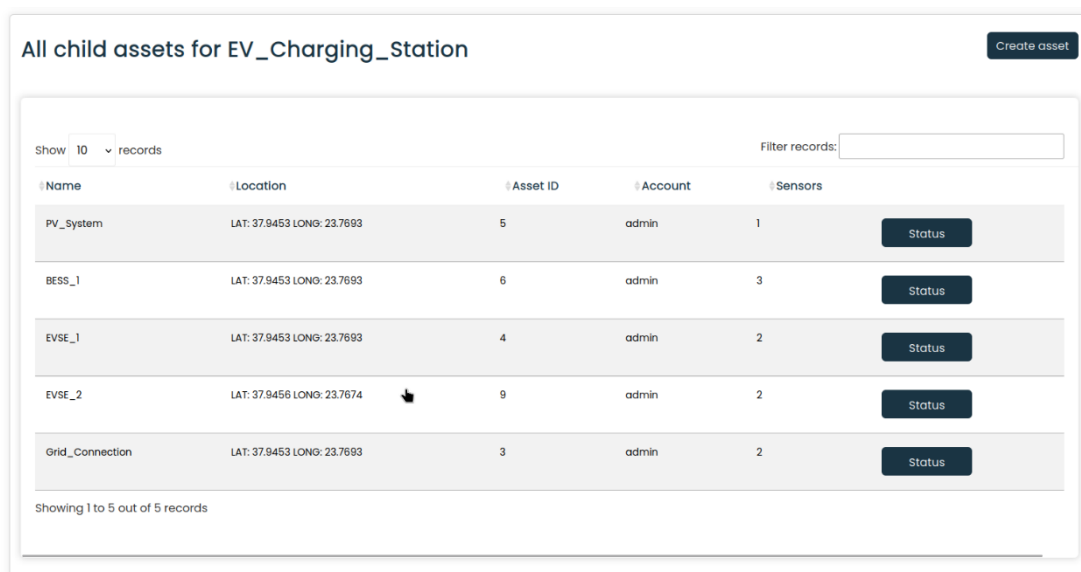
Εικόνα 6 – Πόροι FlexMeasures (assets)

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά η μοντελοποίηση των ενεργειακών πόρων, η δημιουργία των αισθητήρων και η διαδικασία διαμόρφωσης του περιβάλλοντος του FlexMeasures για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

3.2.1 Μοντελοποίηση των Ενεργειακών Πόρων (Assets)

Η πρώτη και σημαντικότερη διαδικασία παραμετροποίησης του FlexMeasures ήταν η μοντελοποίηση των ενεργειακών πόρων (Assets) που απαρτίζουν το υπό μελέτη μικροδίκτυο. Στο FlexMeasures κάθε φυσική ή λογική ενεργειακή οντότητα αναπαρίσταται ως ένα διακριτό asset, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους αισθητήρες (Sensors) για την καταγραφή μετρήσεων, προβλέψεων ή παραμέτρων λειτουργίας [2].

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκε μία ιεραρχική δομή assets που αναπαριστά τα βασικά στοιχεία του μικροδικτύου του σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η δομή αυτή επιτρέπει στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας να αναγνωρίζει τις σχέσεις μεταξύ των επιμέρους ενεργειακών πόρων και να χρησιμοποιεί τα αντίστοιχα δεδομένα κατά τη διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης.



Name	Location	Asset ID	Account	Sensors	Status
PV_System	LAT: 37.9453 LONG: 23.7693	5	admin	1	Status
BESS_1	LAT: 37.9453 LONG: 23.7693	6	admin	3	Status
EVSE_1	LAT: 37.9453 LONG: 23.7693	4	admin	2	Status
EVSE_2	LAT: 37.9456 LONG: 23.7674	9	admin	2	Status
Grid_Connection	LAT: 37.9453 LONG: 23.7693	3	admin	2	Status

Showing 1 to 5 out of 5 records

Εικόνα 7 – Πόροι FlexMeasures EV Charging Station (assets)

Στο ανώτερο επίπεδο της ιεραρχίας ορίστηκε το μικροδίκτυο (Microgrid), το οποίο αποτελεί τη βασική ενεργειακή οντότητα της εγκατάστασης. Κάτω από το Microgrid μοντελοποιήθηκαν οι επιμέρους ενεργειακοί πόροι, οι οποίοι περιλαμβάνουν το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο (Grid), το φωτοβολταϊκό σύστημα (PV), το σύστημα αποθήκευσης

ηλεκτρικής ενέργειας (BESS) και τους δύο σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE 1 και EVSE 2).

Asset	Περιγραφή	Ρόλος στο σύστημα
Microgrid	Μικροδίκτυο	Κεντρική ενεργειακή οντότητα
Grid	Δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο	Εισαγωγή / εξαγωγή ισχύος
PV	Φωτοβολταϊκό σύστημα	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
BESS	Σύστημα αποθήκευσης	Αποθήκευση και διάθεση ενέργειας
EVSE 1	Σταθμός φόρτισης 1	Φόρτιση πρώτου ηλεκτρικού οχήματος
EVSE 2	Σταθμός φόρτισης 2	Φόρτιση δεύτερου ηλεκτρικού οχήματος

Πίνακας 5 - Ενεργειακοί πόροι που μοντελοποιήθηκαν στο FlexMeasures

Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση επιτρέπει στο FlexMeasures να αντιμετωπίζει κάθε ενεργειακό πόρο ως ανεξάρτητη οντότητα, διατηρώντας παράλληλα τη συνολική εικόνα της εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η συσχέτιση των μετρήσεων κάθε υποσυστήματος με τη συνολική ενεργειακή κατάσταση του μικροδικτύου, διευκολύνοντας την εκτέλεση των διαδικασιών πρόβλεψης και βελτιστοποίησης.

Εκτός από την ιεραρχική οργάνωση των assets, για κάθε ενεργειακό πόρο ορίστηκαν τα κατάλληλα μεταδεδομένα (metadata), όπως ο τύπος του asset, η μονάδα μέτρησης της ισχύος και της ενέργειας, τα λειτουργικά όρια και οι απαραίτητες παράμετροι που χρησιμοποιούνται από τις υπηρεσίες του FlexMeasures. Η ορθή παραμετροποίηση των μεταδεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή λειτουργία των αλγορίθμων βελτιστοποίησης και την ορθή ερμηνεία των εισερχόμενων δεδομένων τηλεμετρίας.

Η διαδικασία μοντελοποίησης των ενεργειακών πόρων αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκαν όλες οι υπόλοιπες λειτουργίες της πλατφόρμας. Η δημιουργία των αντίστοιχων αισθητήρων, η εισαγωγή των μετρήσεων τηλεμετρίας και η παραγωγή των βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας πραγματοποιούνται πάντοτε σε άμεση συσχέτιση με τα assets που έχουν οριστεί στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.

3.2.2 Μοντελοποίηση των Αισθητήρων (Sensors)

Μετά τη δημιουργία των ενεργειακών πόρων (Assets), το επόμενο στάδιο παραμετροποίησης του FlexMeasures ήταν ο ορισμός των αντίστοιχων αισθητήρων (Sensors). Στο FlexMeasures οι αισθητήρες αποτελούν το βασικό σημείο εισαγωγής και αποθήκευσης δεδομένων, καθώς κάθε μέτρηση, πρόβλεψη ή αποτέλεσμα βελτιστοποίησης συνδέεται με έναν συγκεκριμένο sensor.

Κάθε αισθητήρας συσχετίζεται με έναν ενεργειακό πόρο και περιγράφει μία συγκεκριμένη φυσική ή λογική μεταβλητή του συστήματος, όπως η ενεργός ισχύς, η κατάσταση φόρτισης ενός συσσωρευτή, η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή ή ένα πρόγραμμα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος. Με τον τρόπο αυτό, το FlexMeasures οργανώνει όλα τα δεδομένα του συστήματος σε μορφή χρονικών σειρών (time series), επιτρέποντας τόσο την αποθήκευση ιστορικών δεδομένων όσο και την επεξεργασία δεδομένων πραγματικού χρόνου.

Sensor	Data source type	Time of latest record	Status
Grid_power (8) ⓘ	user	9 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)
EVSE_1_power (1) ⓘ	user	8 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)
EVSE_1_power (1) ⓘ	scheduler	47 minutes from now	🔴 (9 seconds ago)
grid_price (7) ⓘ	user	in 6 days	🟢 (9 seconds ago)
BESS_1_power (4) ⓘ	user	8 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)
BESS_1_power (4) ⓘ	scheduler	47 minutes from now	🔴 (9 seconds ago)
PV_power (3) ⓘ	user	8 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)
BESS_1_soc (5) ⓘ	user	8 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)
Total EV load (17) ⓘ	user	8 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)
EVSE_2_power (15) ⓘ	user	8 hours ago	🔴 (9 seconds ago)
EVSE_2_power (15) ⓘ	scheduler	20 hours ago	🔴 (9 seconds ago)
EVSE_2_soc (16) ⓘ	user	8 hours ago	🔴 (9 seconds ago)
EVSE_1_soc (14) ⓘ	user	8 seconds from now	🔴 (9 seconds ago)

Εικόνα 8 – Αισθητήρες συστήματος FlexMeasures (sensors)

Για κάθε ενεργειακό υποσύστημα δημιουργήθηκαν οι απαραίτητοι αισθητήρες, ώστε να υποστηρίζεται πλήρως η λειτουργία του προτεινόμενου μικροδικτύου. Οι αισθητήρες αυτοί

χρησιμοποιούνται τόσο για την αποθήκευση της εισερχόμενης τηλεμετρίας όσο και για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Ειδικότερα, για τους σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων δημιουργήθηκαν αισθητήρες που καταγράφουν την παρεχόμενη ισχύ φόρτισης, την καταναλισκόμενη ενέργεια και την κατάσταση φόρτισης (SoC) των συνδεδεμένων οχημάτων. Αντίστοιχα, για το φωτοβολταϊκό σύστημα δημιουργήθηκαν αισθητήρες που αποθηκεύουν τη στιγμιαία παραγόμενη ισχύ και τις αντίστοιχες προβλέψεις παραγωγής.

Asset	Sensor	Περιγραφή	Source
EVSE 1	Power	Ισχύς φόρτισης	EVSE Simulator
EVSE 1	SoC	Κατάσταση φόρτισης οχήματος	EV Simulator
EVSE 2	Power	Ισχύς φόρτισης	EVSE Simulator
EVSE 2	SoC	Κατάσταση φόρτισης οχήματος	EV Simulator
PV	PV Power	Παραγόμενη ισχύς	PV Simulator
PV	PV Forecast	Πρόβλεψη παραγωγής	Forecast Service
BESS	SoC	Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας	BESS Simulator
BESS	Power	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης	BESS Simulator
Grid	Grid Power	Ισχύς εισαγωγής / εξαγωγής	Grid Simulator
Market	DA Price	Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	Forecast Service

Πίνακας 6 - Βασικοί αισθητήρες του συστήματος

Για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας δημιουργήθηκαν αισθητήρες που παρακολουθούν τη διαθέσιμη κατάσταση φόρτισης, την ισχύ φόρτισης ή εκφόρτισης και τα αντίστοιχα προγράμματα λειτουργίας που παράγονται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας. Παράλληλα, δημιουργήθηκαν αισθητήρες για την παρακολούθηση της ανταλλαγής ισχύος με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και για την αποθήκευση των προβλέψεων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

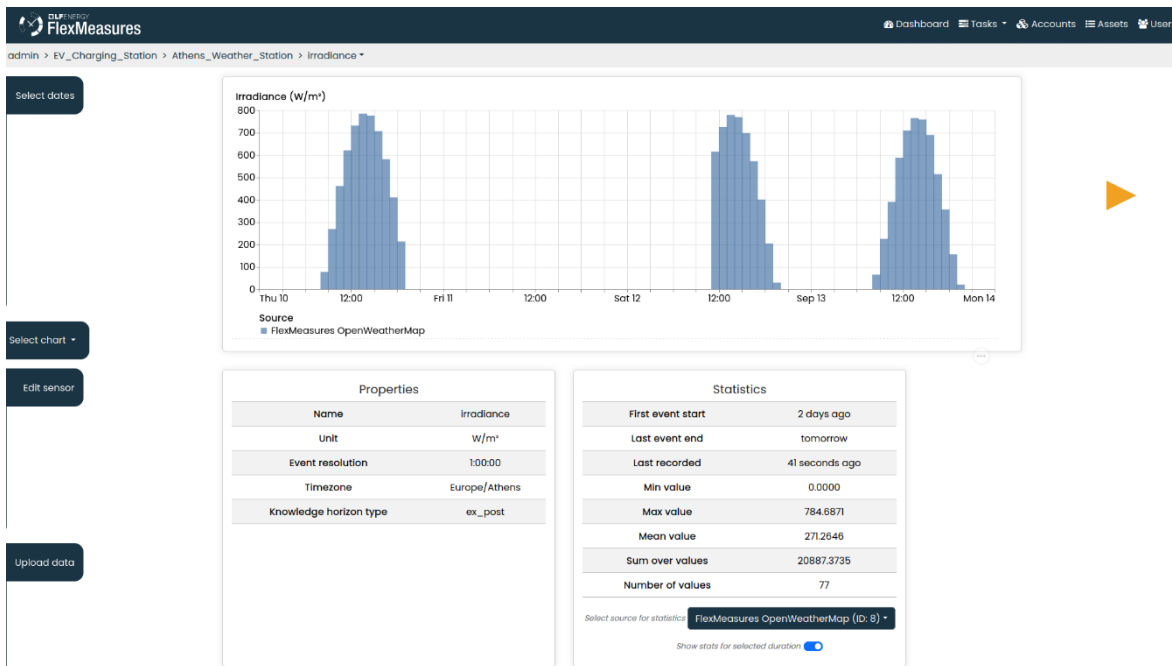
Η οργάνωση των δεδομένων σε μορφή αισθητήρων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς επιτρέπει την ανεξάρτητη διαχείριση κάθε ενεργειακής μεταβλητής, τη διατήρηση ιστορικών μετρήσεων, την εύκολη εισαγωγή προβλέψεων και την αξιοποίηση των δεδομένων από τις υπηρεσίες βελτιστοποίησης του FlexMeasures. Επιπλέον, η συγκεκριμένη προσέγγιση διευκολύνει την επέκταση της πλατφόρμας με νέους ενεργειακούς πόρους, καθώς κάθε νέα συσκευή απαιτεί μόνο τη δημιουργία των αντίστοιχων assets και sensors χωρίς τροποποίηση της υπόλοιπης αρχιτεκτονικής.

3.2.3 Ενσωμάτωση Εξωτερικών Δεδομένων μέσω API

Για την αποτελεσματική λειτουργία της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης απαιτείται η αξιοποίηση εξωτερικών δεδομένων, τα οποία μεταβάλλονται δυναμικά στον χρόνο. Στην τελική υλοποίηση της πλατφόρμας, η εισαγωγή των δεδομένων αυτών πραγματοποιείται μέσω προγραμματιστικών διεπαφών (APIs), καταργώντας την ανάγκη χειροκίνητης εισαγωγής ή χρήσης προκαθορισμένων αρχείων CSV.

Συγκεκριμένα, η πλατφόρμα αξιοποιεί δύο βασικές κατηγορίες εξωτερικών δεδομένων: προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας για την εκτίμηση της μελλοντικής φωτοβολταϊκής παραγωγής και τιμές ηλεκτρικής ενέργειας χονδρεμπορικής αγοράς για τον υπολογισμό του δυναμικού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.

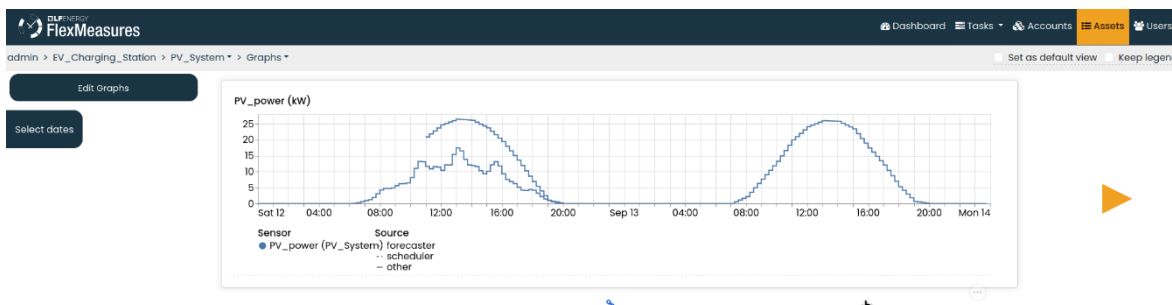
Για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) χρησιμοποιήθηκε το plugin FlexMeasures-weather, μέσω του οποίου πραγματοποιείται αυτόματη ανάκτηση των διαθέσιμων προβλέψεων από την υπηρεσία OpenWeatherMap. Η διαδικασία εκτελείται αυτόματα ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα και αφορά την τρέχουσα και την επόμενη ημέρα. Τα δεδομένα που λαμβάνονται μετατρέπονται στην κατάλληλη μορφή χρονικής σειράς και καταχωρούνται στον αντίστοιχο αισθητήρα πρόβλεψης ακτινοβολίας του FlexMeasures.



Εικόνα 9 - Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του plugin FlexMeasures-weather και καταχώριση της στον αισθητήρα irradiance του FlexMeasures

Η παραπάνω εικόνα επιβεβαιώνει την επιτυχή ενσωμάτωση της εξωτερικής υπηρεσίας πρόγνωσης, καθώς οι προβλεπόμενες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας εμφανίζονται πλέον στον αντίστοιχο αισθητήρα του FlexMeasures, με χρονική ανάλυση μίας ώρας.

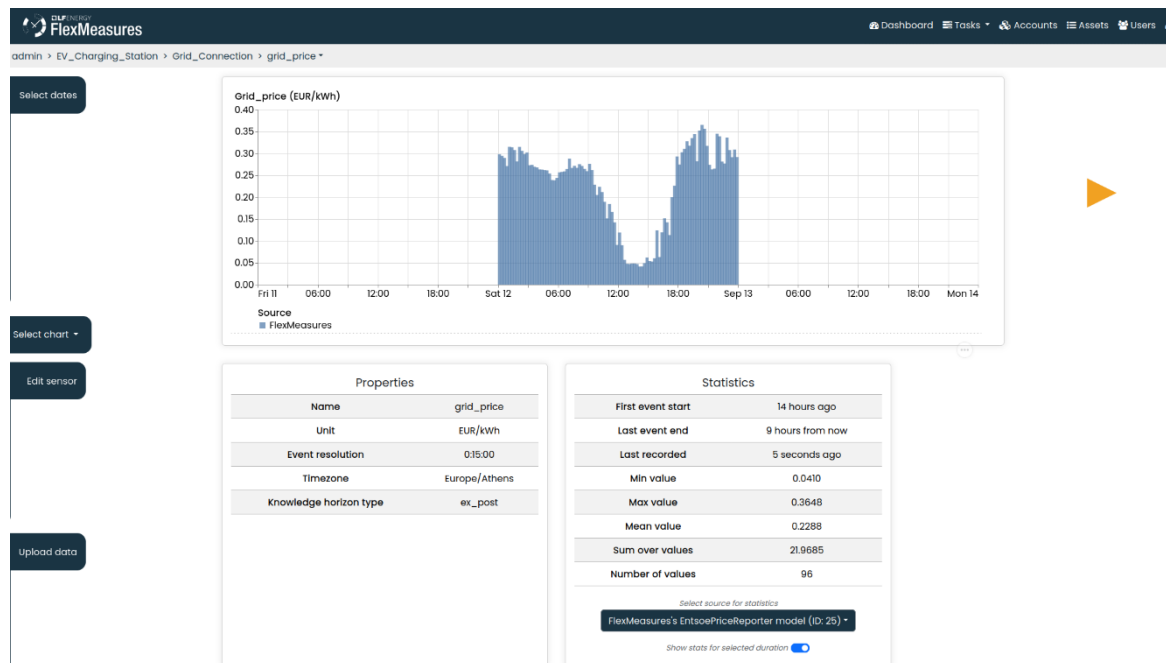
Στη συνέχεια, η προβλεπόμενη ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για την παραγωγή πρόβλεψης φωτοβολταϊκής ισχύος. Η μετατροπή πραγματοποιείται με βάση τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος και την ονομαστική του ισχύ. Η παραγόμενη χρονική σειρά καταχωρείται στον αντίστοιχο αισθητήρα πρόβλεψης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος και είναι πλέον διαθέσιμη ως είσοδος στη διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης.



Εικόνα 10 - Πρόβλεψη φωτοβολταϊκής ισχύος που προκύπτει από την πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η προβλεπόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς ακολουθεί το ημερήσιο προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας, με μηδενική παραγωγή κατά τις νυχτερινές ώρες και μέγιστες τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η χρονική σειρά χρησιμοποιείται στη συνέχεια από τον μηχανισμό βελτιστοποίησης του FlexMeasures.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε ξεχωριστό reporter plugin για την αυτόματη ανάκτηση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας από την πλατφόρμα ENTSO-E μέσω API. Οι τιμές χονδρεμπορικής αγοράς λαμβάνονται για την επόμενη χρονική περίοδο και στη συνέχεια εφαρμόζεται η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τελικής τιμής του δυναμικού («πορτοκαλί») τιμολογίου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Οι υπολογισμένες τιμές αποθηκεύονται σε χρονική σειρά στον αντίστοιχο αισθητήρα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας του FlexMeasures.



Εικόνα 11 - Αυτόματη ενημέρωση του αισθητήρα grid_price στο FlexMeasures με τις υπολογισμένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, οι τιμές έχουν καταχωρηθεί στον αισθητήρα grid_price με χρονική ανάλυση 15 λεπτών και είναι διαθέσιμες στο FlexMeasures ως χρονική σειρά εισόδου για τη διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Με τον τρόπο αυτό, τόσο η πρόβλεψη της φωτοβολταϊκής παραγωγής όσο και η πρόβλεψη του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ενημερώνονται αυτόματα, χωρίς την ανάγκη

χειροκίνητης παρέμβασης. Τα δεδομένα είναι επομένως διαθέσιμα στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας πριν από την εκτέλεση του αντίστοιχου κύκλου βελτιστοποίησης.

Η νέα διαδικασία μετατρέπει την αρχιτεκτονική από ένα περιβάλλον που βασίζεται σε στατικά ή χειροκίνητα δεδομένα σε ένα δυναμικό περιβάλλον λειτουργίας, στο οποίο οι αποφάσεις του EMS βασίζονται σε επικαιροποιημένες προβλέψεις παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας.

3.3 Ανάπτυξη Μηχανισμού Συλλογής Τηλεμετρίας (North Plugin)

Η αποτελεσματική λειτουργία ενός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας προϋποθέτει τη συνεχή και αξιόπιστη συλλογή δεδομένων από όλους τους ενεργειακούς πόρους του μικροδικτύου. Στην προτεινόμενη πλατφόρμα, η τηλεμετρία παράγεται από πολλαπλές ετερογενείς πηγές, όπως οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, το φωτοβολταϊκό σύστημα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο.

Δεδομένου ότι τα υποσυστήματα αυτά χρησιμοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς επικοινωνίας και παράγουν δεδομένα σε διαφορετική μορφή, αναπτύχθηκε ένας ενιαίος μηχανισμός συλλογής τηλεμετρίας, ο οποίος αναλαμβάνει τη συγκέντρωση, την κανονικοποίηση και την προώθηση όλων των μετρήσεων προς το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.



Εικόνα 12 – Τηλεμετρία Fledge Custom North Plugin

Ο μηχανισμός αυτός υλοποιήθηκε ως ανεξάρτητη εφαρμογή σε γλώσσα Python και λειτουργεί ως το σημείο συγκέντρωσης όλων των δεδομένων που παράγονται από τα South Plugins του middleware. Μετά τη λήψη των μετρήσεων πραγματοποιείται έλεγχος της πληρότητας των δεδομένων, μετατροπή των μονάδων όπου απαιτείται και δημιουργία της κατάλληλης μορφής μηνυμάτων που χρησιμοποιεί το FlexMeasures για την αποθήκευση των χρονικών σειρών.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό της διαδικασίας συλλογής δεδομένων από τη λειτουργία του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε αλλαγή στον τρόπο λειτουργίας ενός υποσυστήματος ή η προσθήκη νέου ενεργειακού πόρου μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να απαιτείται τροποποίηση του FlexMeasures, αλλά μόνο αντίστοιχη προσαρμογή του μηχανισμού συλλογής τηλεμετρίας.

Επιπλέον, η συγκέντρωση όλων των δεδομένων σε ένα ενιαίο σημείο επιτρέπει την ομοιόμορφη διαχείριση της τηλεμετρίας, την εύκολη καταγραφή συμβάντων και την απλούστερη διαδικασία εντοπισμού και αποσφαλμάτωσης πιθανών προβλημάτων κατά την ανάπτυξη και λειτουργία της πλατφόρμας.

3.3.1 Custom Flex NorthPlugin

Η συλλογή και η μεταφορά της τηλεμετρίας προς το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας υλοποιήθηκε μέσω ενός ανεξάρτητου λογισμικού στοιχείου, το οποίο αναπτύχθηκε ειδικά για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και αποτελεί τον κεντρικό μηχανισμό διασύνδεσης μεταξύ του middleware και του FlexMeasures.

Ο Custom Flex NorthPlugin είναι μία εφαρμογή γραμμένη σε γλώσσα Python, η οποία εκτελείται ανεξάρτητα από το περιβάλλον του Fledge και αναλαμβάνει τη συνεχή παρακολούθηση των δεδομένων τηλεμετρίας που παράγονται από τα South Plugins του middleware. Βασική του λειτουργία είναι η συγκέντρωση των διαθέσιμων μετρήσεων, η επεξεργασία τους και η προώθησή τους προς το FlexMeasures μέσω των διαθέσιμων REST APIs.

Εικόνα 13 – Πίνακας ρυθμίσεων Custom Flex NorthPlugin

```

1 #- coding: utf-8 -*-
2 import asyncio
3 import requests
4 from datetime import datetime, timezone
5
6 from fledge.common import logger
7
8 _LOGGER = logger.setup(__name__)
9
10 __version__ = "3.1"
11
12 # -----
13 # CONFIG
14 # -----
15 _DEFAULT_CONFIG = {
16     "plugin": {
17         "description": "FlexMeasures north plugin",
18         "type": "string",
19         "default": "flex",
20         "readonly": "true"
21     },
22     "flexMeasuresUrl": {
23         "description": "FlexMeasures API URL",
24         "type": "string",
25         "default": "http://localhost:5000/api",
26         "order": "1",
27         "displayName": "FlexMeasures URL"
28     },
29     "apiToken": {
30         "description": "FlexMeasures API token",
31         "type": "string",
32         "default": "",
33         "order": "2",
34         "displayName": "API Token"
35     },
36     "timeout": {
37         "description": "HTTP timeout in seconds",
38         "type": "integer",
39         "default": "5",
40         "order": "3",
41         "displayName": "Timeout"
42     }
43 }
44
45 # -----
46 # SENSOR MAPPING
47 # -----
48 _SENSOR_MAP = {
49     ("PV_BEES", "bess_power_kw"): 4,
50     ("PV_BEES", "SoC_percent"): 5,
51     ("PV_BEES", "load_kw"): 17,
52     ("PV_Power", "power_kw"): 3,
53     ("Grid_Power", "grid_power_kw"): 6,
54     ("CP001", "power_kw"): 1,
55     ("CP001", "soc"): 14,
56     ("CP002", "power_kw"): 15,
57     ("CP002", "soc"): 16
58 }
59
60 # -----
61 # UNIT MAP
62 # -----
63 _UNIT_MAP = {
64     "power_kw": "kW",
65 }

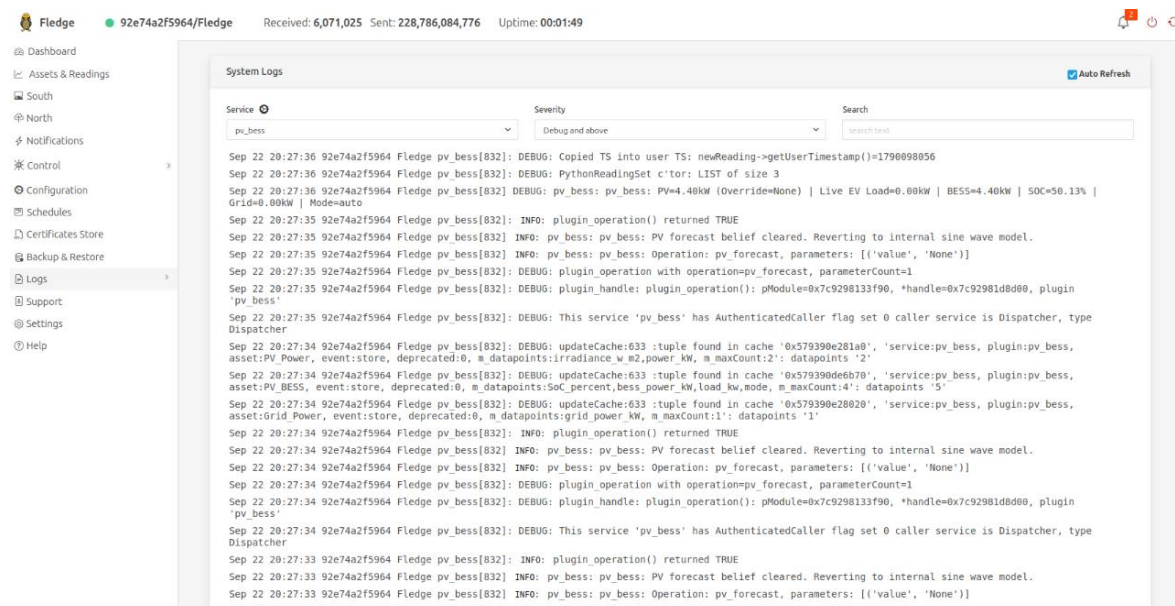
```

Εικόνα 14 – Στιγμιότυπο κώδικα Custom Flex NorthPlugin

Η εφαρμογή λειτουργεί περιοδικά, πραγματοποιώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανάκτηση των νέων μετρήσεων που έχουν αποθηκευτεί στο Fledge. Στη συνέχεια, τα δεδομένα κανονικοποιούνται, ελέγχονται ως προς την εγκυρότητά τους και μετατρέπονται στη μορφή που απαιτείται από το μοντέλο δεδομένων του FlexMeasures. Για κάθε μέτρηση πραγματοποιείται αντιστοίχιση με τον αντίστοιχο αισθητήρα (Sensor), διασφαλίζοντας ότι οι χρονικές σειρές ενημερώνονται με συνέπεια και χωρίς απώλεια πληροφορίας.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μετασχηματισμού, ο μηχανισμός αποστέλλει τις νέες μετρήσεις στο FlexMeasures μέσω του αντίστοιχου REST API, όπου αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων PostgreSQL και καθίστανται άμεσα διαθέσιμες στις υπηρεσίες βελτιστοποίησης του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αξιοπιστία της διαδικασίας μεταφοράς δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό ο μηχανισμός περιλαμβάνει ελέγχους εγκυρότητας των δεδομένων, διαχείριση πιθανών σφαλμάτων επικοινωνίας και μηχανισμούς καταγραφής συμβάντων (logging), οι οποίοι διευκολύνουν τον εντοπισμό προβλημάτων κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης και της λειτουργίας της πλατφόρμας.



Εικόνα 15 – Παράθυρο καταγραφής συμβάντων πλατφόρμας Fledge

Η επιλογή υλοποίησης του μηχανισμού ως ανεξάρτητης εφαρμογής προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με μία πλήρως ενσωματωμένη λύση. Ο διαχωρισμός της λειτουργίας συλλογής τηλεμετρίας από το middleware και το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας μειώνει τον βαθμό σύζευξης (coupling) μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, διευκολύνει τη συντήρηση του λογισμικού και επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή της πλατφόρμας σε διαφορετικές πηγές τηλεμετρίας χωρίς τροποποίηση του πυρήνα του συστήματος.

Τέλος, ο Custom Flex NorthPlugin αποτελεί το βασικό σημείο εισόδου όλων των μετρήσεων στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι οι υπηρεσίες

βελτιστοποίησης του FlexMeasures βασίζονται πάντοτε σε ενημερωμένα και συνεπή δεδομένα πραγματικού χρόνου.

3.3.2 REST API και Μορφότυπο Ανταλλαγής Δεδομένων

Η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους λογισμικών στοιχείων της πλατφόρμας υλοποιείται μέσω RESTful διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (REST APIs). Η επιλογή του συγκεκριμένου μηχανισμού επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό των υποσυστημάτων και τη μεταξύ τους ανταλλαγή δεδομένων χωρίς άμεση εξάρτηση από την εσωτερική υλοποίηση κάθε επιμέρους στοιχείου.

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, το επίπεδο middleware που υλοποιείται με το Fledge λειτουργεί ως ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ των ενεργειακών υποσυστημάτων και του FlexMeasures. Τα South Plugins συλλέγουν ή παράγουν τις μετρήσεις των επιμέρους ενεργειακών πόρων, ενώ ο Custom Flex NorthPlugin αναλαμβάνει την επεξεργασία και προώθηση των δεδομένων προς το EMS. Η επικοινωνία με το FlexMeasures πραγματοποιείται μέσω HTTP/REST αιτημάτων, με χρήση δεδομένων σε μορφή JSON.

Η χρήση κοινού μορφότυπου δεδομένων επιτρέπει την ανεξάρτητη ανάπτυξη των επιμέρους υποσυστημάτων. Το middleware δεν χρειάζεται να γνωρίζει τον τρόπο με τον οποίο το FlexMeasures υλοποιεί εσωτερικά την αποθήκευση ή τη βελτιστοποίηση, ενώ αντίστοιχα το EMS δεν εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο παράγεται η τηλεμετρία από τα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα.

Για την ανταλλαγή δεδομένων χρησιμοποιείται ένα δομημένο μήνυμα JSON, το οποίο περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον την ταυτότητα του ενεργειακού πόρου ή αισθητήρα, τον τύπο της μετρούμενης μεταβλητής, τη χρονική στιγμή της μέτρησης, τη μονάδα μέτρησης και την αντίστοιχη τιμή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων του middleware με τους αντίστοιχους sensors του FlexMeasures.

Ενδεικτικά, οι δομές των μηνυμάτων τηλεμετρίας που ανταλλάσσονται μπορούν να αποτυπωθούν ως εξής:

```
[
  {
    "asset": "PV_Power",
    "timestamp": "2026-09-16T21:45:00+03:00",
    "key": "a1b2c3d4-e5f6-7890-abcd-ef1234567890",
    "readings": {
      "power_kW": 15.50,
      "irradiance_w_m2": 450.2
    }
  },
  {
    "asset": "Grid_Power",
    "timestamp": "2026-09-16T21:45:00+03:00",
    "key": "b2c3d4e5-f6a7-8901-bcde-f12345678901",
    "readings": {
      "grid_power_kW": -3.20
    }
  },
  {
    "asset": "PV_BESS",
    "timestamp": "2026-09-16T21:45:00+03:00",
    "key": "c3d4e5f6-a7b8-9012-cdef-123456789012",
    "readings": {
      "SoC_percent": 85.40,
      "bess_power_kW": 5.00,
      "load_kW": 7.30,
      "mode": "discharge"
    }
  }
]
```

Εικόνα 16 – Παράδειγμα μηνύματος τηλεμετρίας από τα PV-BESS simulated συστήματα προς το Fledge core

Η παραπάνω δομή αποτελεί ενδεικτική αναπαράσταση της πληροφορίας που αποστέλλεται από το εκάστοτε South plugin του Fledge προς το Fledge Core.

```
{
  "type": "PostSensorDataRequest",
  "start": "2026-09-16T21:45:00+03:00",
  "duration": "PT15M",
  "unit": "kW",
  "values": [12.50]
}
```

Εικόνα 17 – Παράδειγμα μηνύματος τηλεμετρίας από το Fledge core προς το FlexMeasures

Το παραπάνω μήνυμα αποστέλλεται ως payload στο παρακάτω REST endpoint του FlexMeasures: **<http://localhost:5000/api/sensors/4/data>**

3.3.3 Μορφή Εντολών Ελέγχου και Επικοινωνία με τα Υποσυστήματα

Η επικοινωνία της πλατφόρμας δεν περιορίζεται στη συλλογή τηλεμετρίας, αλλά είναι αμφίδρομη και περιλαμβάνει την αποστολή εντολών ελέγχου προς τα ενεργειακά υποσυστήματα. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το FlexMeasures παράγει προγράμματα λειτουργίας (optimized schedules), τα οποία περιλαμβάνουν τις επιθυμητές τιμές λειτουργίας των ενεργειακών πόρων σε διακριτά χρονικά βήματα.

Για τις υποδομές φόρτισης, το παραγόμενο πρόγραμμα περιλαμβάνει, ανάλογα με το σενάριο, την επιθυμητή ισχύ φόρτισης κάθε EVSE και τη χρονική περίοδο εφαρμογής της. Για το σύστημα αποθήκευσης περιλαμβάνει αντίστοιχα την επιθυμητή λειτουργία φόρτισης ή εκφόρτισης και την αντίστοιχη ισχύ.

Ο μηχανισμός ελέγχου ανακτά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, τα μετατρέπει στη μορφή που απαιτεί το αντίστοιχο υποσύστημα και τα προωθεί προς το simulated EVSE ή το simulated BESS. Έτσι, το πρόγραμμα λειτουργίας που παράγεται από το EMS μετατρέπεται σε πραγματική εντολή λειτουργίας στο επίπεδο των ενεργειακών πόρων.

Η λογική της ανταλλαγής μπορεί να συνοψιστεί ως:

Telemetry → REST API → FlexMeasures → Βελτιστοποίηση → Schedule → REST API → Control Command → Energy Asset

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης, επιτρέποντας στο σύστημα να λειτουργεί ως κλειστός βρόχος ελέγχου (closed-loop).

```
# -----  
# SEND TO FLEXMEASURES  
# -----  
loop = asyncio.get_event_loop()  
  
for sensor_id, buckets in grouped.items():  
  
    url = f"{handle['flex_url']}/sensors/{sensor_id}/data"  
  
    headers = {  
        "Authorization": f"{handle['api_token']}",  
        "Content-Type": "application/json"  
    }  
  
    for bucket_ts, data in buckets.items():  
  
        values = data["values"]  
        avg_value = sum(values) / float(len(values))  
  
        payload = {  
            "type": "PostSensorDataRequest",  
            "start": bucket_ts,  
            "duration": "PT15M", # <--- UPDATED to 15 minutes  
            "unit": data["unit"],  
            "values": [round(avg_value, 2)]  
        }  
  
        try:  
            response = await loop.run_in_executor(  
                None,  
                lambda: requests.post(  
                    url,  
                    json=payload,  
                    headers=headers,  
                    timeout=handle["timeout"]  
                )  
            )  
  
            if response.status_code in (200, 201):  
                sent += 1  
                _LOGGER.debug(  
                    f"Sensor {sensor_id}: sent 15-min avg {avg_value}"  
                )
```

Εικόνα 18 – Κώδικας δημιουργίας και αποστολής JSON payload τηλεμετρίας μέσω HTTP POST

```
else:
    dropped += 1
    _LOGGER.error(
        f"FlexMeasures ERROR {response.status_code}: {response.text}"
    )

except Exception as ex:
    dropped += 1
    _LOGGER.error(
        f"HTTP POST failed for sensor {sensor_id}: {ex}"
    )

return (sent, dropped, last_id)
```

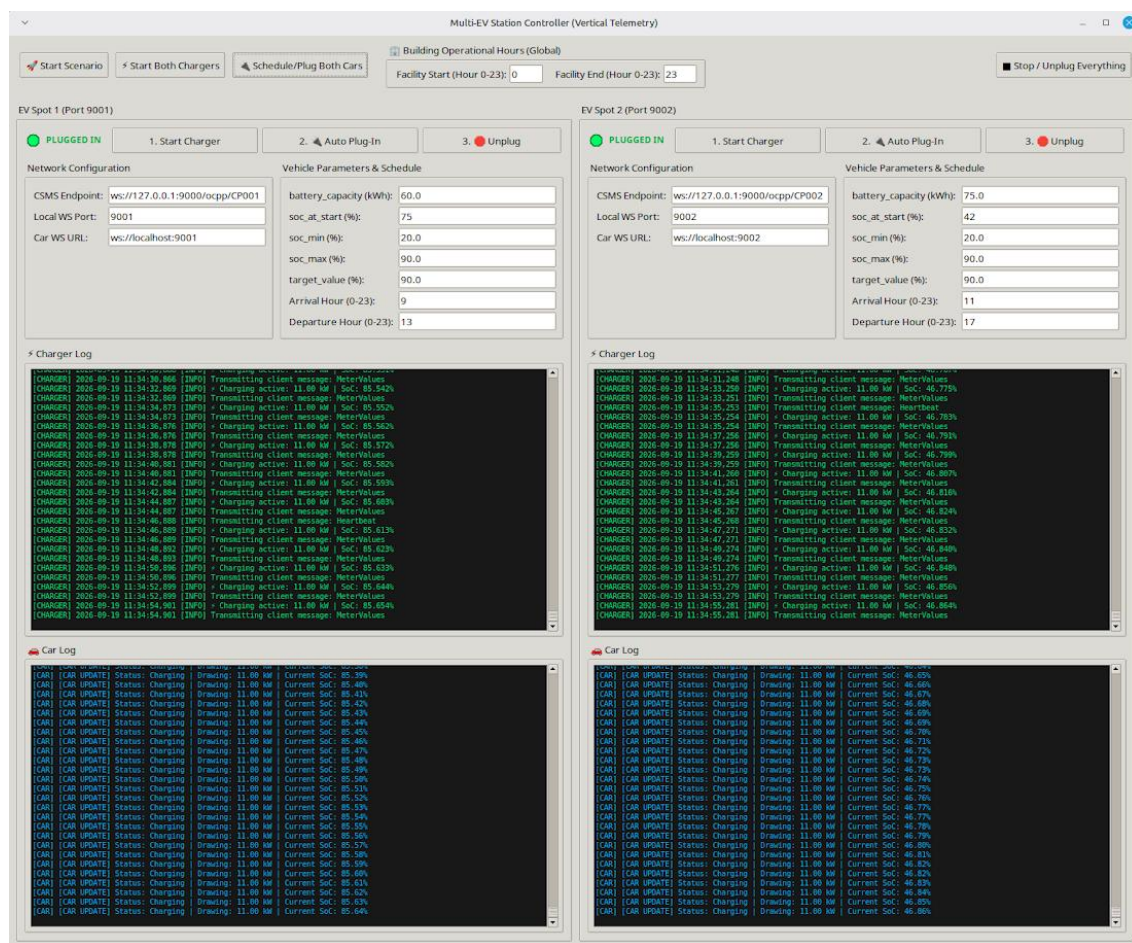
Εικόνα 19 – Κώδικας δημιουργίας και αποστολής JSON payload τηλεμετρίας μέσω HTTP POST

Ο παραπάνω κώδικας παρουσιάζει ενδεικτικά τον μηχανισμό δημιουργίας του JSON payload και αποστολής της τηλεμετρίας μέσω HTTP POST αιτήματος προς το αντίστοιχο REST endpoint. Ο πλήρης κώδικας των επιμέρους plugins και εφαρμογών παρατίθεται στο συνοδευτικό αποθετήριο κώδικα.

3.4 Ανάπτυξη Μηχανισμού Ελέγχου Σεναρίων (Scenario Controller)

Η ολοκλήρωση της προτεινόμενης πλατφόρμας απαιτούσε έναν μηχανισμό μέσω του οποίου θα μπορούσαν να διαμορφώνονται και να μεταβάλλονται οι συνθήκες λειτουργίας των προσομοιωμένων ηλεκτρικών οχημάτων και των σταθμών φόρτισης κατά την εκτέλεση των πειραματικών σεναρίων. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένας ανεξάρτητος μηχανισμός ελέγχου σε γλώσσα Python, ο οποίος ονομάστηκε Scenario Controller.

Ο Scenario Controller δεν αποτελεί κεντρικό ελεγκτή του συνόλου της προσομοίωσης, αλλά επικεντρώνεται αποκλειστικά στη διαχείριση της συμπεριφοράς των EVSEs και των προσομοιωμένων ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και τον έλεγχο γεγονότων σύνδεσης και αποσύνδεσης των οχημάτων, τον καθορισμό των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία τα οχήματα είναι διαθέσιμα για φόρτιση, καθώς και τη διαμόρφωση παραμέτρων που σχετίζονται με τη ζήτηση φόρτισης.



Εικόνα 20 – Περιβάλλον εφαρμογής scenario controller

Μέσω του Scenario Controller μπορούν να καθοριστούν, για κάθε προσομοιωμένο όχημα, παράμετροι όπως ο χρόνος σύνδεσης και αποσύνδεσης στο EVSE, η αρχική και επιθυμητή κατάσταση φόρτισης (SoC), καθώς και χαρακτηριστικά της διαδικασίας φόρτισης, όπως η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η δημιουργία διαφορετικών συνθηκών φόρτισης και η επαναληπτική εκτέλεση πειραματικών σεναρίων με ελεγχόμενες παραμέτρους.

Η επικοινωνία του Scenario Controller πραγματοποιείται απευθείας με τα αντίστοιχα προσομοιωμένα EVSEs και οχήματα. Τα EVSE simulators λειτουργούν ως OCPP clients και επικοινωνούν με το OCPP Server South Plugin του Fledge, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της επικοινωνίας OCPP. Ο Scenario Controller, επομένως, δεν παρεμβαίνει στη λειτουργία του Fledge ούτε αναλαμβάνει την επικοινωνία με το FlexMeasures. Ο ρόλος του περιορίζεται στη διαμόρφωση των συνθηκών και των γεγονότων που αφορούν τα EVSEs και τα ηλεκτρικά οχήματα.

Η εκτέλεση των ενεργειακών schedules που παράγονται από το FlexMeasures πραγματοποιείται από ξεχωριστό μηχανισμό, μέσα στο Flex Dispatcher plugin, ο οποίος λειτουργεί εντός του Fledge. Το συγκεκριμένο plugin επικοινωνεί με το FlexMeasures και ανακτά περιοδικά τα διαθέσιμα schedules και τα αντίστοιχα setpoints. Στη συνέχεια ενεργοποιεί την εκτέλεσή τους και αποστέλλει τις απαιτούμενες εντολές ελέγχου προς τα αντίστοιχα υποσυστήματα. Με τον τρόπο αυτό διαχωρίζεται η διαχείριση των πειραματικών συνθηκών από την εκτέλεση της ενεργειακής βελτιστοποίησης και των παραγόμενων προγραμμάτων λειτουργίας.

Αντίστοιχα, η προσομοίωση της φωτοβολταϊκής παραγωγής, του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και της ανταλλαγής ισχύος με το δίκτυο πραγματοποιείται από το PV/BESS South Plugin και τα αντίστοιχα μοντέλα προσομοίωσης που ενσωματώνονται σε αυτό. Οι λειτουργίες αυτές δεν ελέγχονται από τον Scenario Controller, αλλά αποτελούν μέρος της λειτουργίας του ενεργειακού υποσυστήματος προσομοίωσης.

Η παραπάνω αρχιτεκτονική επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό των επιμέρους λειτουργιών της πλατφόρμας. Ο Scenario Controller χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της συμπεριφοράς των EVSEs και των ηλεκτρικών οχημάτων, το OCPP South Plugin αναλαμβάνει την επικοινωνία με τους προσομοιωμένους σταθμούς φόρτισης, ο Schedule South Plugin αναλαμβάνει την περιοδική ανάκτηση και εκτέλεση των schedules από το FlexMeasures, ενώ ο PV/BESS South Plugin διαχειρίζεται την προσομοίωση της παραγωγής, αποθήκευσης και ανταλλαγής ενέργειας.

Με αυτή τη διάκριση, η δημιουργία διαφορετικών πειραματικών σεναρίων μπορεί να πραγματοποιείται χωρίς τροποποιήσεις στο FlexMeasures ή στους βασικούς μηχανισμούς του Fledge. Η αλλαγή των χρόνων σύνδεσης, των χαρακτηριστικών των οχημάτων και των παραμέτρων φόρτισης πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω του Scenario Controller, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση της ίδιας υποδομής για την αξιολόγηση διαφορετικών περιπτώσεων λειτουργίας του μικροδικτύου.

3.5 Ανάπτυξη Προσομοιωμένων Ενεργειακών Υποσυστημάτων

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης, καθώς η χρήση πραγματικών ενεργειακών διατάξεων θα απαιτούσε σημαντικό εξοπλισμό και θα περιόριζε την ευελιξία κατά τη διαδικασία ανάπτυξης και ελέγχου της πλατφόρμας. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα σύνολο προσομοιωμένων

ενεργειακών υποσυστημάτων, τα οποία αναπαριστούν τη συμπεριφορά των βασικών στοιχείων ενός πραγματικού μικροδικτύου σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Κάθε υποσύστημα υλοποιήθηκε ως ανεξάρτητη εφαρμογή σε γλώσσα Python, επιτρέποντας την αυτόνομη λειτουργία του και την εύκολη ενσωμάτωσή του στη συνολική αρχιτεκτονική. Η επιλογή αυτή διατηρεί τον χαμηλό βαθμό σύζευξης μεταξύ των επιμέρους στοιχείων της πλατφόρμας και διευκολύνει την αντικατάσταση ενός προσομοιωμένου υποσυστήματος από πραγματικό εξοπλισμό σε μελλοντικές επεκτάσεις.

Τα προσομοιωμένα υποσυστήματα ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω των μηχανισμών επικοινωνίας που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, συμμετέχοντας ισότιμα στον κύκλο συλλογής τηλεμετρίας, ενεργειακής βελτιστοποίησης και εφαρμογής των παραγόμενων αποφάσεων ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό η πλατφόρμα αξιολογείται σε συνθήκες που προσεγγίζουν τη λειτουργία ενός πραγματικού σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

3.5.1 Προσομοιωμένο Υποσύστημα Σταθμού Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η λειτουργία των σταθμών φόρτισης προσομοιώθηκε μέσω δύο ανεξάρτητων εφαρμογών Python, οι οποίες αναπαριστούν δύο διαφορετικούς σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE 1 και EVSE 2). Κάθε εφαρμογή υλοποιεί τη βασική συμπεριφορά ενός πραγματικού φορτιστή, υποστηρίζοντας την ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω του πρωτοκόλλου OCPP έκδοση 1.6J.

Οι προσομοιωμένοι φορτιστές επικοινωνούν με τον OCPP Server που υλοποιήθηκε στο middleware, αποστέλλοντας περιοδικά πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας τους, την παρεχόμενη ισχύ φόρτισης, την καταναλισκόμενη ενέργεια και λοιπά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Παράλληλα, είναι σε θέση να λαμβάνουν δυναμικά προγράμματα φόρτισης που παράγονται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και να προσαρμόζουν αντίστοιχα τη λειτουργία τους.

```
# Build standard OCPP downstream message envelope
ocpp_call = [
    2,
    f"flex-msg-{int(datetime.now().timestamp())}",
    operation,
    {
        "idTag": "FLEXMEASURES_BATCH",
        "connectorId": 1,
        "chargingProfile": {
            "chargingProfileId": 42,
            "stackLevel": 0,
            "chargingProfilePurpose": "TxProfile",
            "chargingProfileKind": "Absolute",
            "chargingSchedule": {
                "chargingRateUnit": "kW",
                "chargingSchedulePeriod": [
                    {"startPeriod": 0, "limit": power_limit}
                ]
            }
        }
    }
]
```

Εικόνα 21 - Δημιουργία OCPP μηνύματος για αποστολή Charging Profile (OCPP Server->EVSEs)

Για κάθε σταθμό φόρτισης αναπτύχθηκε αντίστοιχα και ένας προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος, ο οποίος αναπαριστά τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (SoC) κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Ο προσομοιωτής λαμβάνει ως είσοδο την παρεχόμενη ισχύ φόρτισης από τον αντίστοιχο σταθμό και υπολογίζει δυναμικά την εξέλιξη της φόρτισης του οχήματος, παράγοντας δεδομένα τηλεμετρίας που αξιοποιούνται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.

```
async def send_status_notification(ws, status_value):
    payload = {
        "connectorId": STATE["connector_id"],
        "errorCode": "NoError",
        "status": status_value,
        "timestamp": iso_timestamp(),
    }
    if status_value == "Preparing" and STATE["soc"] is not None:
        payload["soc_at_start"] = float(STATE["soc"])
        payload["soc_min"] = float(STATE["soc_min"])
        payload["soc_max"] = float(STATE["soc_max"])
        payload["battery_capacity_kwh"] = float(STATE["battery_capacity_kwh"])
        payload["target_value"] = float(STATE["target_soc"])
        payload["target_time"] = str(STATE["target_time"])

    await send_call(ws, "StatusNotification", payload)
```

Εικόνα 22 - Δημιουργία OCPP μηνύματος για αποστολή Status (EVSEs->OCPP Server)

Η ανάπτυξη ανεξάρτητου προσομοιωτή οχήματος επιτρέπει τη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση της διαδικασίας φόρτισης, καθώς διαχωρίζει τη συμπεριφορά του σταθμού

φόρτισης από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του ηλεκτρικού οχήματος, επιτρέποντας την εύκολη διαμόρφωση διαφορετικών σεναρίων αξιολόγησης. Ο έλεγχος των συγκεκριμένων φορτιστών υλοποιείται μέσω του μηχανισμού ελέγχου σεναρίων της παραγράφου 3.4.

3.5.2 Προσομοιωμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα και Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας

Για την προσομοίωση της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης αναπτύχθηκε μία ενιαία εφαρμογή σε γλώσσα Python, η οποία αναπαριστά τη συμπεριφορά τόσο του φωτοβολταϊκού συστήματος όσο και του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS). Η ενοποίηση των δύο υποσυστημάτων σε μία κοινή εφαρμογή επιτρέπει την άμεση αλληλεπίδρασή τους και απλοποιεί την προσομοίωση της ενεργειακής ισορροπίας του μικροδικτύου.

Το φωτοβολταϊκό υποσύστημα είναι υπεύθυνο για την παραγωγή της διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία μεταβάλλεται δυναμικά σύμφωνα με το εκάστοτε σενάριο λειτουργίας. Η εφαρμογή παράγει δεδομένα τηλεμετρίας που αντιστοιχούν στη στιγμιαία παραγόμενη ισχύ και τα προωθεί προς το middleware μέσω του αντίστοιχου South Plugin, επιτρέποντας στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας να παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση της τοπικής παραγωγής.

Παράλληλα, το ίδιο λογισμικό στοιχείο προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Το υποσύστημα παρακολουθεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC), την ισχύ φόρτισης ή εκφόρτισης και τη διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα. Οι παράμετροι αυτοί ενημερώνονται δυναμικά σύμφωνα με τις εντολές που παράγονται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Μεταβλητή	Περιγραφή
PV Power	Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού
Battery SoC	Κατάσταση φόρτισης
Battery Power	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης
Grid Import	Ισχύς από το δίκτυο

Grid Export	Ισχύς προς το δίκτυο
-------------	----------------------

Πίνακας 7 - Μεταβλητές που προσομοιώνονται

Οι μετρήσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος και του συστήματος αποθήκευσης συγκεντρώνονται από το κοινό South Plugin του Fledge, το οποίο λειτουργεί ως σημείο εισόδου της τηλεμετρίας προς το middleware. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει την ομοιόμορφη διαχείριση των δεδομένων και απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία συλλογής και προώθησης της τηλεμετρίας προς το FlexMeasures.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτοβολταϊκού συστήματος, του συστήματος αποθήκευσης και του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας επιτρέπει την προσομοίωση ρεαλιστικών ενεργειακών σεναρίων. Η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή μπορεί να χρησιμοποιείται άμεσα για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, να αποθηκεύεται στη μπαταρία ή να διοχετεύεται στο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ αντίστοιχα το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει σύμφωνα με τις αποφάσεις που λαμβάνονται από το FlexMeasures.

```
# BESS Update
# -----
def update_bess(handle, pv_kw, load_kw):
    now = time.time()
    last_time = handle.get("last_update_time", now)
    dt_seconds = max(0.0, now - last_time)
    handle["last_update_time"] = now

    dt_hours = dt_seconds / 3600.0

    soc = handle["soc"]
    SOC_MIN = handle.get("bess_min_soc", 20.0)
    SOC_MAX = handle.get("bess_max_soc", 80.0)
    max_kw = handle.get("bess_max_kw", 80.0)
    eff = handle.get("efficiency", 0.95)

    if handle["mode"] == "auto":
        MIN_BESS_POWER_KW = 0.5
        calculated_setpoint = pv_kw - load_kw

        if abs(calculated_setpoint) < MIN_BESS_POWER_KW:
            setpoint = 0.0
        else:
            setpoint = calculated_setpoint
    else:
        setpoint = handle.get("setpoint_kw", 0.0)

    # Hardware inverter clamp
    setpoint = max(-max_kw, min(max_kw, setpoint))

    # Strict SOC Guardrails
    if setpoint > 0 and soc >= SOC_MAX:
        _LOGGER.warning(
            f"BESS SOC at or above MAX ({soc:.1f}% >= {SOC_MAX}%). Blocking charge setpoint."
        )
        setpoint = 0.0
    elif setpoint < 0 and soc <= SOC_MIN:
        _LOGGER.warning(
            f"BESS SOC at or below MIN ({soc:.1f}% <= {SOC_MIN}%). Blocking discharge setpoint."
        )
        setpoint = 0.0

    handle["setpoint_kw"] = setpoint

    # Energy accumulation (+ = Charge, - = Discharge)
    if setpoint > 0:
        delta_energy_kwh = setpoint * dt_hours * eff
    elif setpoint < 0:
        delta_energy_kwh = (setpoint * dt_hours) / eff
    else:
        delta_energy_kwh = 0.0

    # Update and clamp SOC
    delta_soc = (delta_energy_kwh / handle["bess_capacity_kwh"]) * 100.0
    soc = max(SOC_MIN, min(SOC_MAX, soc + delta_soc))
    handle["soc"] = soc

    return soc, handle["setpoint_kw"]
```

Εικόνα 23 – Μέρος του κώδικα που ανανεώνει τις τιμές του BESS

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία ρεαλιστική αναπαράσταση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός μικροδικτύου, στην οποία οι μεταβολές της φωτοβολταϊκής παραγωγής και της κατάστασης φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης επηρεάζουν άμεσα τη διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης και τις αποφάσεις του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.

3.6 Ολοκλήρωση του Closed-Loop Συστήματος

Η ανάπτυξη των επιμέρους λογισμικών στοιχείων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες είχε ως τελικό στόχο την υλοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος ενεργειακής διαχείρισης, στο οποίο όλα τα υποσυστήματα συνεργάζονται μέσω μιας ενιαίας διαδικασίας συνεχούς ανατροφοδότησης (closed-loop operation).

Σε αντίθεση με μία απλή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εφαρμογών, η λειτουργία της προτεινόμενης πλατφόρμας βασίζεται σε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο συλλογής τηλεμετρίας, λήψης αποφάσεων, εφαρμογής σημάτων ελέγχου και επανεκτίμησης της κατάστασης του μικροδικτύου. Η συνεχής αυτή αλληλεπίδραση επιτρέπει στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας να προσαρμόζει δυναμικά τις αποφάσεις του σύμφωνα με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η διαδικασία ξεκινά με την παραγωγή τηλεμετρίας από τα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα. Οι σταθμοί φόρτισης, το φωτοβολταϊκό σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης παράγουν περιοδικά μετρήσεις, οι οποίες συλλέγονται από τα αντίστοιχα South Plugins του middleware και προωθούνται στον μηχανισμό συλλογής τηλεμετρίας.

Ο Custom Flex NorthPlugin επεξεργάζεται τα δεδομένα, πραγματοποιεί την απαραίτητη κανονικοποίηση και τα αποστέλλει στο FlexMeasures, όπου αποθηκεύονται ως χρονικές σειρές και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης. Παράλληλα, το FlexMeasures αξιοποιεί τις διαθέσιμες προβλέψεις φωτοβολταϊκής παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να υπολογίσει το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας του μικροδικτύου.

Βήμα	Περιγραφή
1	Παραγωγή τηλεμετρίας από τα ενεργειακά υποσυστήματα
2	Συλλογή δεδομένων από τα South Plugins

3	Κανονικοποίηση και αποστολή στο FlexMeasures
4	Ενημέρωση των χρονικών σειρών (Sensors)
5	Εκτέλεση ενεργειακής βελτιστοποίησης
6	Παραγωγή charging schedules και setpoints
7	Παραλαβή αποτελεσμάτων από το Flex Dispatcher plugin στο Fledge
8	Εφαρμογή των νέων εντολών στα υποσυστήματα
9	Παραγωγή νέας τηλεμετρίας και επανάληψη του κύκλου

Πίνακας 8 - Στάδια λειτουργίας του closed-loop μηχανισμού

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιστρέφουν στο Flex Dispatcher plugin στο Fledge, το οποίο αναλαμβάνει την εφαρμογή τους στα αντίστοιχα προσομοιωμένα υποσυστήματα. Οι σταθμοί φόρτισης ενημερώνονται με τα νέα charging schedules, ενώ το σύστημα αποθήκευσης λαμβάνει τις αντίστοιχες εντολές φόρτισης ή εκφόρτισης.

Η εφαρμογή των νέων εντολών μεταβάλλει τη συνολική ενεργειακή κατάσταση του μικροδικτύου. Οι μεταβολές αυτές αποτυπώνονται άμεσα στη νέα τηλεμετρία που παράγουν τα υποσυστήματα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας έναν συνεχή κύκλο λειτουργίας στον οποίο κάθε νέα διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται στα πιο πρόσφατα δεδομένα λειτουργίας.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει την αυτόματη προσαρμογή της λειτουργίας του μικροδικτύου σε μεταβολές της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, της κατάστασης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, της διαθέσιμης ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης και των συνθηκών του ηλεκτρικού δικτύου. Παράλληλα, αποδεικνύει ότι η συνεργασία των επιμέρους λογισμικών στοιχείων οδηγεί στη δημιουργία μίας ολοκληρωμένης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης και όχι απλώς ενός συνόλου ανεξάρτητων εφαρμογών.

Η επιτυχής ολοκλήρωση του closed-loop μηχανισμού αποτέλεσε το βασικό κριτήριο ολοκλήρωσης της υλοποίησης και δημιούργησε το απαραίτητο υπόβαθρο για την εκτέλεση των πειραματικών σεναρίων που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

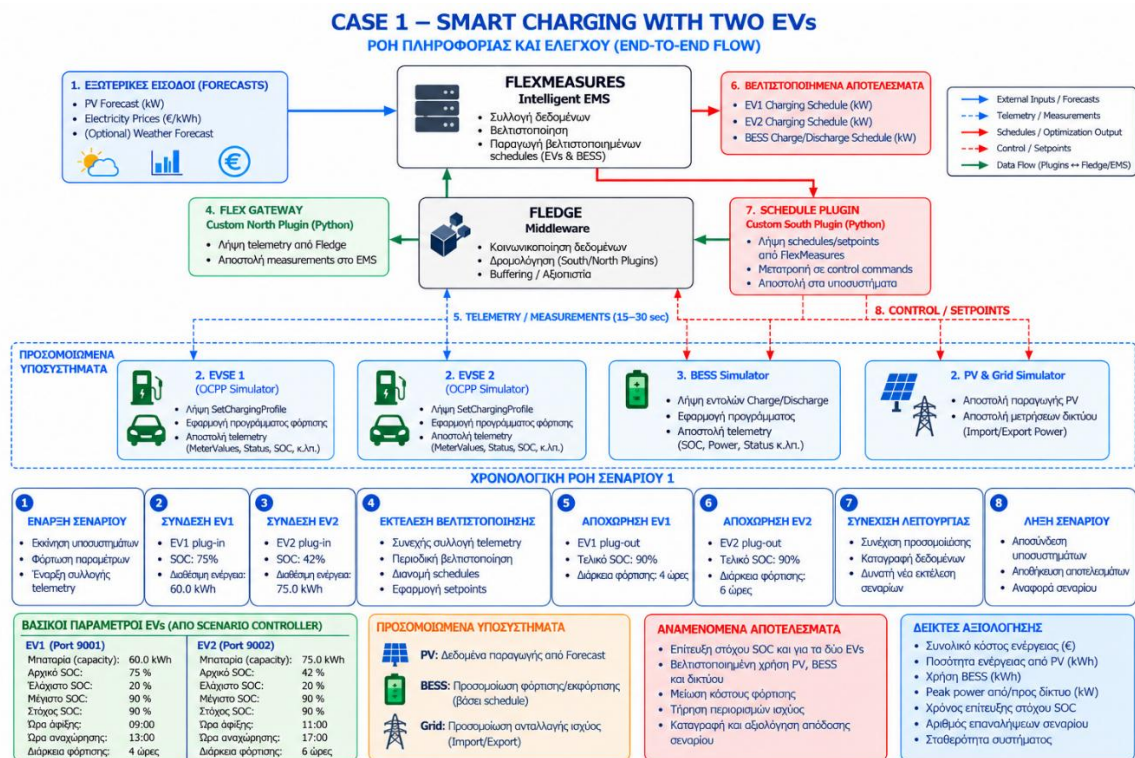
3.7 Σύνοψη Κεφαλαίου 3

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η υλοποίηση της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης. Περιγράφηκε το περιβάλλον ανάπτυξης, η παραμετροποίηση του FlexMeasures, οι μηχανισμοί συλλογής τηλεμετρίας, ο Scenario Controller και τα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα. Η ολοκλήρωση των επιμέρους λογισμικών στοιχείων οδήγησε στην υλοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης, ο οποίος αποτελεί τη βάση για την εκτέλεση των πειραματικών σεναρίων αξιολόγησης. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία αξιολόγησης της πλατφόρμας και τα σενάρια δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας της.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης και της ολοκλήρωσης της προτεινόμενης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης, κρίθηκε απαραίτητη η αξιολόγηση της λειτουργίας της μέσω ενός συνόλου πειραματικών σεναρίων. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας δεν είναι μόνο η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των επιμέρους λογισμικών στοιχείων, αλλά κυρίως η επαλήθευση της συνεργασίας τους ως ενός ενιαίου συστήματος closed-loop ενεργειακής διαχείρισης.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης, στο οποίο αναπαρίσταται ένα μικροδίκτυο αποτελούμενο από δύο σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, δύο ηλεκτρικά οχήματα, φωτοβολταϊκό σύστημα, σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Όλα τα υποσυστήματα λειτουργούν μέσω των μηχανισμών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο μέσω του middleware και του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.



Εικόνα 24 - Πειραματικό Σενάριο, Λειτουργική ροή του μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης της προτεινόμενης πλατφόρμας.

Για την αξιολόγηση της πλατφόρμας σχεδιάστηκαν σενάρια λειτουργίας που προσομοιώνουν ρεαλιστικές συνθήκες ενός σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Κατά την εκτέλεση των σεναρίων εξετάζεται η δυνατότητα του συστήματος να συλλέγει τηλεμετρία, να εκτελεί διαδικασίες ενεργειακής βελτιστοποίησης, να παράγει προγράμματα λειτουργίας και να εφαρμόζει αυτόματα τις παραγόμενες αποφάσεις στα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λειτουργία του συνολικού μηχανισμού closed-loop, καθώς και στη δυνατότητα της πλατφόρμας να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβολές της ενεργειακής κατάστασης του μικροδικτύου μέσω της συνεχούς ανατροφοδότησης των δεδομένων τηλεμετρίας.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται το περιβάλλον αξιολόγησης, οι παραδοχές της προσομοίωσης, τα σενάρια που εκτελέστηκαν και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργίας της προτεινόμενης πλατφόρμας.

4.1 Περιγραφή του Περιβάλλοντος Πειραματικής Αξιολόγησης

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να αναπαριστά με ρεαλιστικό τρόπο τη λειτουργία ενός μικροδικτύου σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Το περιβάλλον αυτό επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της συνεργασίας όλων των υποσυστημάτων της πλατφόρμας, χωρίς την ανάγκη χρήσης πραγματικού ενεργειακού εξοπλισμού.

Το υπό μελέτη μικροδίκτυο αποτελείται από δύο σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE 1 και EVSE 2), δύο προσομοιωμένα ηλεκτρικά οχήματα, φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS) και σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Όλα τα υποσυστήματα λειτουργούν μέσω των λογισμικών στοιχείων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω του middleware και του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.

Η τηλεμετρία των επιμέρους ενεργειακών πόρων συλλέγεται από τα αντίστοιχα South Plugins του Fledge και προωθείται μέσω του Custom Flex NorthPlugin στο FlexMeasures, όπου αποθηκεύεται ως χρονικές σειρές. Παράλληλα, οι υπηρεσίες προβλέψεων παρέχουν στο FlexMeasures δεδομένα σχετικά με τη φωτοβολταϊκή παραγωγή και τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Ο συντονισμός της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιείται από τον Scenario Controller, ο οποίος αναλαμβάνει την εκκίνηση του σεναρίου, τη διαμόρφωση των αρχικών συνθηκών λειτουργίας, την ενεργοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και την εφαρμογή των παραγόμενων προγραμμάτων λειτουργίας στα προσομοιωμένα ενεργειακά υποσυστήματα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πλήρης αυτοματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας και η επαναληψιμότητα των δοκιμών.

Στοιχείο	Πλήθος	Περιγραφή
EVSE Simulators	2	Προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης
EV Simulators	2	Προσομοιωμένα ηλεκτρικά οχήματα
PV/BESS Simulator	1	Προσομοίωση φωτοβολταϊκού και συστήματος αποθήκευσης
FlexMeasures EMS	1	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας
Fledge Middleware	1	Middleware συλλογής και διακίνησης δεδομένων
Scenario Controller	1	Εκτέλεση και συντονισμός των πειραμάτων
Forecast Services	2	Πρόβλεψη φωτοβολταϊκής παραγωγής και τιμών αγοράς

Πίνακας 9 - Βασικά στοιχεία του περιβάλλοντος αξιολόγησης

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όλα τα υποσυστήματα λειτουργούν ταυτόχρονα και ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, δημιουργώντας έναν συνεχή κύκλο συλλογής τηλεμετρίας, ενεργειακής βελτιστοποίησης και εφαρμογής αποφάσεων ελέγχου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την αξιολόγηση όχι μόνο των επιμέρους λογισμικών στοιχείων, αλλά κυρίως της ολοκληρωμένης λειτουργίας της πλατφόρμας ως ενός ενιαίου συστήματος ενεργειακής διαχείρισης.

Το περιβάλλον προσομοίωσης αναπτύχθηκε με γνώμονα τη δυνατότητα εύκολης παραμετροποίησης των πειραματικών σεναρίων. Παράμετροι όπως η αρχική κατάσταση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή, η κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης, οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και οι χρόνοι

σύνδεσης ή αποσύνδεσης των οχημάτων μπορούν να τροποποιηθούν εύκολα μέσω του Scenario Controller, επιτρέποντας τη δημιουργία διαφορετικών σεναρίων αξιολόγησης χωρίς μεταβολή της βασικής αρχιτεκτονικής της πλατφόρμας.

4.2 Παραδοχές και Παράμετροι Προσομοίωσης

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας βασίστηκε σε ένα σύνολο παραδοχών και παραμέτρων προσομοίωσης, οι οποίες επιλέχθηκαν ώστε να αναπαριστούν με ρεαλιστικό τρόπο τη λειτουργία ενός μικροδικτύου σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Οι παραδοχές αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα πειραματικά σενάρια, εξασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Αριθμός EVSE	2	-
Αριθμός EV	2	-
Χωρητικότητα μπαταρίας EV1	60	kWh
Χωρητικότητα μπαταρίας EV2	75	kWh
Αρχικό SoC EV1	75	%
Αρχικό SoC EV2	42	%
Ονομαστική ισχύς EVSE	11	kW
Ονομαστική ισχύς PV	40	kW
Χωρητικότητα BESS	80	kWh
Αρχικό SoC BESS	50	%
Telemetry Resolution	15	min
Optimization Resolution	15	min
Optimization Horizon	24	h

Πίνακας 10 - Παράμετροι προσομοίωσης

Για την προσομοίωση της υποδομής φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν δύο σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE), καθένας από τους οποίους εξυπηρετεί ένα προσομοιωμένο ηλεκτρικό όχημα. Τα δύο οχήματα παρουσιάζουν διαφορετική κατάσταση φόρτισης κατά τη σύνδεσή τους, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση της διαδικασίας δυναμικής κατανομής της διαθέσιμης ισχύος από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα προσομοιώνεται μέσω χρονοσειράς παραγόμενης ισχύος, η οποία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του σεναρίου σύμφωνα με την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολία για την ημέρα. Αντίστοιχα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση φόρτισής του και προσαρμόζει τη λειτουργία του σύμφωνα με τα προγράμματα φόρτισης ή εκφόρτισης που παράγει το FlexMeasures.

Η διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης εκτελείται περιοδικά σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας λαμβάνει υπόψη τις διαθέσιμες μετρήσεις τηλεμετρίας, τις προβλέψεις φωτοβολταϊκής παραγωγής, τις προβλέψεις τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και τους περιορισμούς λειτουργίας των ενεργειακών πόρων, παράγοντας νέο πρόγραμμα λειτουργίας για το μικροδίκτυο.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης θεωρείται ότι η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων πραγματοποιείται χωρίς απώλειες δεδομένων ή σημαντικές καθυστερήσεις μετάδοσης, επιτρέποντας την αξιολόγηση της λειτουργικότητας της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής χωρίς την επίδραση εξωτερικών παραγόντων επικοινωνίας.

Η διάρκεια κάθε πειραματικού σεναρίου επιλέχθηκε ώστε να περιλαμβάνει πολλαπλούς κύκλους ενεργειακής βελτιστοποίησης, επιτρέποντας την παρακολούθηση της εξέλιξης της κατάστασης του μικροδικτύου και της συμπεριφοράς του μηχανισμού closed-loop κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

4.3 Σενάριο Αξιολόγησης – Συντονισμένη Φόρτιση Δύο Ηλεκτρικών Οχημάτων

Το πειραματικό σενάριο σχεδιάστηκε με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας της προτεινόμενης πλατφόρμας υπό συνθήκες που προσεγγίζουν τη λειτουργία ενός πραγματικού μικροδικτύου σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Βασικός στόχος του σεναρίου είναι η επαλήθευση της δυνατότητας του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας να συλλέγει δεδομένα τηλεμετρίας από όλους τους ενεργειακούς πόρους, να εκτελεί

διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης και να εφαρμόζει αυτόματα τα παραγόμενα προγράμματα λειτουργίας στους σταθμούς φόρτισης.

Κατά την έναρξη του σεναρίου ενεργοποιείται ο Scenario Controller, ο οποίος αρχικοποιεί την κατάσταση του μικροδικτύου και θέτει τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας των επιμέρους ενεργειακών υποσυστημάτων. Οι δύο προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης τίθενται σε κατάσταση αναμονής, ενώ τα αντίστοιχα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται στους φορτιστές με προκαθορισμένη αρχική κατάσταση φόρτισης (SoC).

Παράλληλα, το φωτοβολταϊκό σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τίθενται σε λειτουργία, παράγοντας δεδομένα τηλεμετρίας σύμφωνα με τις παραμέτρους του σεναρίου. Οι υπηρεσίες προβλέψεων ενημερώνουν το FlexMeasures με τις αντίστοιχες προβλέψεις φωτοβολταϊκής παραγωγής και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Με την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης, τα South Plugins του Fledge αρχίζουν να συλλέγουν τηλεμετρία από όλα τα προσομοιωμένα υποσυστήματα. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω του Custom Flex NorthPlugin στο FlexMeasures, όπου αποθηκεύονται ως χρονικές σειρές και χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση της τρέχουσας ενεργειακής κατάστασης του μικροδικτύου.

Αφού συγκεντρωθούν οι απαραίτητες πληροφορίες, το Fledge Dispatcher plugin ενεργοποιεί την εκτέλεση της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης. Το FlexMeasures λαμβάνει υπόψη τις διαθέσιμες μετρήσεις, τις προβλέψεις παραγωγής και τους περιορισμούς λειτουργίας των ενεργειακών πόρων και παράγει βελτιστοποιημένα προγράμματα φόρτισης για κάθε σταθμό φόρτισης, καθώς και τις αντίστοιχες εντολές λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης.

Τα παραγόμενα schedules επιστρέφουν στο Fledge Dispatcher plugin, το οποίο τα διανέμει στους προσομοιωμένους σταθμούς φόρτισης και στο σύστημα αποθήκευσης. Οι νέες εντολές εφαρμόζονται άμεσα από τα αντίστοιχα υποσυστήματα, προκαλώντας μεταβολές στην κατανάλωση ισχύος, στην κατάσταση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και στη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης.

Οι μεταβολές αυτές καταγράφονται από τους μηχανισμούς τηλεμετρίας και αποστέλλονται εκ νέου στο FlexMeasures, ολοκληρώνοντας έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας του μηχανισμού closed-loop. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά καθ' όλη τη διάρκεια

του πειράματος, επιτρέποντας στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας να προσαρμόζει δυναμικά τις αποφάσεις του σύμφωνα με την πραγματική κατάσταση του μικροδικτύου.

Στόχος αξιολόγησης	Περιγραφή
Συλλογή τηλεμετρίας	Επιβεβαίωση ότι όλα τα υποσυστήματα αποστέλλουν μετρήσεις στο FlexMeasures.
Εκτέλεση βελτιστοποίησης	Επιτυχής παραγωγή charging schedules από το EMS.
Εφαρμογή schedules	Ορθή αποστολή και εφαρμογή των charging profiles στους EVSE και των εντολών στο BESS.
Closed-loop λειτουργία	Επιβεβαίωση ότι η νέα τηλεμετρία επηρεάζει τον επόμενο κύκλο βελτιστοποίησης.
Ολοκλήρωση διεπαφών	Επιτυχής συνεργασία όλων των software components χωρίς σφάλματα επικοινωνίας.

Πίνακας 11 – Στόχοι του Σεναρίου

Το συγκεκριμένο σενάριο επιτρέπει την αξιολόγηση της ορθής συνεργασίας όλων των επιμέρους λογισμικών στοιχείων της πλατφόρμας, επιβεβαιώνοντας ότι η πληροφορία μεταφέρεται επιτυχώς από το επίπεδο της τηλεμετρίας μέχρι την εφαρμογή των αποφάσεων ενεργειακής διαχείρισης και την επανατροφοδότηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.

Ανταλλαγή Μηνυμάτων κατά την Εκτέλεση του Σεναρίου Οχημάτων

Κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου πραγματοποιείται συνεχής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Η ανταλλαγή αυτή ακολουθεί τη λογική του closed-loop μηχανισμού και περιλαμβάνει αρχικά τη συλλογή τηλεμετρίας, στη συνέχεια την ενεργειακή βελτιστοποίηση και τέλος την αποστολή των παραγόμενων εντολών προς τους ενεργειακούς πόρους.

Ένα ενδεικτικό στιγμιότυπο της διαδικασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. Το EVSE παράγει μέτρηση ισχύος και κατάστασης.

2. Το South Plugin μεταφέρει τη μέτρηση στο Fledge.
3. Ο Custom Flex NorthPlugin ανακτά και επεξεργάζεται τη μέτρηση.
4. Η μέτρηση αποστέλλεται μέσω REST API στο FlexMeasures.
5. Το FlexMeasures ενημερώνει την αντίστοιχη χρονική σειρά.
6. Εκτελείται ο αλγόριθμος ενεργειακής βελτιστοποίησης.
7. Παράγεται νέο optimized schedule.
8. Το schedule ανακτάται από τον μηχανισμό ελέγχου.
9. Η αντίστοιχη εντολή προωθείται προς το EVSE ή το BESS.
10. Η νέα κατάσταση του ενεργειακού πόρου παράγει νέα τηλεμετρία και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Βήμα	Αποστολέας	Παραλήπτης	Τύπος	Περιεχόμενο
1	EVSE 1	Fledge	Telemetry	Power, Status, EV SoC
2	Fledge	Telemetry Component	Telemetry	Sensor values
3	Telemetry Component	FlexMeasures	REST/JSON	Timestamp, sensor, value
4	FlexMeasures	Βελτιστοποίηση	Data	Telemetry + PV forecast + price
5	FlexMeasures	Dispatcher	Schedule	EVSE/BESS schedule
6	Dispatcher	EVSE 1	Control	Charging setpoint
7	Dispatcher	BESS	Control	Charge/discharge setpoint
8	EVSE/BESS	Fledge	Telemetry	Νέα κατάσταση
9	Fledge	FlexMeasures	REST/JSON	Νέα τηλεμετρία

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μεθοδολογία αξιολόγησης της προτεινόμενης πλατφόρμας, καθώς και το πειραματικό σενάριο που χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση της λειτουργίας της. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση του σεναρίου αξιολόγησης και αναλύεται η συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

Η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στην εξέταση των επιμέρους λογισμικών στοιχείων, αλλά επικεντρώνεται κυρίως στην ολοκληρωμένη λειτουργία της πλατφόρμας ως ενός συστήματος closed-loop ενεργειακής διαχείρισης. Για τον σκοπό αυτό εξετάζεται η επιτυχής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ όλων των υποσυστημάτων, η ορθή εκτέλεση της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης, η εφαρμογή των παραγόμενων προγραμμάτων λειτουργίας και η συνεχής ανατροφοδότηση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας μέσω της νέας τηλεμετρίας.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ακολουθώντας τη φυσική ροή λειτουργίας της πλατφόρμας, ξεκινώντας από τη συλλογή της τηλεμετρίας και καταλήγοντας στην εφαρμογή των αποφάσεων ενεργειακής διαχείρισης και στην επίδρασή τους στη συνολική λειτουργία του μικροδικτύου.

5.1 Επαλήθευση της Συλλογής Τηλεμετρίας

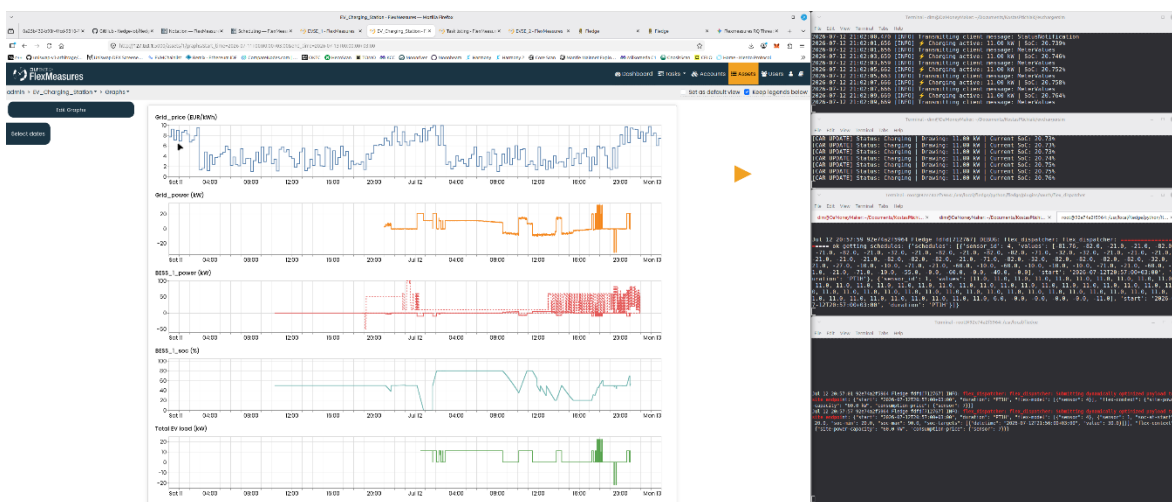
Η πρώτη φάση της πειραματικής αξιολόγησης αφορούσε την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του μηχανισμού συλλογής τηλεμετρίας. Η επιτυχής λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας, καθώς όλες οι διαδικασίες ενεργειακής βελτιστοποίησης βασίζονται στα δεδομένα που λαμβάνονται από τα επιμέρους ενεργειακά υποσυστήματα.

Κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου, οι δύο προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης, τα αντίστοιχα ηλεκτρικά οχήματα, το φωτοβολταϊκό σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης παρήγαγαν περιοδικά δεδομένα τηλεμετρίας, τα οποία συλλέχθηκαν μέσω των South Plugins του Fledge. Στη συνέχεια, ο Custom Flex NorthPlugin συγκέντρωσε τις διαθέσιμες μετρήσεις, πραγματοποίησε τον απαραίτητο μετασχηματισμό τους και τις προώθησε στο FlexMeasures μέσω του αντίστοιχου REST API.

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος δεν παρατηρήθηκαν απώλειες δεδομένων ή αστοχίες κατά τη διαδικασία μεταφοράς της τηλεμετρίας. Όλες οι μετρήσεις αποθηκεύτηκαν επιτυχώς στις αντίστοιχες χρονικές σειρές του FlexMeasures και ήταν άμεσα διαθέσιμες στις υπηρεσίες ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Η επιτυχής ενημέρωση των αισθητήρων του FlexMeasures επιβεβαιώθηκε τόσο μέσω της διεπαφής διαχείρισης της πλατφόρμας όσο και μέσω των αρχείων καταγραφής (logs) των επιμέρους λογισμικών στοιχείων. Οι χρονικές σημάνσεις (timestamps) των μετρήσεων παρουσίασαν χρονική συνέπεια, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η ακολουθία συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χωρίς ασυνέπειες.

Επιπλέον, επαληθεύθηκε η σωστή αντιστοίχιση κάθε μέτρησης με τον αντίστοιχο αισθητήρα του FlexMeasures. Οι μετρήσεις ισχύος των σταθμών φόρτισης, η κατάσταση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και οι μεταβλητές λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης αποθηκεύτηκαν στους αντίστοιχους Sensors που είχαν δημιουργηθεί κατά τη διαδικασία παραμετροποίησης του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.



Εικόνα 25 - Ενημέρωση των χρονικών σειρών τηλεμετρίας στο FlexMeasures κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης φάσης επιβεβαιώνουν ότι ο μηχανισμός συλλογής τηλεμετρίας λειτουργεί αξιόπιστα και παρέχει στο FlexMeasures πλήρη και ενημερωμένη εικόνα της ενεργειακής κατάστασης του μικροδικτύου, δημιουργώντας τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την εκτέλεση της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Υποσύστημα	Μεταβλητές	Κατάσταση
EVSE 1	Power, Status	✓
EV 1	SoC	✓
EVSE 2	Power, Status	✓
EV 2	SoC	✓
PV	Generated Power	✓
BESS	SoC, Power	✓
Grid	Import / Export	✓

Πίνακας 12 - Επαλήθευση συλλογής τηλεμετρίας

Έλεγχος	Αποτέλεσμα
South Plugin → Fledge	Επιτυχής
Fledge → Telemetry Component	Επιτυχής
Telemetry Component → REST API	Επιτυχής
REST API → PostgreSQL	Επιτυχής
PostgreSQL → FlexMeasures	Επιτυχής

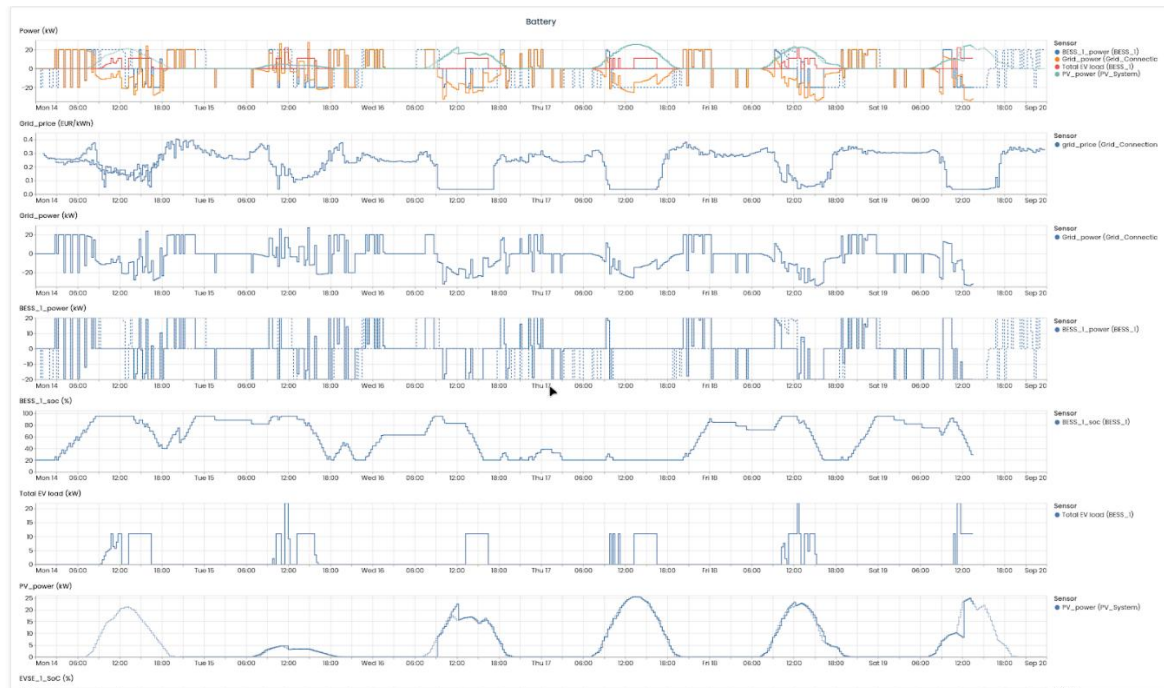
Πίνακας 13 - Έλεγχοι επαλήθευσης

5.2 Αποτελέσματα Ενεργειακής Βελτιστοποίησης

Μετά την επιτυχή συλλογή και αποθήκευση της τηλεμετρίας στο FlexMeasures, το επόμενο στάδιο της αξιολόγησης αφορούσε την εκτέλεση της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης και την παραγωγή των αντίστοιχων προγραμμάτων λειτουργίας (optimized schedules).

Σε κάθε κύκλο λειτουργίας, το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας αξιοποιεί την τρέχουσα κατάσταση του μικροδικτύου, τις διαθέσιμες προβλέψεις φωτοβολταϊκής παραγωγής, τις προβλέψεις τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και τους περιορισμούς λειτουργίας των ενεργειακών πόρων, προκειμένου να υπολογίσει το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας για το χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης.

Κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου, η διαδικασία βελτιστοποίησης ολοκληρώθηκε επιτυχώς σε όλους τους κύκλους λειτουργίας χωρίς να παρουσιαστούν σφάλματα κατά την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης ή κατά την παραγωγή των αποτελεσμάτων. Για κάθε κύκλο δημιουργήθηκαν νέα schedules, τα οποία αντιστοιχούν στις βέλτιστες τιμές ισχύος φόρτισης των σταθμών φόρτισης και στις αντίστοιχες εντολές λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.



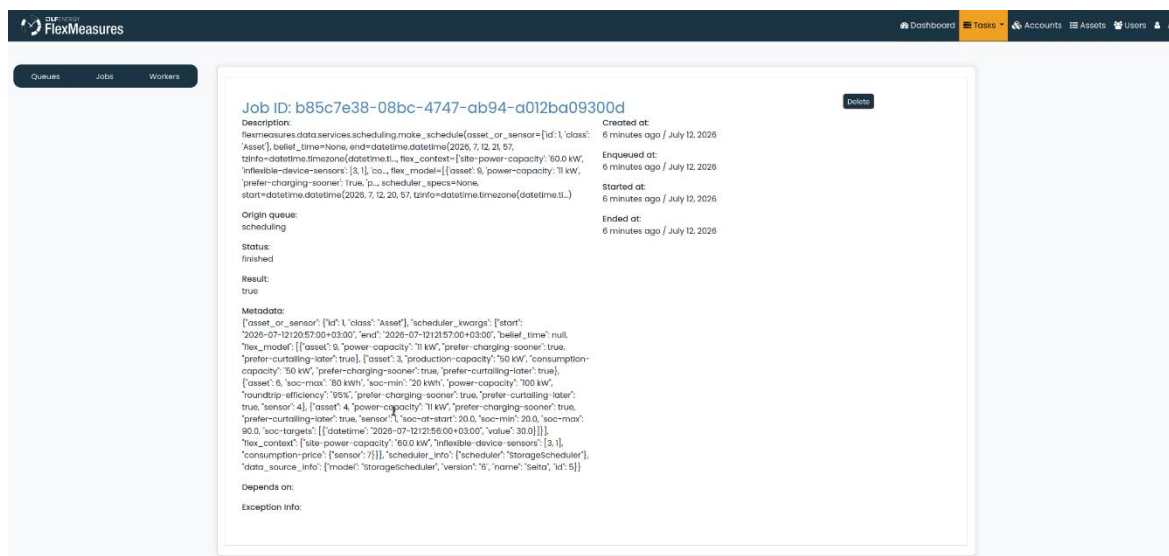
Εικόνα 26 – Αποτέλεσμα λειτουργίας του συστήματος για 5 συνεχόμενες ημέρες

Τα παραγόμενα schedules αποθηκεύτηκαν στο FlexMeasures και έγιναν διαθέσιμα μέσω των αντίστοιχων διεπαφών (REST APIs), από όπου ανακτήθηκαν από το Flex Dispatcher plugin στο Fledge για την εφαρμογή τους στα προσομοιωμένα υποσυστήματα.

Η επιτυχής παραγωγή των schedules επιβεβαιώθηκε τόσο μέσω της διεπαφής του FlexMeasures όσο και μέσω των αρχείων καταγραφής της εφαρμογής. Για κάθε κύκλο βελτιστοποίησης καταγράφηκαν ο χρόνος εκτέλεσης, ο χρονικός ορίζοντας του προγράμματος και οι αντίστοιχες τιμές ισχύος που υπολογίστηκαν για κάθε ενεργειακό πόρο.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης προσαρμοζόταν δυναμικά στις μεταβολές της ενεργειακής κατάστασης του μικροδικτύου. Κάθε νέα τηλεμετρία που συλλεγόταν από τους σταθμούς φόρτισης, το φωτοβολταϊκό σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιούνταν ως είσοδος στον επόμενο κύκλο βελτιστοποίησης, επιτρέποντας στο Σύστημα Διαχείρισης

Ενέργειας να αναθεωρεί τα προγράμματα λειτουργίας σύμφωνα με την πραγματική κατάσταση του συστήματος.



Εικόνα 27 - Βελτιστοποιημένο πρόγραμμα λειτουργίας (Optimized Schedule) που παρήχθη από το FlexMeasures κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου.

Η επιτυχής ολοκλήρωση της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης αποδεικνύει ότι το FlexMeasures ενσωματώθηκε επιτυχώς στην προτεινόμενη πλατφόρμα και συνεργάζεται αποτελεσματικά με τα υπόλοιπα λογισμικά στοιχεία, παρέχοντας δυναμικές αποφάσεις ενεργειακής διαχείρισης οι οποίες εφαρμόζονται αυτόματα στο μικροδίκτυο.

Κύκλος	Βελτιστοποίηση	Schedule	Κατάσταση
1	Επιτυχής	Δημιουργήθηκε	✓
2	Επιτυχής	Ενημερώθηκε	✓
3	Επιτυχής	Ενημερώθηκε	✓

Πίνακας 14 - Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης

Ενεργειακός πόρος	Παράμετρος	Παραγόμενο αποτέλεσμα
EVSE 1	Charging Power	Dynamic Schedule
EVSE 2	Charging Power	Dynamic Schedule
BESS	Charge / Discharge	Optimized Setpoints

Πίνακας 15 - Περιεχόμενο του παραγόμενου schedule

5.3 Εφαρμογή των Προγραμμάτων Λειτουργίας στα Υποσυστήματα

Η παραγωγή των βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας αποτελεί μόνο το πρώτο στάδιο της διαδικασίας ενεργειακής διαχείρισης. Η πραγματική αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας απαιτεί την επιτυχή εφαρμογή των παραγόμενων schedules στα αντίστοιχα ενεργειακά υποσυστήματα και την επιβεβαίωση ότι αυτά ανταποκρίνονται στις νέες εντολές λειτουργίας.

Μετά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου ενεργειακής βελτιστοποίησης, το Flex Dispatcher plugin στο Fledge ανακτά τα παραγόμενα schedules μέσω του REST API του FlexMeasures και τα προωθεί στα αντίστοιχα προσομοιωμένα υποσυστήματα. Για κάθε σταθμό φόρτισης αποστέλλεται το αντίστοιχο πρόγραμμα φόρτισης (Charging Schedule), ενώ για το σύστημα αποθήκευσης αποστέλλονται οι αντίστοιχες εντολές φόρτισης ή εκφόρτισης.

Κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου διαπιστώθηκε ότι όλα τα schedules παραλήφθηκαν επιτυχώς από τα αντίστοιχα υποσυστήματα και εφαρμόστηκαν χωρίς σφάλματα. Οι προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης προσαρμόστηκαν στις νέες τιμές ισχύος που όριζε το FlexMeasures, ενώ το σύστημα αποθήκευσης ενημέρωσε αντίστοιχα την κατάσταση λειτουργίας του σύμφωνα με τις εντολές του EMS.

Η επιτυχής εφαρμογή των schedules επιβεβαιώθηκε μέσω της παραγόμενης τηλεμετρίας. Οι νέες τιμές ισχύος φόρτισης, η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και οι μεταβολές της κατάστασης φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης συμφωνούσαν με τα προγράμματα λειτουργίας που είχαν παραχθεί από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.

Η συγκεκριμένη παρατήρηση επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη πλατφόρμα δεν περιορίζεται στην παραγωγή θεωρητικών αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης, αλλά είναι σε θέση να εφαρμόζει αυτόματα τις αποφάσεις του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας στα ενεργειακά υποσυστήματα, ολοκληρώνοντας τον κύκλο ελέγχου του μικροδικτύου.

Η επιτυχής εφαρμογή των αποφάσεων αποτελεί βασικό στοιχείο της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος, καθώς επιτρέπει τη συνεχή προσαρμογή της λειτουργίας του μικροδικτύου στις μεταβαλλόμενες συνθήκες παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

5.4 Επαλήθευση της Closed-Loop Λειτουργίας

Το τελικό στάδιο της πειραματικής αξιολόγησης αφορούσε την επιβεβαίωση της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος ως ολοκληρωμένου μηχανισμού closed-loop ενεργειακής διαχείρισης. Σε αντίθεση με μία απλή διαδικασία παραγωγής και εφαρμογής προγραμμάτων λειτουργίας, η λειτουργία ενός συστήματος closed-loop προϋποθέτει ότι κάθε απόφαση που λαμβάνεται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας επηρεάζει τη μελλοντική κατάσταση του μικροδικτύου και συνεπώς τις αποφάσεις που θα ληφθούν στους επόμενους κύκλους βελτιστοποίησης.

Κατά την εκτέλεση του πειραματικού σεναρίου παρατηρήθηκε ότι μετά την εφαρμογή των charging schedules μεταβλήθηκαν οι καταστάσεις λειτουργίας όλων των ενεργειακών υποσυστημάτων. Η ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, η λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης και η ανταλλαγή ισχύος με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο προσαρμόστηκαν σύμφωνα με τις αποφάσεις που είχαν παραχθεί από το FlexMeasures.

Οι μεταβολές αυτές καταγράφηκαν άμεσα μέσω της νέας τηλεμετρίας που παρήγαγαν τα προσομοιωμένα υποσυστήματα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τον μηχανισμό τηλεμετρίας, αποθηκεύτηκαν στο FlexMeasures και χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στον επόμενο κύκλο ενεργειακής βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό κάθε νέα διαδικασία βελτιστοποίησης βασίστηκε στην πραγματική κατάσταση του μικροδικτύου και όχι στις αρχικές συνθήκες του σεναρίου.

Η συνεχής επανάληψη του κύκλου συλλογής τηλεμετρίας, ενεργειακής βελτιστοποίησης και εφαρμογής αποφάσεων επιβεβαιώνει ότι όλα τα λογισμικά στοιχεία της προτεινόμενης πλατφόρμας συνεργάζονται επιτυχώς, σχηματίζοντας έναν πλήρως λειτουργικό μηχανισμό closed-loop ενεργειακής διαχείρισης.

Στάδιο	Κατάσταση
Συλλογή τηλεμετρίας	✓
Ενημέρωση Sensors	✓
Εκτέλεση βελτιστοποίησης	✓

Παραγωγή Schedules	✓
Ανάκτηση Schedules	✓
Εφαρμογή στα EVSE	✓
Εφαρμογή στο BESS	✓
Παραγωγή νέας τηλεμετρίας	✓
Επανεκκίνηση κύκλου	✓

Πίνακας 16 - Επαλήθευση Closed-Loop

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν παρατηρήθηκαν ασυνέπειες στη ροή της πληροφορίας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Οι μετρήσεις τηλεμετρίας ενημέρωναν επιτυχώς τις χρονικές σειρές του FlexMeasures, οι διαδικασίες βελτιστοποίησης ολοκληρώνονταν επιτυχώς και τα νέα προγράμματα λειτουργίας εφαρμόζονταν στα προσομοιωμένα υποσυστήματα χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση.

Η επιτυχής ολοκλήρωση του μηχανισμού closed-loop αποτελεί το σημαντικότερο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας, καθώς αποδεικνύει ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δεν περιορίζεται στη διασύνδεση ανεξάρτητων εφαρμογών, αλλά υλοποιεί μία ολοκληρωμένη πλατφόρμα ενεργειακής διαχείρισης ικανή να λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις και να προσαρμόζει δυναμικά τη λειτουργία του μικροδικτύου.

5.5 Συζήτηση και Αποτίμηση της Προτεινόμενης Πλατφόρμας

Η πειραματική αξιολόγηση της προτεινόμενης πλατφόρμας κατέδειξε ότι η αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε είναι σε θέση να υποστηρίξει ολοκληρωμένα τη λειτουργία ενός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας για μικροδίκτυα σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η επιτυχής ολοκλήρωση όλων των σταδίων της διαδικασίας, από τη συλλογή της τηλεμετρίας μέχρι την εφαρμογή των βελτιστοποιημένων προγραμμάτων λειτουργίας, επιβεβαιώνει την ορθή συνεργασία των επιμέρους λογισμικών στοιχείων και την αποτελεσματική λειτουργία της προτεινόμενης πλατφόρμας ως ενός ενιαίου πληροφοριακού συστήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της υλοποίησης αποτελεί ο σαφής διαχωρισμός των επιμέρους λειτουργιών της πλατφόρμας. Το FlexMeasures χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ως Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, το Fledge ως middleware συλλογής δεδομένων, ενώ οι μηχανισμοί τηλεμετρίας, προσομοίωσης και ελέγχου σεναρίων αναπτύχθηκαν ως ανεξάρτητα λογισμικά στοιχεία. Η αρχιτεκτονική αυτή μειώνει τον βαθμό σύζευξης μεταξύ των υποσυστημάτων, διευκολύνει τη συντήρηση του λογισμικού και επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση ή επέκταση επιμέρους λειτουργικών μονάδων χωρίς να επηρεάζεται η συνολική λειτουργία της πλατφόρμας.

Η χρήση προσομοιωμένων ενεργειακών υποσυστημάτων επέτρεψε την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του μηχανισμού ενεργειακής διαχείρισης χωρίς την ανάγκη χρήσης πραγματικού εξοπλισμού. Παρότι η προσέγγιση αυτή προσφέρει σημαντική ευελιξία κατά την ανάπτυξη και την αποσφαλμάτωση του συστήματος, δεν μπορεί να αναπαραστήσει πλήρως όλες τις ιδιαιτερότητες ενός πραγματικού περιβάλλοντος λειτουργίας, όπως καθυστερήσεις επικοινωνίας, μεταβολές στη συμπεριφορά του εξοπλισμού ή απρόβλεπτα σφάλματα συσκευών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η διαδικασία ολοκλήρωσης των διεπαφών επικοινωνίας μεταξύ των επιμέρους λογισμικών στοιχείων. Η διασύνδεση του FlexMeasures, του Fledge, των προσομοιωμένων υποσυστημάτων και του Scenario Controller απαιτήσε τον σχεδιασμό μηχανισμών ανταλλαγής δεδομένων, συγχρονισμού και διαχείρισης της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο. Η επιτυχής ολοκλήρωση των διεπαφών αυτών αποτέλεσε βασική προϋπόθεση για την υλοποίηση του μηχανισμού closed-loop και συνιστά μία από τις σημαντικότερες τεχνικές συνεισφορές της παρούσας εργασίας.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη πλατφόρμα μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη βάση για την ανάπτυξη συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης μικροδικτύων. Η υλοποίηση αποδεικνύει ότι είναι δυνατή η ενοποίηση εργαλείων ανοικτού λογισμικού με εξειδικευμένα λογισμικά στοιχεία, δημιουργώντας μία επεκτάσιμη αρχιτεκτονική που μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας και σε μελλοντικές εφαρμογές έξυπνης ενεργειακής διαχείρισης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την ανάπτυξη και την ολοκλήρωση μίας πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης για μικροδίκτυα σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, αξιοποιώντας τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού και σύγχρονες αρχιτεκτονικές λογισμικού. Βασικός στόχος ήταν η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μηχανισμού closed-loop, ο οποίος να είναι σε θέση να συλλέγει δεδομένα τηλεμετρίας, να εκτελεί διαδικασίες ενεργειακής βελτιστοποίησης και να εφαρμόζει αυτόματα τις παραγόμενες αποφάσεις στα επιμέρους ενεργειακά υποσυστήματα.

Στο πλαίσιο της εργασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική λογισμικού, η οποία συνδυάζει το FlexMeasures ως Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, το Fledge ως middleware συλλογής και διαχείρισης δεδομένων, καθώς και ένα σύνολο εξειδικευμένων λογισμικών στοιχείων που αναπτύχθηκαν ειδικά για τις ανάγκες της πλατφόρμας. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται ο μηχανισμός συλλογής τηλεμετρίας, ο Scenario Controller, οι προσομοιωμένοι σταθμοί φόρτισης, οι προσομοιωτές ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και ο προσομοιωτής του φωτοβολταϊκού συστήματος και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

Η σημαντικότερη συνεισφορά της εργασίας δεν περιορίζεται στην αξιοποίηση υπαρχόντων εργαλείων ανοικτού λογισμικού, αλλά στην επιτυχή ολοκλήρωσή τους σε μία ενιαία λειτουργική πλατφόρμα. Αναπτύχθηκαν οι απαραίτητοι μηχανισμοί διασύνδεσης μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, υλοποιήθηκαν οι διεπαφές επικοινωνίας και επιτεύχθηκε η αυτοματοποιημένη ανταλλαγή δεδομένων που απαιτείται για τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.

Η πειραματική αξιολόγηση επιβεβαίωσε την ορθή λειτουργία όλων των επιμέρους στοιχείων της πλατφόρμας. Η τηλεμετρία συλλέχθηκε και αποθηκεύτηκε επιτυχώς στο FlexMeasures, οι διαδικασίες ενεργειακής βελτιστοποίησης εκτελέστηκαν χωρίς προβλήματα, τα παραγόμενα προγράμματα λειτουργίας εφαρμόστηκαν στα προσομοιωμένα υποσυστήματα και η νέα κατάσταση του μικροδικτύου χρησιμοποιήθηκε στους επόμενους κύκλους βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό επαληθεύτηκε η επιτυχής λειτουργία του μηχανισμού closed-loop που αποτέλεσε τον βασικό στόχο της εργασίας.

Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε την ευελιξία που προσφέρει η χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα στον σχεδιασμό προηγμένων συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης. Η αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε χαρακτηρίζεται από υψηλή επεκτασιμότητα, καθώς επιτρέπει την προσθήκη νέων ενεργειακών πόρων, την αντικατάσταση προσομοιωμένων υποσυστημάτων από πραγματικές συσκευές και την προσαρμογή σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας χωρίς ουσιαστικές αλλαγές στον πυρήνα της πλατφόρμας.

Παρότι η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης, η συνολική αρχιτεκτονική σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε να μπορεί να υποστηρίξει μελλοντικά πραγματικές εγκαταστάσεις μικροδικτύων και σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η αντικατάσταση των προσομοιωμένων υποσυστημάτων από πραγματικό εξοπλισμό, η διασύνδεση με εμπορικούς φορτιστές OCPP, η ενσωμάτωση πραγματικών μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και η αξιοποίηση προηγμένων αλγορίθμων πρόβλεψης αποτελούν φυσικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

Συνολικά, η εργασία απέδειξε ότι είναι εφικτή η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης και επεκτάσιμης πλατφόρμας ενεργειακής διαχείρισης βασισμένης σε τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού, η οποία υποστηρίζει τη συνεχή συλλογή τηλεμετρίας, τη δυναμική ενεργειακή βελτιστοποίηση και την αυτόματη εφαρμογή αποφάσεων ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών διαχείρισης ενέργειας και έξυπνων ενεργειακών υποδομών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Κώδικας και συνοδευτικό υλικό

Ο πηγαίος κώδικας των εφαρμογών, των προσομοιωτών, των custom plugins και του Scenario Controller που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι διαθέσιμος στο GitHub repository της εργασίας.

Αποθετήριο GitHub: <https://github.com/kanda-ghub/Smart-vehicle-charging-station/tree/develop>

Το repository περιλαμβάνει τον κώδικα των επιμέρους υποσυστημάτων, τα αρχεία παραμετροποίησης και τα απαραίτητα αρχεία για την αναπαραγωγή του πειραματικού περιβάλλοντος. Η διάθεση του κώδικα επιτρέπει την αναπαραγωγή των βασικών πειραμάτων και διευκολύνει την περαιτέρω αξιοποίηση και επέκταση της προτεινόμενης λύσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Momoh, Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] FlexMeasures, Official Documentation. Available: <https://FlexMeasures.readthedocs.io/> & FlexMeasures, GitHub Repository. Available: <https://github.com/FlexMeasures/FlexMeasures>
- [3] Eclipse Foundation, Fledge Documentation. Available: <https://fledge-iot.readthedocs.io/> & <https://github.com/fledge-iot/fledge>
- [4] Open Charge Alliance, Open Charge Point Protocol (OCPP) 1.6 JSON Specification, 2015.
- [5] Python Software Foundation, Python Documentation. Available: <https://docs.python.org/3/>
- [6] Docker Inc., Docker Documentation. Available: <https://docs.docker.com/> & <https://docs.docker.com/compose/>
- [7] IEC 61851-1:2017, Electric Vehicle Conductive Charging System – Part 1: General Requirements, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- [8] PostgreSQL Global Development Group, PostgreSQL Documentation. Available: <https://www.postgresql.org/docs/>