



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΟΜΑΔΩΝ
ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΝΤΑΙ
ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΟΥ ΑΝΤΡΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Αναπλ. Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος

Χανιά, Οκτώβριος 2020

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε ομαδοποιημένα κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου καθώς και τους φίλους μου για την αγάπη και υποστήριξη που μου έδειξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Είναι ευρέως γνωστό ότι υπάρχει συνεχόμενη αύξηση στη συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ιδίως στον οικιακό τομέα. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη ενεργειακή ζήτηση σε συνδυασμό με την τεχνολογική ανάπτυξη, τα οποία αποτελούν καθοριστικό ρόλο στη μελέτη αυτών των συστημάτων με σκοπό την βελτιστοποιημένη παραγωγή και διαχείριση ενέργειας. Επίσης, με την αυξανόμενη ενσωμάτωση των οικιακών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (Home Energy Management Systems. HEMS), η αποκεντρωμένη διαχείριση της ενέργειας καθίσταται σημαντική για τη βέλτιστη λειτουργία στις έξυπνες γειτονιές κτηρίων. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένας μηχανισμός συντονισμού για την αποτελεσματική διαχείριση φορτίων σε γειτονιές κτηρίων χρησιμοποιώντας κατάλληλα συστήματα τιμολόγησης.

Στην παρούσα εργασία γίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας ενός οικιακού συστήματος το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο. Το σύστημα αυτό αποτελείται από κατοικίες που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή με στόχο την βελτιστοποίηση της χρήσης της συνολικής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του ηλεκτρικού κόστους μέσω του χρονοπρογραμματισμού των ελεγχόμενων συσκευών. Η βελτιστοποίηση της συνολικής ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του ηλεκτρικού κόστους υλοποιήθηκε με τον αλγόριθμο Particle Swarm Optimization (PSO) βρίσκοντας τη βέλτιστη ώρα λειτουργίας των ελεγχόμενων συσκευών. Στην αρχή της εργασίας, γίνεται περιγραφή ενός μικροδικτύου το οποίο αποτελείται από κατοικίες όπου η κάθε μια έχει το δικό της Φ/Β σύστημα για παραγωγή ισχύος καθώς και συστοιχίες μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας. Οι κατοικίες είναι διασυνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο και υπάρχει η δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των κατοικιών. Μέσω προσομοίωσης, η οποία περιγράφει τη λειτουργία του μικροδικτύου, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Τέλος, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων από τρία σενάρια λειτουργίας (baseline, συντονισμός group-based και συντονισμός turn-based) προκειμένου να εξακριβωθεί η βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου.

Abstract

It is well known that there is a steady increase in the participation of Renewable Energy Sources (RES) in electricity generation, especially in the residential sector. This is due to the increased energy demand combined with the technological development, which play a determinant role in the study of these systems in order to optimize the energy production and management. Also, with the increasing integration of Home Energy Management Systems (HEMS), decentralized energy management becomes important for optimal operation in smart neighborhoods. Therefore, it is necessary to design a coordination mechanism for the effective management of loads in neighborhoods using appropriate pricing systems.

This dissertation simulates the operation of a home system which is connected to the electricity grid. This system consists of houses located in the same geographical area in order to optimize the total energy usage and minimize electricity costs through the appliance scheduling. Overall energy optimization and cost reduction was implemented with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, finding the optimal operating time of the controlled appliances. At the beginning of the work, a microgrid is described which consists of houses where each has its own PV system for power generation as well as batteries for energy storage. The residences are interconnected with the central grid and have the capability of energy exchange between the residences. Through a simulation process that describes the operation of the microgrid, an optimization of electricity demand is performed as well as the minimization of the total cost of the system. Finally, the results are analyzed from three operating scenarios (baseline, group-based coordination and turn-based coordination) in order to verify the optimal operation of the microgrid system.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Γενικά.....	7
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Η αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου.....	13
2.3 Η έννοια των ομάδων κατοικιών.....	15
2.3.1 Ρόλος οντοτήτων.....	16
2.3.2 Μηχανισμοί συντονισμού.....	17
2.4 Συστήματα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας.....	21
2.4.1 Διαχείριση ζήτησης (Demand side management).....	21
2.4.2 Απόκριση ζήτησης (Demand response).....	23
2.5 Οικιακό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	27
3. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	31
3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Περιγραφή συστήματος.....	33
3.3 Ανάπτυξη μοντέλου του συστήματος.....	35
3.3.1 Οικιακό ενεργειακό σύστημα.....	35
3.3.2 Μοντέλο Φ/Β διάταξης.....	39
3.3.3 Μοντέλο της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.....	41

3.4 Σενάρια.....	47
3.4.1 Baseline σενάριο.....	47
3.4.2 Μηχανισμοί συντονισμού.....	48
3.5 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης.....	51
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	62
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το περιβάλλον αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση συστημάτων που είναι φιλικά προς το περιβάλλον αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της τεχνολογίας. Ωστόσο, η ανάγκη της ανθρωπότητας για ηλεκτρική ενέργεια είναι συνεχώς αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια. Η έλλειψη των συμβατικών ενεργειακών πόρων, όπως το πετρέλαιο και γενικότερα των ορυκτών καυσίμων, καθώς και η μόλυνση του περιβάλλοντος που προκαλούν, καθιστά αναγκαία την αναζήτηση νέων ενεργειακών πηγών όπως είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ένας τύπος των ΑΠΕ είναι η φωτοβολταϊκή (Φ/Β) τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η Φ/Β τεχνολογία προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα όπως, τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και την αθόρυβη λειτουργία του συστήματος. Επίσης, τα Φ/Β συστήματα προσφέρουν αξιοπιστία και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Ακόμα, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της Φ/Β τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να εγκατασταθεί σχεδόν οπουδήποτε, με δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ανάλογα με

τις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος καθώς απαιτεί ελάχιστη έως καθόλου συντήρηση [1].

Τα Φ/Β πλαίσια παράγουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όποτε κριθεί αναγκαίο, να αποθηκευτεί στις συστοιχίες μπαταριών του υπάρχον συστήματος ή να διοχετευτεί είτε στο τοπικό σύστημα είτε στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μικροδίκτυα είναι συστήματα που μπορούν να ενσωματώνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Τα μικροδίκτυα έχουν τη δυνατότητα να είναι είτε συνδεδεμένα με το δίκτυο, είτε να λειτουργούν αυτόνομα. Ως εκ τούτου, μπορούν να προσφέρουν αυτονομία σε διάφορους τύπους κτηρίων (οικιακά, εμπορικά, βιομηχανικά), ικανοποιώντας πλήρως τις ανάγκες των καταναλωτών. Οι εναλλακτικές επιλογές διαχείρισης της ενέργειας αυξάνονται περισσότερο με τη δυνατότητα οι πελάτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας να γίνονται ταυτόχρονα παραγωγοί και καταναλωτές. Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα ασχολείται με τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη και βελτιστοποίηση της παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε μικροδίκτυα τα οποία αποτελούνται από κτήρια με ενσωματωμένα Φ/Β πλαίσια και συστοιχίες μπαταριών. Το σύστημα αυτό βρίσκεται σε παράλληλη λειτουργία με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο πλαίσιο της εργασίας υλοποιήθηκε αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο της εργασίας [5] και προσομοιώνει τη λειτουργία και υπολογίζει το συνολικό κόστος του συστήματος για μια ημέρα λειτουργίας. Τα δεδομένα εισόδου που λαμβάνονται υπόψη είναι: τα γεωγραφικά στοιχεία της τοποθεσίας, τα μετεωρολογικά δεδομένα και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσκευών. Για την ελαχιστοποίηση κόστους και την εύρεση της βέλτιστης ώρας λειτουργίας των χρονοπρογραμματιζόμενων σε κατανάλωση συσκευών, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO). Για το συγκεκριμένο σύστημα έγιναν δοκιμές και συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τα ακόλουθα σενάρια βελτιστοποίησης:

1. Baseline Σενάριο
2. Group-based Συντονισμός

3. Turn-based Συντονισμός

Ο χρονοπρογραμματισμός του φορτίου, η εύρεση δηλαδή της βέλτιστης ώρας έναρξης λειτουργίας των μεγάλων σε κατανάλωση συσκευών, είναι βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό του συστήματος διαχείρισης ενέργειας που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών σεναρίων, ο turn-based συντονισμός μπορεί να προσφέρει περισσότερη εξοικονόμηση σε σχέση με τον group-based συντονισμό και το baseline σενάριο.

1.2 Σύνοψη κεφαλαίων

Η δομή της παρούσας εργασίας είναι η εξής:

- Το 2^ο Κεφάλαιο αναφέρεται στη διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας σε έξυπνα δίκτυα. Αρχικά, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική των έξυπνων δικτύων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ρόλοι των οντοτήτων και οι μηχανισμοί συντονισμού. Ακολούθως, παρουσιάζονται δύο συστήματα διαχείρισης ενέργειας και αντίστοιχα τα προγράμματα τιμολόγησης τους. Τέλος, περιγράφεται η λειτουργία του οικιακού συστήματος διαχείρισης ενέργειας, όπου αναλύεται η λειτουργία του να είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, η αυτόνομη λειτουργία του καθώς και η δυνατότητα στρατηγικού προγραμματισμού των οικιακών συσκευών.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι προσομοίωσης και βελτιστοποίησης των διαφορετικών σεναρίων που έχουν μελετηθεί.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από όλα τα σενάρια που έχουν μελετηθεί.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι προτάσεις για μελλοντική επέκταση αυτής της μελέτης.

2.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ

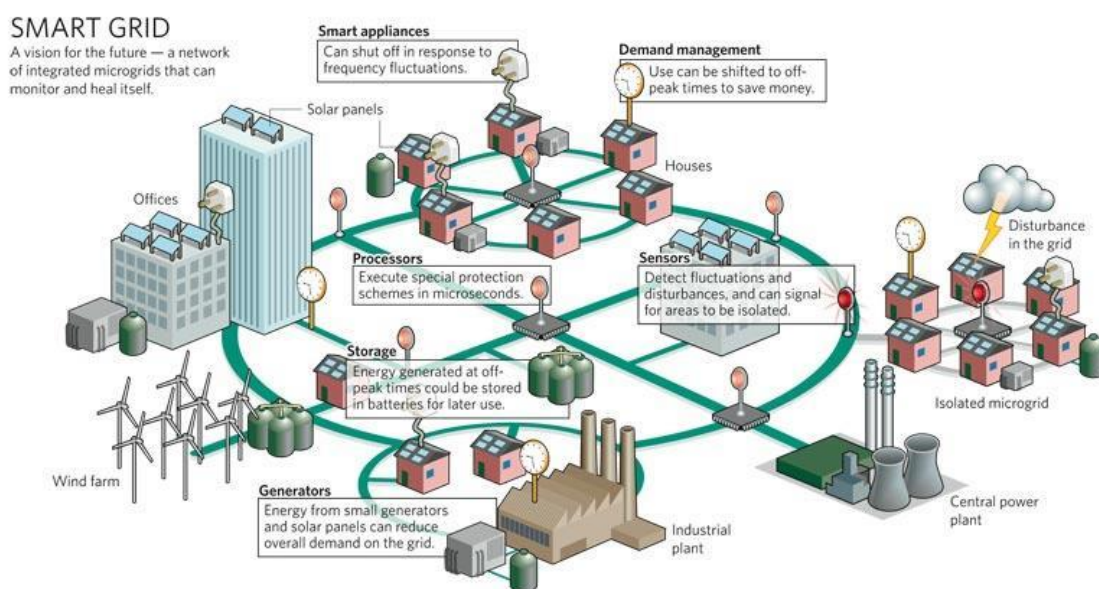
2.1 Εισαγωγή

Το Έξυπνο Δίκτυο (ΕΔ - Smart Grid, SG) πραγματοποιεί χρήση διάφορων τεχνικών σκοπεύοντας στον εκσυγχρονισμό των ηλεκτρικών δικτύων και τη μετατροπή τους σε ένα σύγχρονο δίκτυο στο οποίο ενσωματώνονται τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (Information and Communication Technology, ICT) στην υποδομή διανομής ενέργειας. Ο επίσημος ορισμός του SG σύμφωνα με το άρθρο [2] από την Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Τεχνολογίας (European Technology Platform, ETP) έχει ως εξής: “ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να ενσωματώσει με έξυπνο τρόπο τις δράσεις όλων των χρηστών που συνδέονται σε αυτό - παραγωγών, καταναλωτών, και εκείνων που αναλαμβάνουν και τους δύο ρόλους - με σκοπό να παρέχει αποτελεσματικά βιώσιμη, οικονομική και ασφαλή παροχή ηλεκτρισμού”. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, συμπεραίνουμε ότι μια βασική αρχή είναι η ένταξη τεχνολογιών ICT στο δίκτυο ώστε να συλλεχθούν οι απαραίτητες πληροφορίες με σκοπό να βελτιωθεί η διαχείριση ζήτησης και η ενεργειακή απόδοση ενός έξυπνου δικτύου, με

αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι τεχνολογίες αυτές, δίνουν την δυνατότητα στους καταναλωτές να εξοικονομήσουν χρήματα και ενέργεια χρονοπρογραμματίζοντας τις οικιακές συσκευές τους, ώστε να λειτουργούν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (για παράδειγμα σε ώρες εκτός αιχμής), με τη χρήση προγραμμάτων τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η δομή ενός έξυπνου δικτύου το οποίο αποτελείται από ένα δίκτυο τεχνολογιών ICT έτσι ώστε να γίνεται καλύτερος έλεγχος του συστήματος στοχεύοντας στην αξιοπιστία και στην ασφάλεια του. Το έξυπνο δίκτυο περιλαμβάνει καταναλωτές και ανανεώσιμη παραγωγή (όπως ηλιακή, αιολική) με την οποία μειώνει τις εκπομπές ρύπων αλλά και τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Στο έξυπνο δίκτυο δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και επιτρέπεται η χρήση της σε μελλοντικό στάδιο. Ακόμα ένα σημαντικό μέρος για τα έξυπνα δίκτυα είναι οι αισθητήρες οι οποίοι εντοπίζουν δυσλειτουργίες που μπορεί να προκύψουν στο σύστημα καθώς μπορούν να προσφέρουν τη γρήγορη ανάκαμψη του συστήματος. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν εύκολα να επικοινωνούν με τους έξυπνους μετρητές καθώς και με τις έξυπνες συσκευές των κατοικιών.



Σχήμα 2.1: Η δομή ενός Έξυπνου Δικτύου (SG) [3].

2.2 Η αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου

Το SG έχει ως στόχο την εξυπηρέτηση των αναγκών διαφόρων φορέων, όπως επιχειρήσεις, προμηθευτές και καταναλωτές. Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται και αναλύεται ένα μοντέλο που παρουσιάστηκε από το Εθνικό Ίδρυμα Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ. (National Institute of Standards and Technology, NIST) [4]. Το NIST απεικονίζει το SG ως ένα σύνολο οντοτήτων που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Το SG χωρίζεται σε επτά τομείς οι οποίοι εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του συστήματος με την ανταλλαγή πληροφοριών και τη λήψη αποφάσεων. Στο Σχήμα 2.2, παρουσιάζονται οι τομείς από τους οποίους αποτελείται ένα SG.

Στη συνέχεια, αναλύονται περεταίρω οι επτά τομείς του SG [4] :

Πελάτες: Περιλαμβάνονται οι πελάτες της ηλεκτρικής ενέργειας, στους οποίους δίνεται η δυνατότητα παραγωγής, αποθήκευσης και διαχείρισης της ενέργειας. Οι τρεις βασικοί τύποι πελατών αφορούν τον οικιακό, εμπορικό και βιομηχανικό τομέα.

Αγορές: Αφορά τη λειτουργία του έξυπνου δικτύου και το συντονισμό των συμμετεχόντων. Επιπλέον, διαχειρίζεται μηχανισμούς τιμολόγησης με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

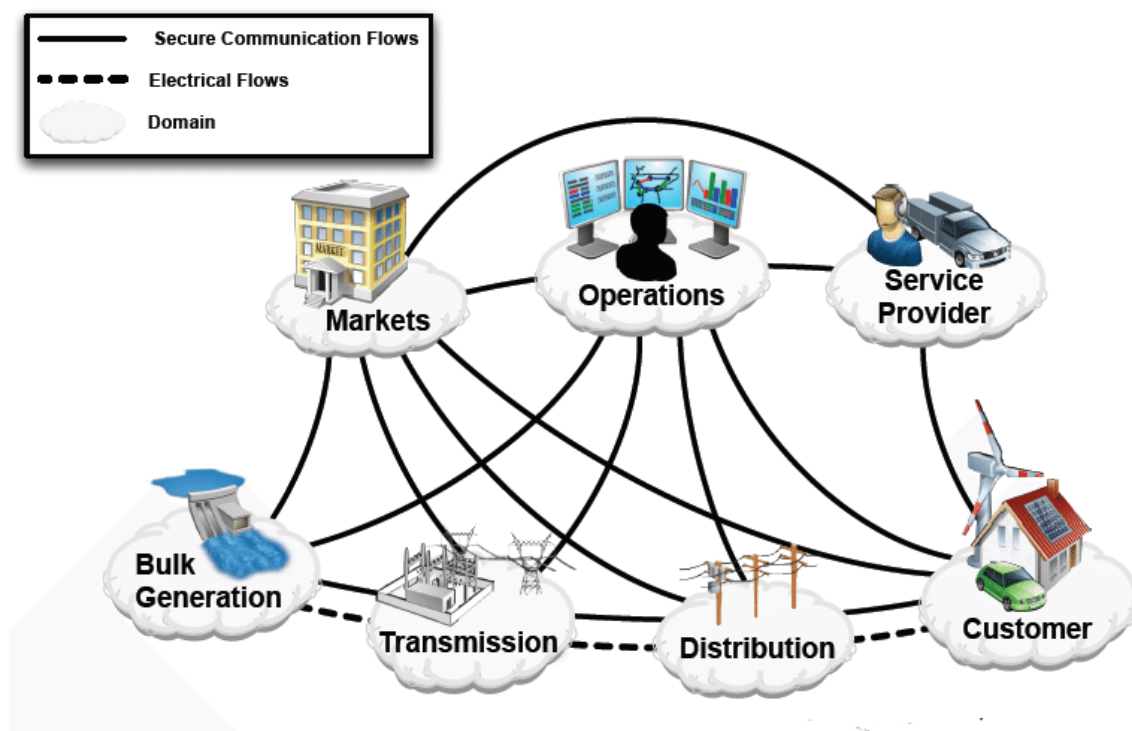
Πάροχοι υπηρεσιών: Παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε καταναλωτές και οργανισμούς κοινής ωφέλειας.

Λειτουργίες: Αναφέρεται στους διαχειριστές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους υπόλοιπους τομείς του έξυπνου δικτύου.

Παραγωγή: Περιλαμβάνει τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, περιέχοντας την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και τη χρήση της σε μελλοντικό στάδιο ή όποτε κριθεί αναγκαίο. Ο τομέας της παραγωγής περιέχει ανανεώσιμους και κατακευματισμένους ενεργειακούς πόρους (Distributed Energy Sources, DER). Ο τομέας της παραγωγής περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

Μεταφορά: Αφορά τους φορείς που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια. Ο τομέας της μεταφοράς διασυνδέει την παραγωγή και αποθήκευση (τομέας παραγωγής) με τον τομέα διανομής.

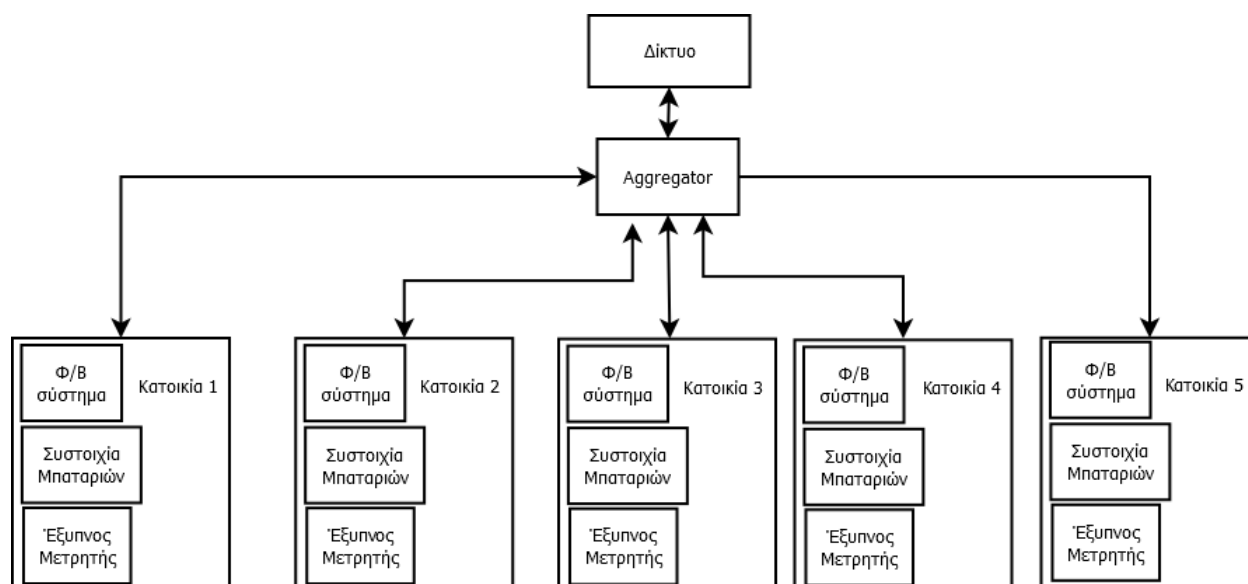
Διανομή: Αφορά το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από και προς τους καταναλωτές. Ο τομέας της διανομής διασυνδέει τον τομέα μεταφοράς με τον τομέα παλατών.



Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική του Smart Grid (SG) [4].

2.3 Η έννοια των ομάδων κατοικιών

Οι έξυπνες γειτονιές βασίζονται σε έξυπνα σπίτια, τα οποία διασυνδέονται μέσω ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και ενός δικτύου επικοινωνιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Μια περιοχή γειτονιάς ορίζεται ως μια ομάδα κατοικιών που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Ένα δίκτυο γειτονιάς επιτρέπει την επικοινωνία και το συντονισμό των έξυπνων σπιτιών. Επίσης, το μικροδίκτυο αυτό αποτελείται από έξυπνες κατοικίες εξοπλισμένες με έξυπνες συσκευές και έξυπνους μετρητές για τη συλλογή δεδομένων κατανάλωσης και παραγωγής [5]. Οι aggregators είναι οι οντότητες που επικοινωνούν με τον έξυπνο μετρητή (Smart Meter, SM) του κάθε έξυπνου σπιτιού, με σκοπό τη συγκέντρωση δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας από τους καταναλωτές, προσπαθώντας με διάφορες μεθόδους να εξασφαλίσουν τη μείωση του φορτίου του ηλεκτρικού δικτύου. Επίσης, οι aggregator μπορούν να επικοινωνούν με τους πελάτες είτε με το δίκτυο για τη συλλογή πληροφοριών, όπως η ημερήσια κατανάλωση της κάθε έξυπνης κατοικίας.



Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονική συστήματος με δίκτυα γειτονιάς.

2.3.1 Ρόλος οντοτήτων

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται οι ρόλοι των διάφορων οντοτήτων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3 [5]:

Δίκτυο: Εξασφαλίζει αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς χρήστες/πελάτες και χρησιμεύει για την αύξηση της τοπικής παραγωγής με την συμβολή των Φ/Β συστημάτων και του δικτύου ή τη μείωση του φορτίου. Επίσης, μπορεί να επικοινωνήσει με τους aggregators και τους πελάτες για να συντονίσει τις ανάγκες τους. (σε περίπτωση που υπάρχει έλλειμα το δίκτυο υποστηρίζει με την αύξηση της τοπικής παραγωγής)

Aggregator: Ο aggregator διαπραγματεύεται με τους τελικούς χρήστες/πελάτες (end-users). Σε αυτή την κατάσταση, από την πλευρά των τελικών χρηστών/πελατών, ο aggregator αναλαμβάνει προσωρινά το ρόλο του δικτύου και επηρεάζει τα μοντέλα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη λιανική αγορά. Επίσης, λαμβάνει αιτήματα από το δίκτυο για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του συστήματος.

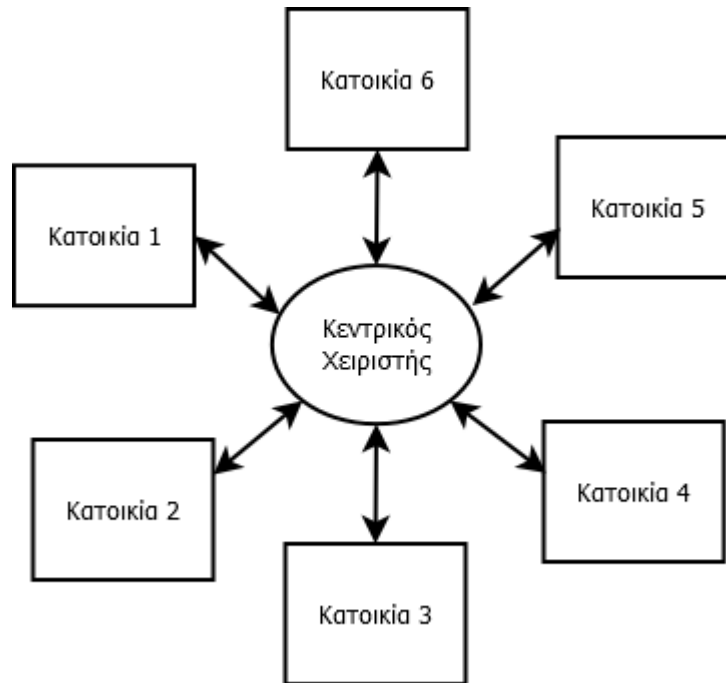
Πελάτες: Οι τελικοί χρήστες αναλαμβάνουν το ρόλο του καταναλωτή ή του παραγωγού μέσω της επικοινωνίας του aggregator με τον έξυπνο μετρητή της κάθε κατοικίας. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να παράγουν, να καταναλώσουν και να αποθηκεύσουν ενέργεια.

2.3.2 Μηχανισμοί συντονισμού

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται δύο μηχανισμοί συντονισμού για τη διαχείριση ενέργειας, ο κεντρικός και ο αποκεντρωμένος συντονισμός [5].

- **Κεντρικός συντονισμός (Centralized coordination)**

Στον κεντρικό συντονισμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, υπάρχει ένας κεντρικός χειριστής ο οποίος μπορεί να είναι το δίκτυο ή ο aggregator. Αυτός ο κεντρικός χειριστής διαχειρίζεται όλα τα στοιχεία της ηλεκτρικής ενέργειας από όλα τα έξυπνα σπίτια, με αποτέλεσμα να έχει την ευθύνη για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, έχει άμεση πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες των τελικών χρηστών/πελατών (end-users) σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια των οικιακών συσκευών μέσω των δικτύων Advanced Metering Infrastructure (AMI). Οι έξυπνοι μετρητές και το HEMS στέλνουν δεδομένα αναφορικά με τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας και τις προτιμήσεις τους στον κεντρικό χειριστή. Ο χειριστής τότε βελτιστοποιεί την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του χρονοπρογραμματισμού των συσκευών για κάθε κατοικία. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται από τον κεντρικό χειριστή μεταφέρονται στη συνέχεια στα έξυπνα σπίτια και εφαρμόζεται η στρατηγική.

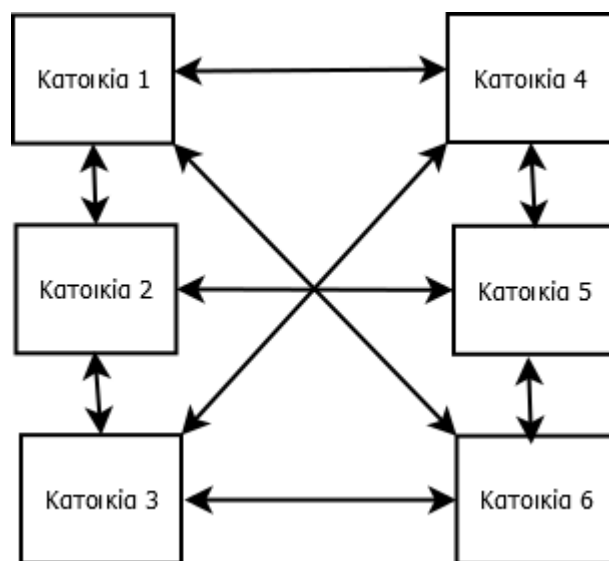


Σχήμα 2.4 Κεντρικός συντονισμός (Centralized coordination).

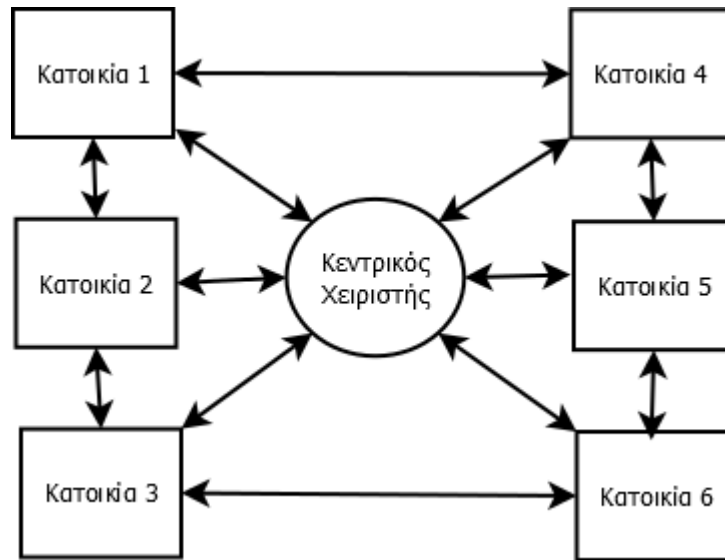
- **Αποκεντρωμένος συντονισμός (Decentralized coordination)**

Στον κεντρικό συντονισμό, ο κεντρικός χειριστής έχει πρόσβαση σε πληροφορίες για όλους τους καταναλωτές, ενώ στον αποκεντρωμένο συντονισμό, οι τελικοί χρήστες/πελάτες (end-users) προγραμματίζουν κατευθείαν τις οικιακές συσκευές τους χωρίς κανένα κεντρικό χειριστή. Τα έξυπνα σπίτια έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους ή μέσω μιας κεντρικής οντότητας που συλλέγει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας της γειτονιάς. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τρεις προσεγγίσεις του αποκεντρωμένου συντονισμού:

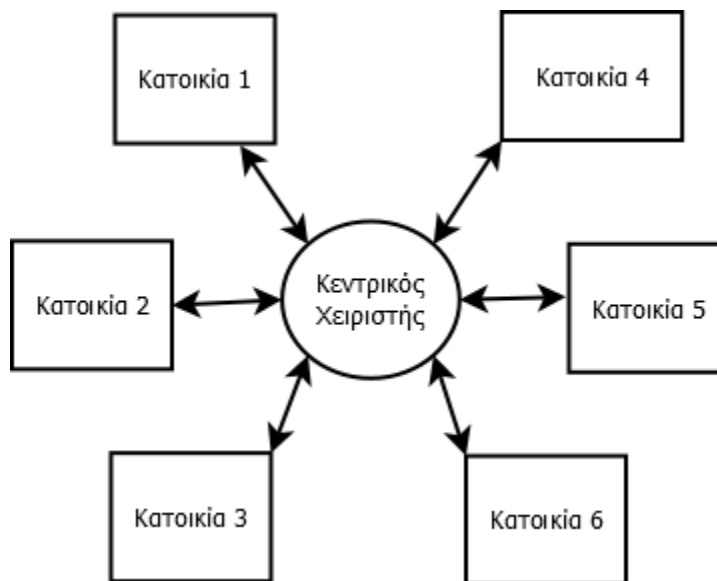
- I. Πλήρως Ανεξάρτητος (Fully-Independent):** Στον πλήρως ανεξάρτητο συντονισμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, τα έξυπνα σπίτια επικοινωνούν μεταξύ τους στη γειτονιά, χωρίς κεντρική οντότητα. Με βάση αυτό, τα έξυπνα σπίτια συλλέγουν δεδομένα σχετικά με το φορτίο της γειτονιάς.
- II. Μερικώς Ανεξάρτητος (Partially-Independent):** Στο μερικώς ανεξάρτητο συντονισμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, τα έξυπνα σπίτια επικοινωνούν μεταξύ τους και παράλληλα αλληλοεπιδρούν με μια κεντρική οντότητα.
- III. Πλήρως Εξαρτημένος (Fully-Dependent):** Στον πλήρως εξαρτώμενο συντονισμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, τα έξυπνα σπίτια λαμβάνουν πληροφορίες για το προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας της γειτονιάς μέσω μιας κεντρικής οντότητας χωρίς να μοιράζονται δεδομένα μεταξύ τους. Η επικοινωνία της γειτονιάς εξαρτάται από την κεντρική οντότητα. Η διαφορά με τον κεντρικό συντονισμό είναι ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται από τα έξυπνα σπίτια και όχι από την κεντρική οντότητα.



Σχήμα 2.5: Πλήρως ανεξάρτητος αποκεντρωμένος συντονισμός (Fully-independent decentralized coordination).



Σχήμα 2.6: Μερικώς ανεξάρτητος αποκεντρωμένος συντονισμός (Partially-independent decentralized coordination).



Σχήμα 2.7: Πλήρως εξαρτημένος αποκεντρωμένος συντονισμός (Fully-dependent decentralized coordination).

2.4 Συστήματα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας

Με την εφαρμογή των AMI, οι πελάτες είναι ενεργοί συμμετέχοντες για την παραγωγή ή αποθήκευση ενέργειας, αλλά και την αλλαγή στους τρόπους κατανάλωσης της. Επομένως, η αλληλεπίδραση των πελατών έχει σημαντικό ρόλο στις λειτουργίες του δικτύου για την επιτυχή εφαρμογή στρατηγικών ηλεκτρικής διαχείρισης.

2.4.1 Διαχείριση ζήτησης (Demand side management)

Ο μηχανισμός της διαχείρισης ζήτησης (Demand Side Management, DSM) επικεντρώνεται στην βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης των ενεργειακών πόρων στον τομέα των πελατών. Η DSM αναφέρεται σε τεχνολογίες που επιτρέπουν τους καταναλωτές να βελτιστοποιούν τη χρήση ενέργειας. Η διαχείριση ζήτησης έχει ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής ή να κάνει χρήση της ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής όπως για παράδειγμα τις βραδινές ώρες, έχοντας ως όφελος τη μειωμένη κοστολόγηση. Από τη μία, δεν είναι σίγουρο ότι η διαχείριση ζήτησης θα μειώσει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, αλλά από την άλλη, με τη χρήση του DSM μειώνεται το κόστος μέσω της μετατόπισης της λειτουργίας των συσκευών σε ώρες εκτός αιχμής.

Στο Σχήμα 2.8 φαίνονται οι τεχνικές διαχείρισης ζήτησης, όπου στον οριζόντιο άξονα φαίνονται οι ώρες της ημέρας και στον κάθετο άξονα παρουσιάζεται η ζήτηση της ενέργειας. Οι τεχνικές διαχείρισης ζήτησης παρουσιάζονται παρακάτω [6]:

Peak Clipping: Στοχεύει στη μείωση της μέγιστης κατανάλωσης ισχύος κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής.

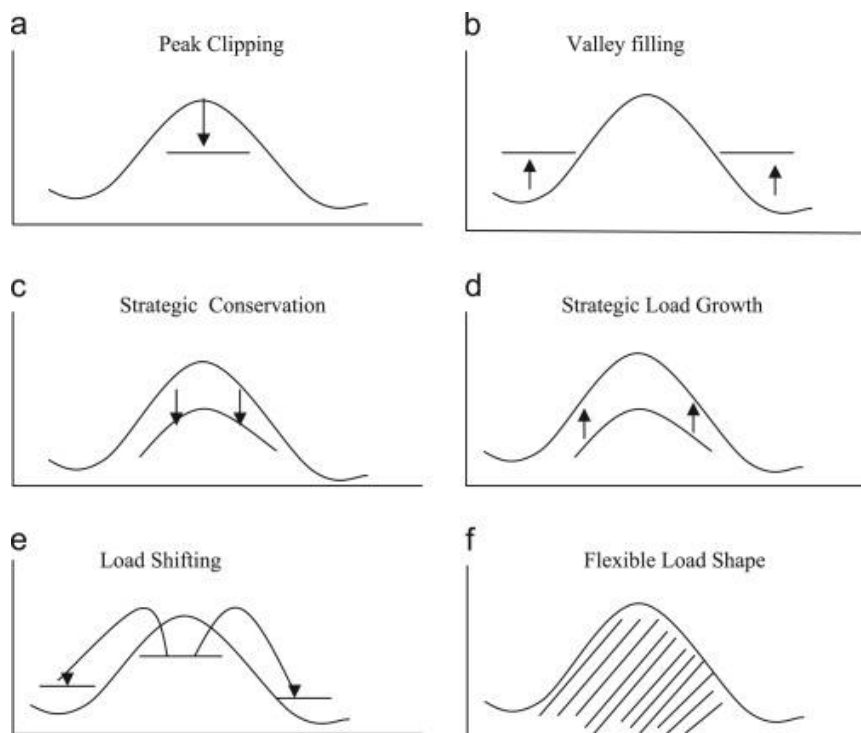
Valley Filling: Στοχεύει στην αύξηση της ζήτησης στις ώρες εκτός αιχμής. Το όφελος των καταναλωτών είναι οι μειωμένες τιμές που οδηγούν στην μείωση του συνολικού κόστους και βελτιώνουν την αποδοτικότητα του συστήματος.

Strategic Conversation: Πραγματοποιεί μείωση του συνολικού φορτίου μέσω αλλαγών στον τρόπο κατανάλωσης.

Strategic Load Growth: Στοχεύει στην αύξηση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας στις ώρες που η ζήτηση είναι χαμηλή.

Load Shifting: Μειώνει τη ζήτηση στις ώρες αιχμής με τη μετατόπιση της λειτουργίας των χρονοπρογραμματιζόμενων φορτίων σε ώρες εκτός αιχμής.

Flexible Load Shaping: Αναζητά πότε το σύστημα είναι πιο αξιόπιστο και ανάλογα με αυτό θέτει περιορισμούς λειτουργίας του φορτίου σε συγκεκριμένες ώρες.

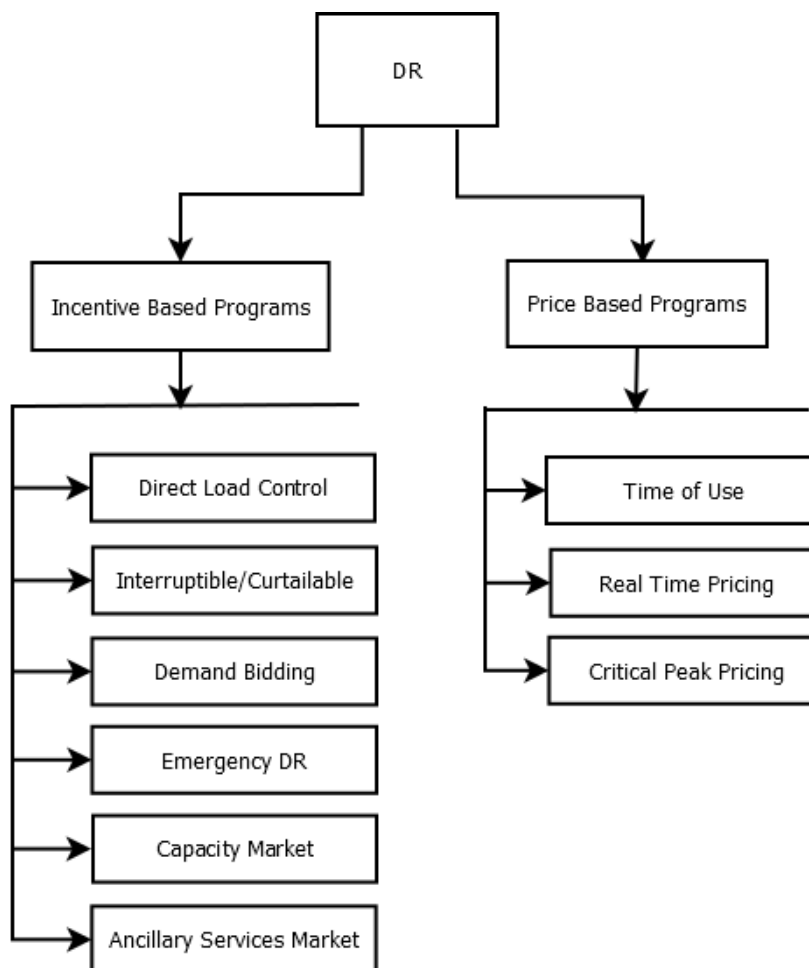


Σχήμα 2.8: Τεχνικές DSM: a) Peak Clipping, b) Valley Filling, c) Strategic Conservation, d) Strategic Load Growth, e) Load Shifting, f) Flexible Load [6].

2.4.2 Απόκριση ζήτησης (Demand response)

Η απόκριση ζήτησης (Demand Response, DR) προσδιορίζει την αλλαγή της κατανάλωσης των τελικών χρηστών αλληλοεπιδρώντας με έναν πάροχο υπηρεσιών, μειώνοντας ή μετατοπίζοντας το ηλεκτρικό τους φορτίο. Οι πελάτες έχουν τη δυνατότητα να συμμετέχουν σε προγράμματα DR τα οποία προσφέρονται από τους οργανισμούς παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο οι πελάτες προσαρμόζουν τις ανάγκες τους σύμφωνα με τα προγράμματα DR. Ο σκοπός της απόκρισης ζήτησης είναι να μειωθεί η συνολική κατανάλωση του συστήματος κατά τις ώρες αιχμής και να γίνεται χρήση των ηλεκτρικών συσκευών σε ώρες εκτός αιχμής.

Τα προγράμματα DR χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες [7]: τα προγράμματα με βάση τα κίνητρα (Incentive-Based Programs, IBP) και τα προγράμματα με βάση την τιμή (Price-Based Programs, PBP). Τα προγράμματα DR φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 2.9:



Σχήμα 2.9: Υποκατηγορίες των DR προγραμμάτων [7].

Τα προγράμματα IBP προσφέρονται στους καταναλωτές από τις εταιρείες παροχών υπηρεσιών. Υπάρχει η δυνατότητα οι πελάτες να επωφελούνται οικονομικά μέσω αυτών των προγραμμάτων αφού προσφέρουν μείωση του φορτίου και χαμηλότερες τιμές. Οι τιμές που προσφέρονται μπορούν να είναι είτε χρονικά μεταβαλλόμενες είτε σταθερές σε ώρες αιχμής και εκτός αιχμής. Ο καταναλωτής πραγματοποιεί μείωση του φορτίου όταν ο διαχειριστής κρίνει αναγκαίο ότι η αξιοπιστία του συστήματος βρίσκεται σε κίνδυνο ή όταν οι τιμές αγοράς και πώλησης της ενέργειας είναι αρκετά υψηλές.

Τα προγράμματα IBP χωρίζονται σε έξι υποκατηγορίες [7]:

Direct Load Control: Ο διαχειριστής του συστήματος μπορεί να ελέγξει τη λειτουργία των φορτίων του πελάτη για κάποιο χρονικό διάστημα, προκειμένου να διατηρήσει την αξιοπιστία του συστήματος. Το όφελος των πελατών στη συμμετοχή του προγράμματος είναι η μείωση του λογαριασμού τους.

Interruptible/Curtailable: Ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρει έκπτωση στο λογαριασμό των πελατών αφού μειώσει το φορτίο κατά τις ώρες όπου το ηλεκτρικό σύστημα βρίσκεται σε κίνδυνο.

Demand Bidding: Οι πελάτες υποβάλλουν προσφορά για μείωση του φορτίου ή αποφασίζουν πόσο φορτίο χρειάζεται να μειωθεί για μια τιμή την οποία προσφέρει ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας.

Emergency DR: Προσφέρουν οικονομικά κίνητρα για μειώσεις των φορτίων όταν υπάρχει κίνδυνος για την αξιοπιστία του συστήματος.

Capacity Market: Οι πελάτες αφού έχουν ενημερωθεί μια ημέρα νωρίτερα, μειώνουν το φορτίο όταν το σύστημα βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση.

Ancillary Services Market: Οι καταναλωτές υποβάλλουν προσφορά στους διαχειριστές του συστήματος. Εάν η προσφορά τους είναι αποδεκτή, πραγματοποιούν την περικοπή και λαμβάνουν κάποια τιμή αγοράς ως αποζημίωση.

Οι πελάτες ικανοποιούν τις ανάγκες τους μέσω της αλλαγής της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αλλαγή πραγματοποιείται από τα προγράμματα PBP. Οι πελάτες μπορούν να εκμεταλλευτούν τις χαμηλότερες τιμές αγοράς ενέργειας ή μπορούν να αποφύγουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση στους λογαριασμούς κατανάλωσης των πελατών.

Οι υποκατηγορίες των προγραμμάτων PBP παρουσιάζονται παρακάτω [7]:

Time-of-use (TOU): Είναι ένας χρονικά μεταβαλλόμενος μηχανισμός τιμολόγησης για ένα 24ώρο, ο οποίος αναφέρεται σε ώρες υψηλής και χαμηλής ζήτησης (δηλαδή ώρες αιχμής και ώρες εκτός αιχμής, αντίστοιχα). Η τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη στις ώρες αιχμής και χαμηλότερη στις ώρες εκτός αιχμής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Real-time pricing (RTP): Η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χρονικά μεταβαλλόμενη μέσα στην ημέρα. Οι τιμές δίνονται στους καταναλωτές μία ημέρα ή μία ώρα νωρίτερα από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, με βάση την ωριαία τους ζήτηση, ώστε να πραγματοποιήσουν την επιθυμητή μείωση στην κατανάλωση της.

Critical peak pricing (CPP): Είναι ένας μηχανισμός τιμολόγησης που χρησιμοποιείται μερικές φορές εκτός από την TOU, προκειμένου να παρέχει υψηλότερες χρεώσεις στους πελάτες κατά τη διάρκεια των χρονικών περιόδων, ή σε συνθήκες λειτουργίας, που κρίνονται κρίσιμες.

Τα προγράμματα DR πραγματοποιούν μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, τα προγράμματα DR είναι σε θέση να προσφέρουν οφέλη τόσο στους πελάτες όσο και στους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη μία πλευρά, οι πελάτες μπορούν να αλλάξουν τις καταναλωτικές συνήθειες τους έτσι ώστε να μειώσουν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και από την άλλη πλευρά, τα προγράμματα DR βοηθούν τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας μειώνοντας τον κίνδυνο διακοπής της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας αποδοτική χρήση των ΑΠΕ και διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

2.5 Οικιακό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι κύριες λειτουργίες των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας κατοικιών περιλαμβάνουν τον έλεγχο, την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας είναι υπεύθυνα για τον καθορισμό της αποδοτικότερης λύσης από άποψη κόστους όσον αφορά την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ενός ηλεκτρικού δικτύου στοχεύοντας στην ασφάλεια και στην αξιοπιστία του.

Η αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η εμφάνιση των έξυπνων δικτύων, ήταν η αφορμή για την ανάπτυξη των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας ειδικότερα στον οικιακό τομέα. Η δυνατότητα της μετατόπισης και περιορισμού της ζήτησης που επιτυγχάνεται μέσω των HEMS βελτιώνει την ενεργειακή κατανάλωση και το προφίλ παραγωγής ενέργειας των κατοικιών. Δεδομένου του κόστους ενέργειας, των μετεωρολογικών δεδομένων και της κατανάλωσης των πελατών, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας εφαρμόζει ένα πρόγραμμα με σκοπό την βελτιστοποίηση της κατανάλωσης και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο τα HEMS υπολογίζουν το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών για το κάθε σπίτι, με τη χρήση ενός αλγορίθμου ο οποίος χρονοπρογραμματίζει τη λειτουργία των συσκευών λαμβάνοντας υπόψη και τις προτιμήσεις των καταναλωτών.

Τα HEMS είναι υπεύθυνα για την καλύτερη διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας. Επίσης, ως στόχος των HEMS είναι το κόστος, δηλαδή με το πρόβλημα βελτιστοποίησης να προσφέρει μείωση του κόστους [8]. Ακόμα, στόχο έχουν ο χρονοπρογραμματισμός των συσκευών που πραγματοποιείται με το πρόβλημα βελτιστοποίησης να μην επηρεάζει τις ανάγκες του χρήστη. Σε περίπτωση σφάλματος στο σύστημα, η ασφάλεια του αποτελεί τον κύριο στόχο των HEMS. Το σύστημα πρέπει να προσφέρει ασφάλεια ακόμα και όταν οι χρήστες βρίσκονται εκτός σπιτιού, καθώς επίσης προσφέρεται δυνατότητα για απομακρυσμένο έλεγχο των κύριων συσκευών αλλά και ενημέρωση με μηνύματα σε περίπτωση σφάλματος του οικιακού συστήματος.

2.5.1 Οικιακό σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο

Όταν το οικιακό σύστημα βρίσκεται σε παράλληλη λειτουργία με το κεντρικό δίκτυο, η εφεδρεία που προσφέρουν οι μπαταρίες παρέχουν στους πελάτες τη δυνατότητα να αγοράζουν ή και να πωλούν ενέργεια όποτε κριθεί αναγκαίο. Η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο στοχεύει στην καλύτερη διαχείριση της ενέργειας με τη χρήση κεντρικού ή αποκεντρωμένου συντονισμού. Παράλληλα επιτυγχάνει τη μείωση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως φορτίο όταν αγοράζεται ενέργεια ή μπορεί να θεωρηθεί ως μονάδα παραγωγής όταν πωλείται ενέργεια στο μικροδίκτυο ή στο κεντρικό δίκτυο. Σε περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ενέργεια στο οικιακό σύστημα, με βάση τις τιμές των προγραμμάτων τιμολόγησης θα αποφασιστεί αν η ενέργεια θα πωληθεί στο μικροδίκτυο ή στο δίκτυο. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που υπάρχει έλλειμμα ενέργειας, το οικιακό σύστημα αγοράζει ενέργεια από το μικροδίκτυο ή το ηλεκτρικό δίκτυο. Εν κατακλείδι, το οικιακό σύστημα έχει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών που προσφέρουν βοήθεια στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση σφάλματος λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου, το οικιακό σύστημα είναι σε θέση να το υποστηρίξει.

2.5.2 Αυτόνομο οικιακό σύστημα

Αυτόνομο είναι το σύστημα το οποίο δεν βρίσκεται σε παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο και βασίζεται μόνο στην παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας του οικιακού συστήματος. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, το αυτόνομο σύστημα πλεονεκτεί σε περίπτωση που υπάρχουν σφάλματα ή διακοπές οι οποίες οφείλονται σε τεχνικούς λόγους ή φυσικές καταστροφές και μπορούν θέσουν σε κίνδυνο την λειτουργία του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου [9]. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση βλάβης του ηλεκτρικού δικτύου, με την αυτόνομη λειτουργία αποφεύγεται το υψηλό κόστος από διακοπές ρεύματος και εξασφαλίζεται η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, τέτοια συστήματα εύκολα μπορούν να αποτύχουν όταν η τοπικά παραγόμενη ενέργεια (πχ. από Φ/Β διατάξεις) δεν επαρκεί για την τροφοδότηση του φορτίου. Μια μέθοδος επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η παροχή εφεδρικής παραγωγής στο σύστημα όπως η τροφοδότηση από γεννήτρια. Ακόμα, με την εγκατάσταση μπαταριών μεγάλης χωρητικότητας, η επιπλέον ενέργεια που παράγεται από τα Φ/Β μπορεί να αποθηκευτεί επιτυχώς στις μπαταρίες προσφέροντας εφεδρεία στο σύστημα τις ημέρες που η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή. Στην περίπτωση όμως που οι μπαταρίες βρίσκονται σε πλήρη φόρτιση, δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης επιπλέον ενέργειας στο σύστημα με αποτέλεσμα το περίσσειμα ενέργειας να χάνεται. Συμπερασματικά, τα αυτόνομα συστήματα λόγω του αυξημένου κόστους που έχουν, το οποίο προκύπτει από την ανάγκη για εφεδρική παραγωγή ενέργειας, είναι καλό να χρησιμοποιούνται μόνο στις περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητο.

2.5.3 Στρατηγικός προγραμματισμός οικιακών συσκευών

Ένα οικιακό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει αποφάσεις με στόχο να μειωθεί η ζήτηση και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας του χρήστη. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο των οικιακών συσκευών του καταναλωτή προς όφελος του με βάση τις προτιμήσεις του. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με τον βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό των συσκευών.

Για τον προγραμματισμό των οικιακών συσκευών είναι απαραίτητο να γίνει ταυτοποίηση τους ως προς την κατανάλωση και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Σε κάθε κατοικία ο αριθμός και ο τύπος των συσκευών είναι διαφορετικός. Αυτό εξαρτάται από τον τύπο της κατοικίας και τον τρόπο ζωής του καταναλωτή. Επίσης, για να μπορεί το οικιακό σύστημα διαχείρισης ενέργειας να παρέμβει στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η κάθε συσκευή, σημαντικό ρόλο έχουν η κατανάλωση, ο τύπος και το χρονικό διάστημα που πρέπει να λειτουργεί η κάθε συσκευή. Οι συσκευές χωρίζονται σε δύο τύπους που αναλύονται παρακάτω [5]:

- Μη ελεγχόμενες συσκευές: Είναι τα φορτία που λόγω της αναγκαιότητας τους δεν μπορεί να τροποποιηθεί η λειτουργία τους, όπως για παράδειγμα ο φωτισμός.
- Ελεγχόμενες συσκευές: Είναι τα φορτία με συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα λειτουργίας που έχουν δεδομένη κατανάλωση ενέργειας η οποία καθορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής. Αυτά τα φορτία μπορούν να μετατοπίσουν την λειτουργία τους χρονικά και επίσης μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το πλυντήριο ρούχων ή πιάτων, ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο κλπ.

Ο Particle Swarm Optimization (PSO) είναι ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που επιλέχθηκε σε αυτή την εργασία για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το PSO μέσω της μελέτης της κίνησης των σωματιδίων (πιθανές λύσεις) σε ένα χώρο αναζήτησης, βελτιστοποιεί την λύση του προβλήματος [10]-[12]. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται περισσότερο η λειτουργία και η υλοποίηση αυτού του αλγορίθμου.

3.

Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

3.1 Εισαγωγή

Στην ενεργειακή αγορά, οι ΑΠΕ κατέχουν σημαντικό ρόλο, καθώς με την ενσωμάτωσή τους στα μελλοντικά έξυπνα δίκτυα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Επίσης, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα έξυπνα δίκτυα παρέχει την δυνατότητα στους χρήστες να είναι παραγωγοί και καταναλωτές ταυτόχρονα, επιτρέποντας παράλληλα και τη συνεργασία μεταξύ τους. Είναι σημαντικό για τη μεγιστοποίηση του κέρδους σε ένα μικροδίκτυο να γίνεται σωστό έλεγχος με βάση τα προγράμματα τιμολόγησης, τα οποία περιλαμβάνουν χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή πώλησης ή αγοράς ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση της συγκεκριμένης ώρας (on-peak, off-peak). Επομένως, χρειάζεται σωστή διαχείριση της αποθήκευσης της ενέργειας στη συστοιχία μπαταριών της κάθε κατοικίας.

Με σκοπό τα μικροδίκτυα να κατέχουν σημαντικότερο ρόλο στην ενεργειακή αγορά μπορεί να δημιουργηθεί ένα αποκεντρωμένο μοντέλο, το οποίο πραγματοποιεί συντονισμό μεταξύ των κατοικιών, συλλέγοντας πληροφορίες μέσω συστημάτων ICT. Τα μικροδίκτυα συμμετέχουν στην ενεργειακή αγορά παίρνοντας αποφάσεις για την πώληση, αγορά και αποθήκευση ενέργειας.

Η διαχείριση ενέργειας που προσφέρεται για την αποθήκευση, την παραγωγή καθώς και τη συμμετοχή των καταναλωτών στην ζήτηση είναι κάποιιοι από τους λόγους που ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει την αποδοτικότερη χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η συμμετοχή των καταναλωτών περιλαμβάνει την παρακολούθηση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας και τη δυνατότητα από τους χρήστες να ενεργήσουν έτσι ώστε αποφύγουν την επιβάρυνση στον λογαριασμό του ηλεκτρικού ρεύματος.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η δομή ενός μικροδικτύου το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και ο σκοπός του είναι η βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους με βάση τη μέθοδο της εργασίας [5]. Η βελτιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται με το χρονοπρογραμματισμό των συσκευών. Τα είδη των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από δύο κατηγορίες [5], [13], [14].

- Μη ελεγχόμενες συσκευές (φώτα, υπολογιστής, τηλεόραση, βραστήρας κλπ.): είναι οι συσκευές οι οποίες δεν μπορούν να χρονοπρογραμματιστούν γιατί επηρεάζουν τις ανάγκες και τις προτιμήσεις του καταναλωτή.
- Ελεγχόμενες συσκευές [πλυντήριο ρούχων ή πιάτων, στεγνωτήριο, θερμοσίφωνα (Electric water heater - EWH), κλιματιστικό (heating, ventilation, airconditioning - HVAC) και ηλεκτρικό αυτοκίνητο (Electric vehicle - EV)]: είναι οι συσκευές οι οποίες χρονοπρογραμματίζονται με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία η κάθε κατοικία γειτονιάς έχει το δικό της Φ/Β σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και δικό της σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (συστοιχία μπαταριών). Επίσης, το σύστημα περιλαμβάνει έναν έξυπνο μετρητή ο οποίος συλλέγει δεδομένα με βάση την κατάσταση λειτουργίας και την κατανάλωση ενέργειας των έξυπνων κατοικιών. Με τη συλλογή όλων των απαιτούμενων πληροφοριών το HEMS προχωράει στη βελτιστοποίηση προγραμματίζοντας την λειτουργία των συσκευών στόχο τη

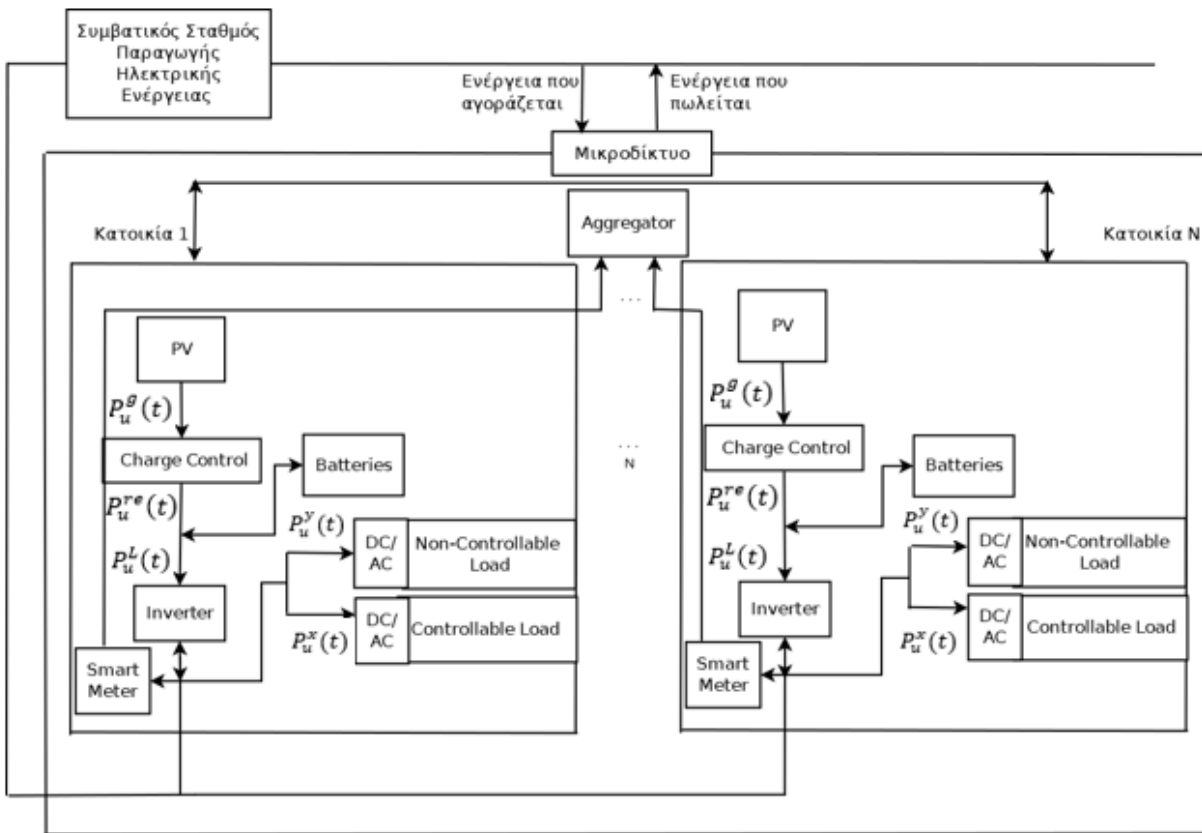
μέγιστη δυνατή μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται καθημερινά από όλη την ομάδα κατοικιών.

Ακολούθως, στο παρακάτω μοντέλο υλοποιήθηκαν τρία σενάρια συντονισμού των κατοικιών της γειτονιάς στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης και του κόστους με το χρονοπρογραμματισμό των οικιακών συσκευών. Τα σενάρια αυτά βασίζονται σε προγράμματα τιμολόγησης και στις στρατηγικές που αφορούν την βελτιστοποίηση του συστήματος. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη αφορούν τη βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους και της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για μια ημέρα. Με αφορμή αυτό, παρουσιάζεται ένα μοντέλο διαχείρισης ενέργειας μιας έξυπνης γειτονιάς.

3.2 Περιγραφή συστήματος

Το μικροδίκτυο που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία αποτελείται από 10 κατοικίες από τις οποίες η κάθε μια διαθέτει από ένα Φ/Β σύστημα, ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (συστοιχία μπαταριών) και έναν έξυπνο μετρητή ενέργειας, ενώ η γειτονιά περιλαμβάνει έναν aggregator, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Ο aggregator επικοινωνεί με τα έξυπνα σπίτια για να ενημερώνεται με το προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του κάθε σπιτιού σύμφωνα με τη μέθοδο της εργασίας [5]. Τα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου αυτή η ενέργεια αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών. Επίσης, το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με τον κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή δίνεται η δυνατότητα αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το ηλεκτρικό δίκτυο όποτε κριθεί αναγκαίο. Αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας το οποίο δεν είναι δυνατό να αποθηκευτεί στη συστοιχία μπαταριών τότε διατίθεται στο δίκτυο και αν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας τότε εισάγεται ενέργεια από το δίκτυο για να μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες των καταναλωτών (κατοικίες). Η βέλτιστη λειτουργία των μικροδικτύων είναι πολύ σημαντική καθώς επιτυγχάνει αξιοπιστία του συστήματος, μειωμένες εκπομπές ρύπων με τη χρήση των ΑΠΕ και βελτιστοποίηση του κόστους ενέργειας. Επιπρόσθετα, κάθε κατοικία έχει τη δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας με τις άλλες κατοικίες που βρίσκονται στη γειτονιά με

βάση τις ανάγκες των καταναλωτών, με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας του μικροδικτύου. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το γενικό διάγραμμα του μικροδικτύου που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 3.1: Το γενικό διάγραμμα του μικροδικτύου που μελετήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

3.3 Ανάπτυξη μοντέλου του συστήματος

Στην συγκεκριμένη μελέτη, το μικροδίκτυο αποτελείται από τα έξυπνα σπίτια που βρίσκονται στη γειτονιά, τον aggregator οποίος επικοινωνεί με τους έξυπνους μετρητές των κατοικιών με σκοπό τη συλλογή των πληροφοριών σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας τους σύμφωνα με τη μέθοδο της εργασίας [5]. Ο aggregator είναι μια οντότητα που είναι σε θέση να παρέχει βοηθητικές υπηρεσίες προς το ηλεκτρικό δίκτυο, οι οποίες βοηθούν στο συντονισμό των έξυπνων κατοικιών για την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας τους. Επίσης το μικροδίκτυο αποτελείται από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί Φ/Β συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο. Ακόμα, το μικροδίκτυο βρίσκεται σε παράλληλη λειτουργία με το κεντρικό δίκτυο το οποίο μπορεί να πωλήσει ή να αγοράσει ενέργεια σε περίπτωση που υπάρχει περίσσειμα ή έλλειμα ενέργειας αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, τα έξυπνα σπίτια συμβολίζονται ως U και βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή (μιας γειτονιάς). Κάθε έξυπνο σπίτι περιέχει ηλεκτρικές συσκευές, Φ/Β πάνελ και συστοιχίες μπαταριών. Το κάθε έξυπνο σπίτι $u \in U$ αποτελείται από 2 κατηγορίες συσκευών: τις ελεγχόμενες συσκευές X_u και μη ελεγχόμενες συσκευές Y_u .

3.3.1 Οικιακό ενεργειακό σύστημα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα έξυπνα σπίτια που βρίσκονται στο μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και μπορούν να καταναλώσουν, να παράγουν και να αποθηκεύσουν ενέργεια, να ανταλλάξουν ενέργεια μεταξύ τους, να πωλήσουν ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο όπως και να αγοράσουν από το δίκτυο ανά ώρα. Μέσω του aggregator τα έξυπνα σπίτια μπορούν να επικοινωνούν με τους έξυπνους μετρητές του συστήματος και να ελέγχουν το ηλεκτρικό προφίλ της κάθε κατοικίας, σύμφωνα με τη μέθοδο της εργασίας [5]. Κάθε κατοικία είναι εξοπλισμένη με το δικό της έξυπνο μετρητή, και μπορεί να επικοινωνεί μόνο με τον aggregator (και όχι με τις άλλες κατοικίες). Κάθε έξυπνο σπίτι

μπορεί να περιέχει έως 16 τύπους ηλεκτρικών συσκευών οι οποίες χωρίζονται σε δύο είδη: ελεγχόμενες και μη-ελεγχόμενες συσκευές. Οι 6 από αυτές τις συσκευές θεωρούνται ως ελεγχόμενες X_u (όπως πλυντήριο ρούχων, στεγνωτήριο ρούχων, πλυντήριο πιάτων, EWH, HVAC και EV και οι υπόλοιπες 10 θεωρούνται ως μη-ελεγχόμενες συσκευές Y_u (όπως ηλεκτρικό σίδερο, φώτα, τηλεόραση κλπ.) [5]. Στον Πίνακα 1.1 δίνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών συσκευών, οι τιμές ονομαστικής ισχύος της κάθε συσκευής και ο τύπος της κάθε συσκευής.

Κάθε έξυπνο σπίτι U έχει X_u ελεγχόμενες και Y_u μη-ελεγχόμενες συσκευές. Στο χρονικό ορίζοντα $t \in T$, το διάστημα λειτουργίας των συσκευών $x \in X_u$ και $y \in Y_u$ δηλώνεται με δυαδικές τιμές $\omega_u^x(t) \in 0, 1$ και $\omega_u^y(t) \in 0, 1$ (0 για OFF και 1 για ON):

- Δυαδική μεταβλητή ελεγχόμενης συσκευής (0 για OFF, 1 για ON)

$$\omega_u^x(t) = \{ 1 : t \in [r_x^s, r_x^e], \quad 0 : t \in T - [r_x^s, r_x^e] \} \quad (3.1)$$

όπου:

r_x^s : ώρα έναρξης λειτουργίας της ελεγχόμενης συσκευής x ,

r_x^e : ώρα τερματισμού λειτουργίας της ελεγχόμενης συσκευής x .

- Δυαδική μεταβλητή μη-ελεγχόμενης συσκευής (0 για OFF, 1 για ON)

$$\omega_u^y(t) = \{ 1 : t \in [r_y^s, r_y^e], \quad 0 : t \in T - [r_y^s, r_y^e] \} \quad (3.2)$$

όπου:

r_y^s : ώρα έναρξης λειτουργίας της μη-ελεγχόμενης συσκευής y ,

r_y^e : ώρα τερματισμού λειτουργίας της μη-ελεγχόμενης συσκευής y .

Η ονομαστική ισχύς των ελεγχόμενων και μη-ελεγχόμενων συσκευών συμβολίζεται ως P_u^{rx} και P_u^{ry} , αντίστοιχα. Η συνολική κατανάλωση ισχύος, $P_u^c(t)$, για κάθε έξυπνο σπίτι U κατά την ώρα t , υπολογίζεται από την κατανάλωση ισχύος των ελεγχόμενων συσκευών, $P_u^x(t)$, και την κατανάλωση ισχύος των μη-ελεγχόμενων συσκευών, $P_u^y(t)$, κατά την ώρα t , όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P_u^x(t) = P_u^{rx} \cdot \omega_u^x(t) \quad (3.3)$$

$$P_u^y(t) = P_u^{ry} \cdot \omega_u^y(t) \quad (3.4)$$

$$P_u^c(t) = \sum_{x=1}^{X_u} P_u^x(t) + \sum_{y=1}^{Y_u} P_u^y(t) \quad (3.5)$$

όπου:

$P_u^x(t)$: κατανάλωση ισχύος της ελεγχόμενης συσκευής x ,

$P_u^y(t)$: κατανάλωση ισχύος της μη-ελεγχόμενης συσκευής y .

Το $P_u^L(t)$ συμβολίζει τη DC ισχύ εισόδου του inverter. Για το P_u^L ισχύει ότι:

$$P_u^L(t) = \frac{P_u^c(t)}{n_l} \quad (3.6)$$

όπου:

n_l : ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC (inverter), ο οποίος θεωρείται ίσος με 0.9.

Επίσης, στον Πίνακα 3.1 δίνεται η ονομαστική τιμή ισχύος καθώς και ο τύπος της κάθε συσκευής (ελεγχόμενη, μη-ελεγχόμενη). Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από το άρθρο [5].

Πίνακας 3.1: Δεδομένα των συσκευών κάθε κατοικίας			
Είδος συσκευής	Αριθμός συσκευών	Κατανάλωση (W)	Τύπος συσκευής
Φώτα	2 – 8	25	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Βραστήρας	0 – 1	450	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Φούρνος μικροκυμάτων	0 – 1	800	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Ηλεκτρική σκούπα	0 – 1	700	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Τηλεόραση	0 – 3	150	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Ηλεκτρονικός υπολογιστής	1 – 5	250	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Ηλεκτρικό σίδερο	0 – 1	650	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Στεγνωτήρας μαλλιών	0 – 1	200	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Καφετιέρα	0 – 1	300	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Φρυγανιέρα	0 – 1	500	Μη-ελεγχόμενη συσκευή
Πλυντήριο ρούχων	0 – 1	800	Ελεγχόμενη συσκευή
Στεγνωτήριο ρούχων	0 – 1	1000	Ελεγχόμενη συσκευή
Πλυντήριο πιάτων	0 – 1	850	Ελεγχόμενη συσκευή
PEV	0 – 1	2000	Ελεγχόμενη συσκευή
EWB	0 – 1	500	Ελεγχόμενη συσκευή
HVAC	0 – 1	700	Ελεγχόμενη συσκευή

3.3.2 Μοντέλο Φ/Β διάταξης

Στον οικιακό τομέα, από τις ΑΠΕ τα Φ/Β συστήματα είναι τα πιο διαδεδομένα και μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν σε διάφορα είδη κτιρίων. Ωστόσο, το αν ένας χρήστης έχει τη δυνατότητα να έχει Φ/Β σύστημα στην κατοικία του εξαρτάται από την οικονομική του κατάσταση και από τους φυσικούς περιορισμούς του κτηρίου του. Στην παρούσα εργασία, τα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας η οποία τροφοδοτεί το φορτίο της γειτονιάς. Για σκοπούς υλοποίησης της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι όλες οι κατοικίες της γειτονιάς έχουν εγκατεστημένο ένα Φ/Β σύστημα στην οροφή τους. Η ισχύς εξόδου της εγκατεστημένης Φ/Β γεννήτριας, P_u^g , υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_u^g(t) = N_u^s \cdot N_u^p \cdot P_u^{pv} \cdot (G(t) / G_{STC}) \cdot (1 + a_p(T(t) - T_{STC})) \quad (3.7)$$

όπου:

N_u^s : ο αριθμός Φ/Β πλαισίων που συνδέονται σε σειρά,

N_u^p : ο αριθμός Φ/Β πλαισίων που συνδέονται παράλληλα,

P_u^{pv} : η ισχύς εξόδου ενός Φ/Β πλαισίου σε Standard Test Conditions (STC),

G_{STC} : η τιμή ηλιακής ακτινοβολίας σε STC,

$G(t)$: η τιμή προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας την ώρα t,

a_p : ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος,

T_{STC} : η θερμοκρασία σε STC,

$T(t)$: η τιμή θερμοκρασίας περιβάλλοντος την ώρα t.

Επίσης, συμβολίζοντας ως $P_u^{re}(t)$ συμβολίζει την ισχύ μετά το φορτιστή μπαταριών, ισχύει ότι:

$$P_u^{re}(t) = n_{re} \cdot P_u^g(t) \quad (3.8)$$

όπου:

n_{re} : ο βαθμός απόδοσης του φορτιστή μπαταριών, ο οποίος θεωρείται ίσος με 0.9.

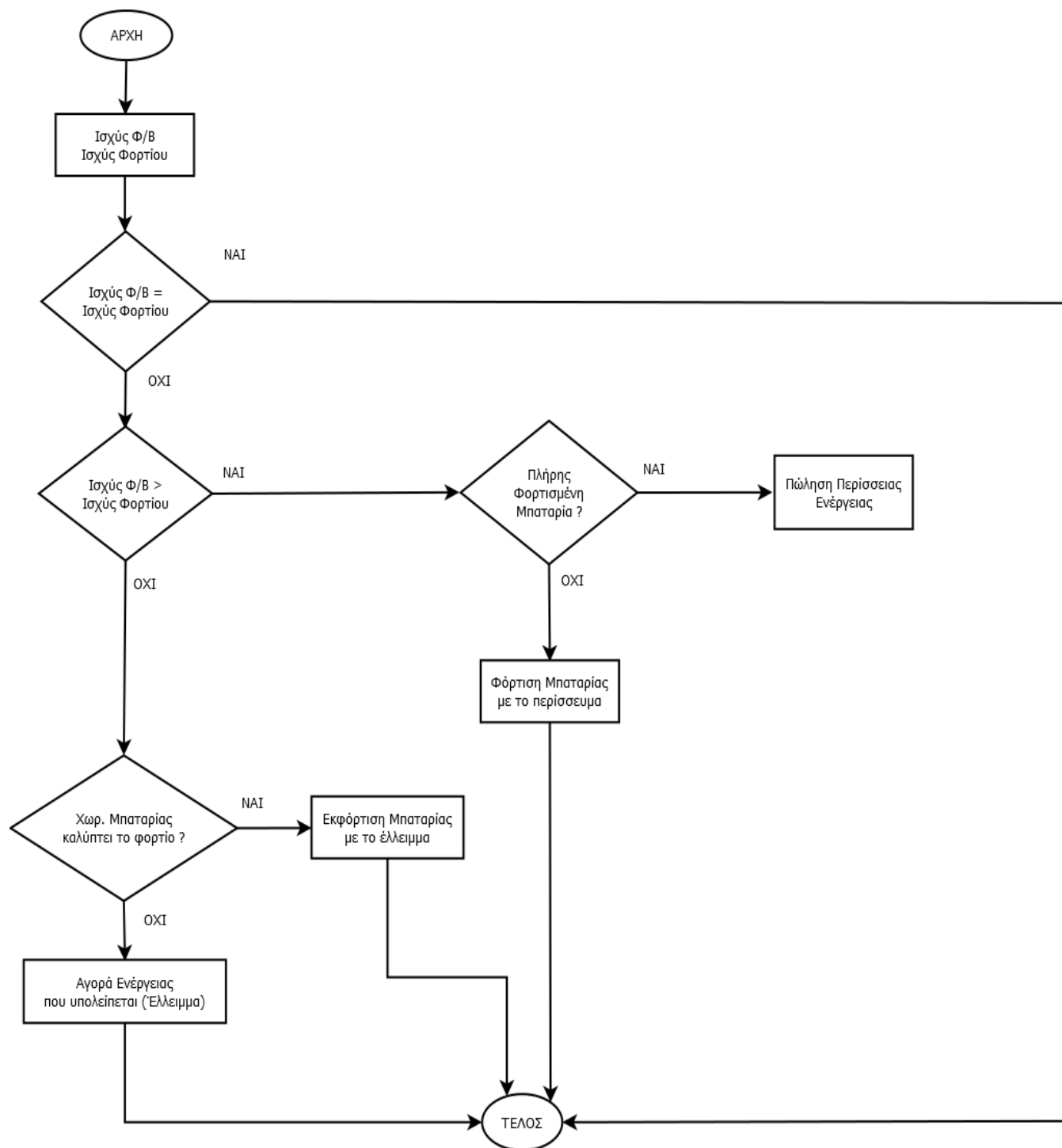
Θεωρείται ότι όλα τα έξυπνα σπίτια βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή και έτσι όλα τα Φ/Β συστήματα στην περιοχή της γειτονιάς λαμβάνουν την ίδια ακτινοβολία $G(t)$ και θερμοκρασία $T(t)$.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας του μικροδικτύου ο οποίος υλοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, λαμβάνει ως είσοδο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων, καθώς και των υπόλοιπων μονάδων του μικροδικτύου (συσκευές σπιτιού, συστοιχίες μπαταριών, ρυθμιστές φόρτισης, μετατροπείς DC/AC) που χρησιμοποιούνται, την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κάθε ώρα της ημέρας. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς των Φ/Β πλαισίων βάσει της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις.

3.3.3 Μοντέλο της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας

Για να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση της ενέργειας του συστήματος είναι απαραίτητη η χρήση συστοιχίας μπαταριών. Μέσα σε αυτήν αποθηκεύεται το περίσσειμα ενέργειας την οποία παράγει η Φ/Β συστοιχία όταν υπάρχει ηλιοφάνεια. Οι μπαταρίες είναι ο συχνότερος τύπος αποθήκευσης ενέργειας σε έξυπνες κατοικίες με Φ/Β συστήματα. Αυτό συμβαίνει διότι με τη χρήση των μπαταριών δίνεται η δυνατότητα να μην χάνεται η πλεονάζουσα ισχύς που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια. Η αποθηκευμένη ενέργεια της συστοιχίας μπαταριών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Στην παρούσα μελέτη, θεωρείται ότι αν κάποια ώρα της ημέρας υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας η οποία δεν μπορεί να αποθηκευτεί στη συστοιχία μπαταριών τότε αυτή η ενέργεια μπορεί να διοχετευτεί στις κατοικίες του μικροδικτύου. Σε περίπτωση που συνεχίζει να υπάρχει περίσσειμα ενέργειας στο μικροδίκτυο τότε αυτή η ενέργεια πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν όμως κάποια ώρα της ημέρας δεν αρκεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και η συστοιχία μπαταριών δεν μπορεί να καλύψει το φορτίο της συγκεκριμένης ώρας τότε υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ενέργειας από το μικροδίκτυο (δηλαδή οι κατοικίες μπορούν να αγοράσουν ενέργεια από τις υπόλοιπες κατοικίες που βρίσκονται στο μικροδίκτυο με μειωμένη τιμή σε σχέση με το να αγοράσουν ενέργεια από το δίκτυο). Σε περίπτωση που συνεχίζει να υπάρχει έλλειμμα ενέργειας στο μικροδίκτυο, τότε αγοράζεται ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών της εκάστοτε κατοικίας. Οι τιμές αγοράς ή πώλησης ενέργειας από το μικροδίκτυο είναι μειωμένες σε σχέση με τις τιμές αγοράς ή πώλησης ενέργειας από το δίκτυο.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η βασική ιδέα του αλγόριθμου προσομοίωσης σε ένα βήμα του. Το βήμα του αλγόριθμου αντιστοιχεί σε μία ώρα λειτουργίας του συνολικού μικροδικτύου. Αυτός ο αλγόριθμος προσομοίωσης εκτελείται για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης της λειτουργίας του μικροδικτύου (24 ώρες).



Σχήμα 3.2: Ο αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας του Φ/Β συστήματος με συστοιχία μπαταριών και διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Αν $P_u^{re} = P_u^L$ (από τις σχέσεις 3.6 και 3.8) τότε η κατάσταση φόρτισης και η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών δε μεταβάλλεται. Αν $P_u^{re} > P_u^L$ τότε ποσότητα ισχύος με τιμή P_u^L τροφοδοτεί το φορτίο. Το περίσσειμα ισχύος $P_u^{re} - P_u^L$ χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της συστοιχίας μπαταριών. Αν η συστοιχία μπαταριών φτάσει σε πλήρη φόρτιση όση ώρα είναι διαθέσιμο αυτό το περίσσειμα, η υπόλοιπη ισχύς πωλείται στους γείτονες ή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν $P_u^{re} < P_u^L$ τότε η ισχύς μετά τους φορτιστές μπαταριών, P_u^{re} , δεν επαρκεί για να καλύψει ολόκληρη τη ζήτηση του φορτίου. Το έλλειμμα ισχύος που προκύπτει, $P_u^L - P_u^{re}$, καλύπτεται από τη συστοιχία μπαταριών. Αν η συστοιχία μπαταριών εκφορτιστεί πλήρως τότε η υπόλοιπη ισχύς αγοράζεται από τη γειτονιά ή από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ισχύ που αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών ή εξάγεται από αυτήν, αντίστοιχα, $P_u^b(t)$, από τη σχέση (3.9), με βάση τον έλεγχο της συστοιχίας μπαταριών όπως περιγράφηκε πιο πάνω, ως εξής:

$$P_u^b(t) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Κατά τη φόρτιση : } (P_u^{re}(t) - P_u^L(t)) \cdot \eta_u^c \\ \text{Κατά την εκφόρτιση : } -(P_u^L(t) - P_u^{re}(t)) / \eta_u^d \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

όπου η_u^c και η_u^d είναι ο βαθμός απόδοσης φόρτισης και ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, αντίστοιχα.

Ακολούθως, όπως φαίνεται πιο πάνω, αν ισχύει ότι $P_u^{re}(t) > P_u^L(t)$, τότε η συστοιχία μπαταριών φορτίζεται και υπολογίζεται η ισχύς $P_u^b(t)$, με τη σχέση (3.9). Αντίστοιχα, αν ισχύει ότι $P_u^{re}(t) < P_u^L(t)$, τότε η συστοιχία μπαταριών εκφορτίζεται και υπολογίζεται η ισχύς εκφόρτισης, $P_u^b(t)$, με τη σχέση (3.9).

Εάν η ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, $P_u^b(t)$, ισούται με μηδέν αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει περίσσειμα ισχύος για να πωληθεί στους γείτονες ή στο ηλεκτρικό δίκτυο και ούτε απαιτείται να αγοραστεί από τους γείτονες ή από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Αν η ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, $P_u^b(t)$, είναι μικρότερη από το μηδέν, τότε η ισχύς μετά τους φορτιστές μπαταριών είναι μικρότερη από την απαιτούμενη ισχύ που χρειάζεται το φορτίο ($P_u^L - P_u^{re}$) και η ισχύς που υπολείπεται θα διοχετευθεί από τη συστοιχία μπαταριών. Εναλλακτικά, αν η ισχύς $P_u^b(t)$ είναι μεγαλύτερη του μηδενός, τότε η ισχύς μετά τους ρυθμιστές φόρτισης μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του φορτίου ($P_u^{re} - P_u^L$) και υπάρχει περίσσειμα ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι η αρχική κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών λαμβάνεται ίση με το 50% της ονομαστικής της χωρητικότητας.

Σε κάθε βήμα προσομοίωσης, υπολογίζεται η νέα κατάσταση φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών από τη σχέση (3.10):

$$SOC_u(t) = SOC_u(t-1) + \frac{\frac{P_u^b(t)}{E_u^{bat}} \cdot \Delta t}{C_u^{bat}} \quad (3.10)$$

όπου:

E_u^{bat} : η ονομαστική τάση της μπαταρίας,

C_u^{bat} : η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας,

Δt : το χρονικό βήμα προσομοίωσης, ίσο με 1h.

Αν η νέα κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών $SOC_u(t)$, είναι ίση με τη μέγιστη τιμή κατάστασης φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών SOC_u^{max} και η ισχύς μετά το φορτιστή μπαταριών P_u^{re} είναι ίση με την ισχύ εισόδου του inverter P_u^L , αυτό σημαίνει ότι η συστοιχία μπαταριών έχει φτάσει σε πλήρη φόρτιση χωρίς να υπάρχει κάποιο περίσσειμα ή έλλειμμα ενέργειας και ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα.

Αν όμως η νέα κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών $SOC_u(t)$, είναι ίση με τη μέγιστη τιμή κατάστασης της συστοιχίας μπαταριών SOC_u^{max} και η ισχύς μετά το φορτιστή μπαταριών P_u^{re} είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εισόδου του inverter P_u^L , αυτό σημαίνει ότι η συστοιχία μπαταριών έχει φτάσει σε πλήρη φόρτιση οπότε υπάρχει περίσσειμα το οποίο θα πωληθεί στους γείτονες ή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ισχύς η οποία διατίθεται προς πώληση υπολογίζεται από τη σχέση (3.11). Αφού υπολογιστεί η ισχύς που διατίθεται προς πώληση τη συγκεκριμένη ώρα, $P_u^{sell}(t)$, η ισχύς που αγοράζεται τη συγκεκριμένη ώρα, $P_u^{buy}(t)$, τίθεται ίση με μηδέν. Όταν υπολογιστούν οι παραπάνω τιμές, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο χρονικό βήμα.

$$P_u^{sell}(t) = (P_u^{re} - P_u^L) \cdot n_l \quad (3.11)$$

Εναλλακτικά, αν η νέα κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών $SOC_u(t)$, είναι μικρότερη από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης της, αυτό σημαίνει ότι ούτε η παραγόμενη ισχύς αλλά ούτε η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών επαρκούν για την κάλυψη του φορτίου τη συγκεκριμένη ώρα οπότε κρίνεται αναγκαίο να αγοραστεί ενέργεια είτε από την γειτονιά είτε από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η ισχύς η οποία χρειάζεται να αγοραστεί υπολογίζεται από τη σχέση (3.12). Αφού υπολογιστεί η ισχύς που αγοράζεται τη συγκεκριμένη ώρα, $P_u^{buy}(t)$, η ισχύς που πωλείται τη συγκεκριμένη ώρα, $P_u^{sell}(t)$, είναι ίση με μηδέν τη συγκεκριμένη ώρα. Όταν υπολογιστούν οι παραπάνω τιμές ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο χρονικό βήμα.

$$P_u^{buy}(t) = (P_u^L - P_u^{re}) / n_l \quad (3.12)$$

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για μια συστοιχία μπαταριών είναι ο καθορισμός των ορίων στην κατάσταση φόρτισής της. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως κατώτατο όριο το 30% ενώ ως ανώτατο το 100% ($30\% < SOC_u < 100\%$).

Οι τιμές πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνονται ως είσοδοι του αλγόριθμου που καθορίζονται από τον σχεδιαστή.

Στον Πίνακα 3.2 και Πίνακα 3.3 φαίνονται οι μη-χρονικά μεταβαλλόμενες και χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές πώλησης και αγοράς ενέργειας του δικτύου και της γειτονιάς αντίστοιχα. Όσον αφορά το περίσσειμα και το έλλειμμα ενέργειας, υπάρχουν διάφοροι τρόποι διαχείρισης με βάση τα τρία σενάρια. Στην εργασία δίνεται η δυνατότητα πώλησης της πιθανής περίσσειας ενέργειας κάθε χρονική στιγμή στη γειτονιά διαφορετικά πωλείται στο δίκτυο. Αντίστοιχα, και με το έλλειμα ενέργειας δίνεται η δυνατότητα αγοράς ενέργειας κάθε χρονική στιγμή από τη γειτονιά διαφορετικά αγοράζεται από το δίκτυο.

Πίνακας 3.2 Μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές συναλλαγών δικτύου και γειτονιάς			
Πηγή	Τιμές	Ώρες (h)	€/KWh
Δίκτυο	Τιμή αγοράς	(00:00-23:59)	0.16
	Τιμή πώλησης	(00:00-23:59)	0.09
Γειτονιά	Τιμή αγοράς	(00:00-23:59)	0.13
	Τιμή πώλησης	(00:00-23:59)	0.07

Πίνακας 3.3 Χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές συναλλαγών δικτύου και γειτονιάς				
Πηγή	Τιμές	Περίοδος	Ώρες (h)	€/KWh
Δίκτυο	Τιμή αγοράς	Ώρες εκτός αιχμής	(12:00-15:00) (22:00-06:00)	0.13
		Ώρες αιχμής	(06:00-12:00) (15:00-22:00)	0.16
	Τιμή πώλησης	-	(00:00-23:59)	0.09
Γειτονιά	Τιμή αγοράς	Ώρες εκτός αιχμής	(12:00-15:00) (22:00-06:00)	0.12
		Ώρες αιχμής	(06:00-12:00) (15:00-22:00)	0.15
	Τιμή πώλησης	-	(00:00-23:59)	0.08

Στο τέλος της προσομοίωσης για 24 ώρες λειτουργίας ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών την τελευταία ώρα. Αν η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών την τελευταία ώρα είναι μικρότερη από τη κατάσταση τους την πρώτη ώρα προσομοίωσης, τότε αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν είναι βιώσιμο διότι χρησιμοποιεί ενέργεια που δεν έχει παραχθεί κατά την διάρκεια της ημέρας.

3.4 Σενάρια

3.4.1 Baseline σενάριο

Σε αυτό το σενάριο, δεν πραγματοποιείται κάποιος έλεγχος στη λειτουργία των συσκευών που περιλαμβάνει η κάθε κατοικία. Κάθε φορά που ενεργοποιείται μια συσκευή από το χρήστη, η συσκευή αρχίζει να καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς προγραμματισμό. Επομένως, σε όλα τα έξυπνα σπίτια, οι έξυπνες συσκευές θεωρούνται μη-προγραμματιζόμενες συσκευές και επομένως δεν μπορούν να προγραμματιστούν κατά τη διάρκεια της ημέρας (24ώρες). Ως εκ τούτου, οι κατοικίες αφού είναι εξοπλισμένες με Φ/Β συστοιχίες και συστοιχίες μπαταριών, έχουν τη δυνατότητα φόρτισης ή εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών τους προς όφελος των έξυπνων σπιτιών καθώς και τη δυνατότητα πώλησης ή αγοράς ενέργειας από το μικροδίκτυο ή από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η συστοιχία μπαταριών φορτίζεται όταν υπάρχει πλεόνασμα Φ/Β παραγωγής και εκφορτίζεται όποτε υπάρχει περισσότερη κατανάλωση από την παραγωγή Φ/Β. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση που υπάρχει περίσσειμα ενέργειας και η συστοιχία μπαταριών προλάβει να φορτιστεί όση ώρα είναι διαθέσιμο αυτό το περίσσειμα, η υπόλοιπη ισχύς πωλείται στους γείτονες ή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που υπάρχει έλλειμα ενέργειας και η συστοιχία μπαταριών έχει φτάσει στο όριο εκφόρτισης της τότε η υπολειπόμενη ισχύς αγοράζεται από τη γειτονιά ή το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι σχετικοί αλγόριθμοι περιγράφηκαν αναλυτικότερα στην παράγραφο 3.3.3.

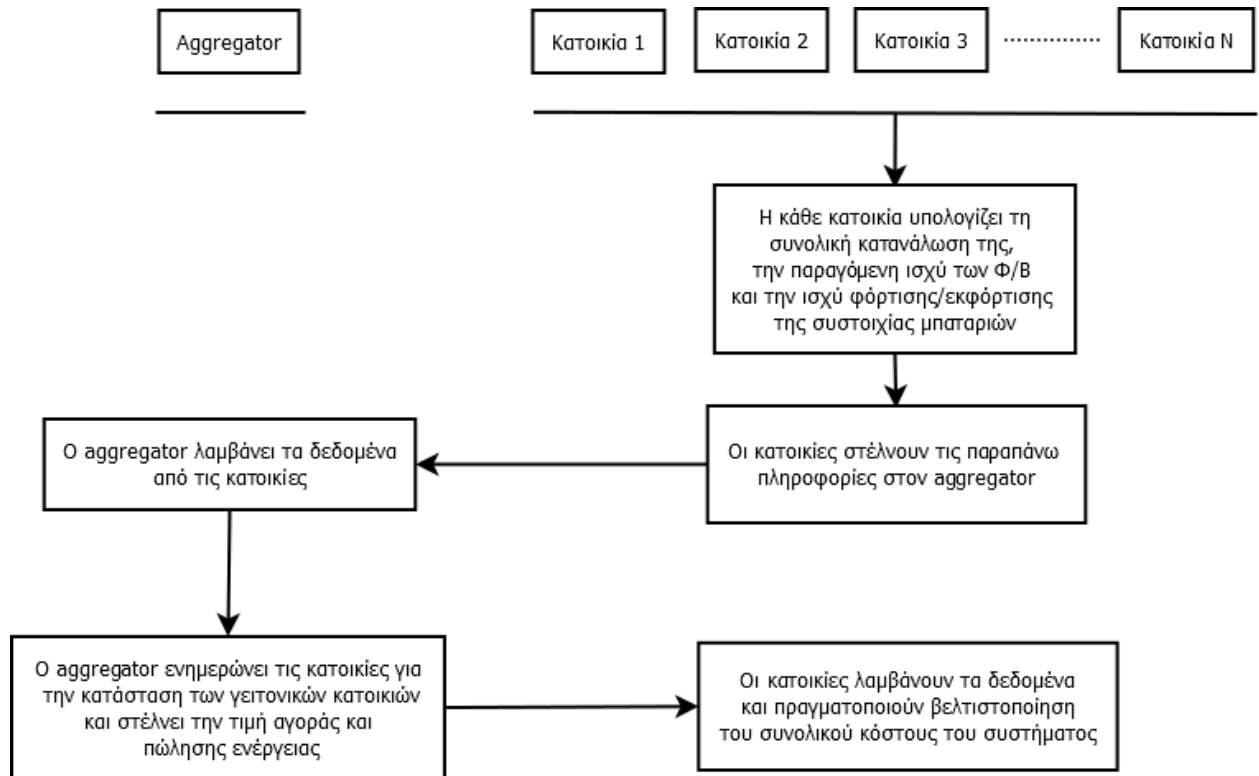
3.4.2 Μηχανισμοί συντονισμού

Εφαρμόστηκαν δύο μοντέλα συντονισμού (group-based και turn-based), τα οποία επιλύουν το ίδιο πρόβλημα βελτιστοποίησης αλλά διαφέρουν στην αρχή λήψης αποφάσεων των κατοικιών, σύμφωνα με τις αντίστοιχες μεθόδους της εργασίας [5]. Το group-based σενάριο επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης ταυτόχρονα για όλα τα έξυπνα σπίτια, ενώ το turn-based σενάριο επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης για το κάθε έξυπνο σπίτι ξεχωριστά, το ένα μετά το άλλο. Τα αρχικά στάδια του αλγόριθμου και για τα 3 σενάρια (baseline, group-based, turn-based) είναι κοινά όπως αναλύθηκαν στην ενότητα 3.3. Και στα δύο μοντέλα συντονισμού επιλύεται το ίδιο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ωστόσο, οι κατοικίες δεν επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά έχουν τη δυνατότητα να ενημερώνονται για το προφίλ κατανάλωσης των γειτονικών κατοικιών από τον aggregator. Στη συνέχεια, αναλύονται περισσότερο οι δύο αλγόριθμοι.

I. Group-based

Στην αρχή του συντονισμού, η κάθε κατοικία υπολογίζει τη συνολική κατανάλωση της, $P_u^L(t)$, την παραγόμενη ισχύ των Φ/Β, $P_u^{re}(t)$, καθώς και την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, $P_u^b(t)$, ανά ώρα, όπως αναλύθηκε περαιτέρω στην ενότητα 3.3. Στη συνέχεια, οι κατοικίες ενημερώνουν τον aggregator για τα παραπάνω. Ο aggregator ενημερώνει τις κατοικίες για την κατάσταση των γειτονικών κατοικιών αφού οι κατοικίες δεν επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά μόνο με τον aggregator. Οι κατοικίες ενημερώνονται για το συνολικό προφίλ κατανάλωσης, την παραγόμενη ισχύ και την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών των γειτονικών κατοικιών έτσι ώστε να πραγματοποιείται καλύτερη διαχείριση ενέργειας στο μικροδίκτυο (π.χ τις ώρες που έχει περίσσειμα ή έλλειμα ενέργειας). Επίσης ο aggregator στέλνει την τιμή αγοράς ενέργειας λ_t^{buy} και την τιμή πώλησης λ_t^{sell} στις κατοικίες. Οι κατοικίες μόλις λάβουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες πραγματοποιούν τη βελτιστοποίηση ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο κόστος του συνολικού συστήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης αναλύεται στην επόμενη ενότητα 3.5.

Το διάγραμμα του group-based συντονισμού φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Επίσης, φαίνεται η διαδικασία όπου οι κατοικίες επικοινωνούν με τον aggregator και στη συνέχεια επιλύουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης ταυτόχρονα για όλα τα έξυπνα σπίτια.



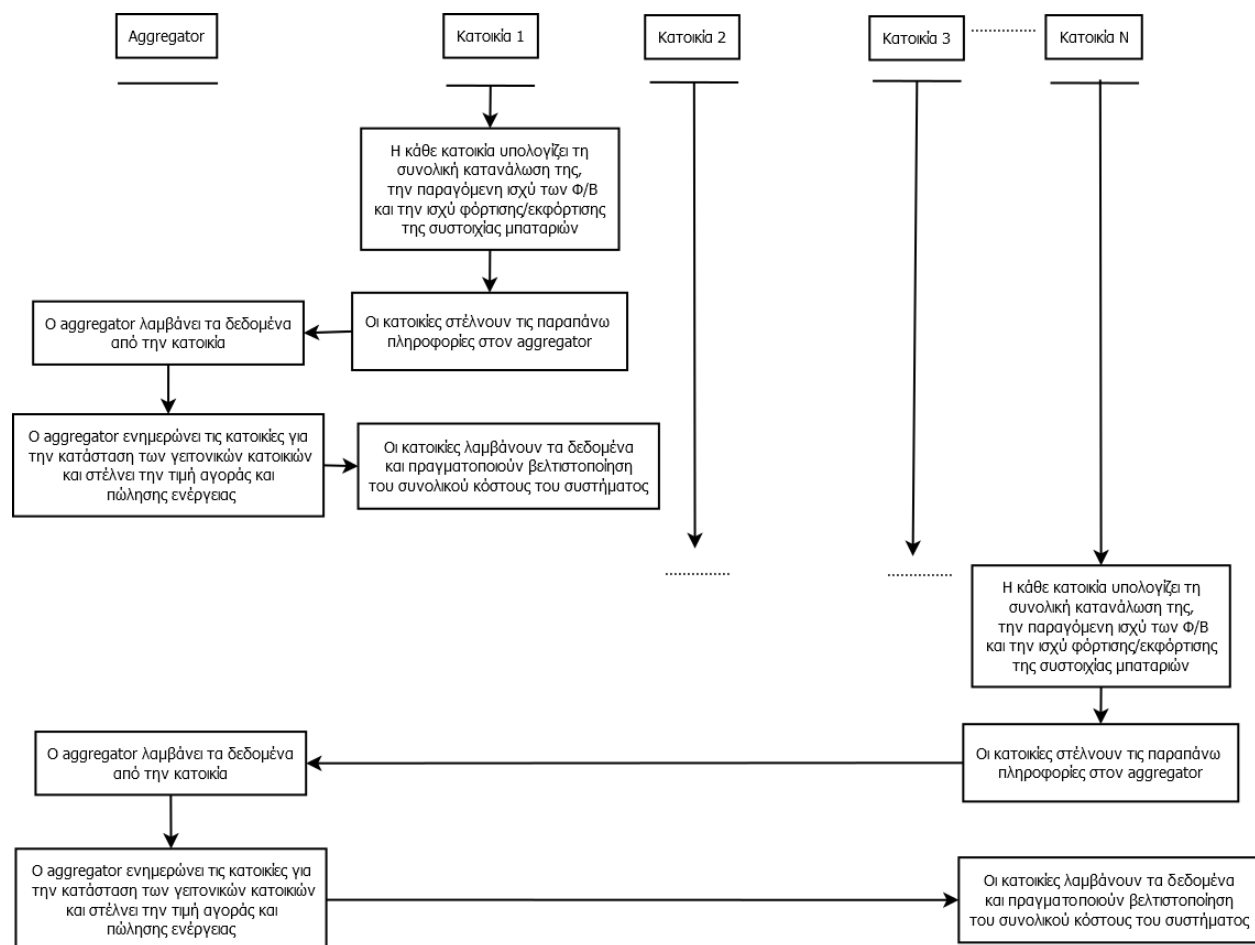
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα group-based συντονισμού [5].

II. Turn-based

Η κύρια διαφορά μεταξύ του μοντέλου group-based και του turn-based είναι ότι οι κατοικίες επικοινωνούν με τον aggregator και επιλύουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης το ένα μετά το άλλο ξεχωριστά για την κάθε κατοικία στο μοντέλο turn-based, ενώ στο μοντέλο group-based πραγματοποιείται ταυτόχρονα για όλες τις κατοικίες.

Στην αρχή του συντονισμού, η κάθε κατοικία υπολογίζει τη συνολική κατανάλωση της, $P_u^L(t)$, την παραγόμενη ισχύ των Φ/Β, $P_u^{re}(t)$, καθώς και την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, $P_u^b(t)$, ανά ώρα, όπως αναλύθηκε περαιτέρω στην ενότητα 3.3. Στη συνέχεια, οι κατοικίες ενημερώνουν τον aggregator για τα παραπάνω. Ο aggregator ενημερώνει τις κατοικίες για την κατάσταση των γειτονικών κατοικιών αφού οι κατοικίες δεν επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά μόνο με τον aggregator. Οι κατοικίες ενημερώνονται για το συνολικό προφίλ κατανάλωσης, την παραγόμενη ισχύ και την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών των γειτονικών κατοικιών έτσι ώστε να πραγματοποιείται καλύτερη διαχείριση ενέργειας στο μικροδίκτυο (π.χ. τις ώρες που έχει περίσσειμα ή έλλειμα ενέργειας). Επίσης ο aggregator στέλνει την τιμή αγοράς ενέργειας λ_t^{buy} και την τιμή πώλησης λ_t^{sell} στις κατοικίες. Οι κατοικίες μόλις λάβουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες πραγματοποιούν τη βελτιστοποίηση ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο κόστος του συνολικού συστήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης αναλύεται στην επόμενη ενότητα 3.5.

Το διάγραμμα του turn-based συντονισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Επιπλέον, φαίνεται η διαδικασία όπου οι κατοικίες επικοινωνούν με τον aggregator και στη συνέχεια επιλύουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης για το κάθε έξυπνο σπίτι ξεχωριστά.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα turn-based συντονισμού [5].

3.5 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου ανακαλύπτοντας το βέλτιστο τρόπο διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα είναι σημαντικό να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του κόστους με το χρονοπρογραμματισμό των συσκευών. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση ψάχνει την κατάλληλη ώρα λειτουργίας των ελεγχόμενων συσκευών με βάση τις ανάγκες του κάθε καταναλωτή. Η βελτιστοποίηση ελαχιστοποιεί τη ζήτηση ενέργειας καθώς και το κόστος. Επίσης, στο μικροδίκτυο χρησιμοποιούνται Φ/Β συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου αυτή η ενέργεια αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών. Το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή δίνεται η δυνατότητα αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από και προς τη γειτονιά ή το ηλεκτρικό δίκτυο όποτε κριθεί αναγκαίο. Αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας το οποίο δεν είναι δυνατό να αποθηκευτεί στη συστοιχία μπαταριών τότε η ενέργεια αυτή διατίθεται στη γειτονιά ή στο δίκτυο και αν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας τότε εισάγεται ενέργεια από τη γειτονιά ή το δίκτυο για να μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες των καταναλωτών (κατοικίες). Το μικροδίκτυο έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος PSO για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO είναι μια υπολογιστική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους James Kennedy και Russell Eberhart το 1995 και τελειοποιήθηκε από τους Kennedy και Eberhart το 2001 [10]-[12].

Ο αλγόριθμος PSO χρησιμοποιεί ένα σύνολο σωματιδίων (swarm) τα οποία ψάχνουν να βρουν τη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το κάθε σωματίδιο (particle) αποτελεί μια ανεξάρτητη λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, επιλέγεται η καλύτερη λύση με την αξιολόγηση όλων των σωματιδίων. Ο αλγόριθμος PSO έχει το χαρακτηριστικό της μνήμης δηλαδή έχει την ικανότητα να θυμάται και να αποθηκεύει λύσεις που έχει βρει στο παρελθόν με αποτέλεσμα να ξεχωρίζει σε σχέση με τους άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Σε κάθε επανάληψη αποθηκεύεται η βέλτιστη λύση κάθε

σωματιδίου (pbest) ξεχωριστά καθώς και η βέλτιστη λύση από όλο το σύνολο σωματιδίων (gbest).

Το κάθε σωματίδιο έχει τυχαία αρχική θέση και τυχαία αρχική ταχύτητα. Σε κάθε επανάληψη, η κίνηση του σωματιδίου σε ένα χώρο αναζήτησης ορίζει και αποθηκεύει τη βέλτιστη λύση του εκάστοτε προβλήματος.

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου σε κάθε επανάληψη είναι:

- I. η προηγούμενη ταχύτητα.
- II. μια συνιστώσα της προηγούμενης ταχύτητας του κάθε σωματιδίου με την οποία γίνεται αναζήτηση για νέα βέλτιστη θέση του σωματιδίου (ατομικό βέλτιστο, pbest).
- III. μια συνιστώσα της ταχύτητας του κάθε σωματιδίου που αναζητεί τη νέα βέλτιστη θέση παίρνοντας πληροφορίες από τα γειτονικά του σωματίδια (καθολικό βέλτιστο, gbest).

Τα πλεονεκτήματα του αλγόριθμου PSO περιλαμβάνουν:

- την ικανότητα αποθήκευσης των βέλτιστων θέσεων των σωματιδίων, τόσο στα ατομικά όσο και στα καθολικά βέλτιστα. Αυτό κάνει τη σύγκλιση πιο γρήγορη καθώς μετακινεί τα σωματίδια σε θέσεις που υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί η βέλτιστη λύση.
- την απλή υλοποίηση του, καθώς χρησιμοποιούνται βασικές και απλές εξισώσεις για τον ορισμό των παραμέτρων.

Στην παρούσα διπλωματική, το πρόβλημα που έχει ως στόχο να αντιμετωπίσει είναι ο βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός του φορτίου με την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων των εκάστοτε κτηρίων της γειτονιάς με το ελάχιστο οικονομικό κόστος. Το μικροδίκτυο πραγματοποιεί βέλτιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος το οποίο επιτυγχάνεται με τον χρονοπρογραμματισμό των ελεγχόμενων συσκευών των εκάστοτε κτηρίων της γειτονιάς. Το φορτίο του συστήματος διακρίνεται σε δύο υποκατηγορίες, το μη-προγραμματιζόμενο φορτίο και το χρονοπρογραμματιζόμενο. Το μη-προγραμματιζόμενο φορτίο δίνεται ως είσοδος στο σύστημα, σε μορφή txt αρχείου, με προκαθορισμένη κατανάλωση ισχύος σε Watt ανά ώρα για μια ημέρα (24 ώρες) όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4 και αντιστοιχεί σε πραγματικό προφίλ του μέσου ημερήσιου προφίλ ισχύος. Το προφίλ ισχύος προσαρμόζεται στις συνήθειες μιας

σύγχρονης ελληνικής οικογένειας, όπου παρατηρείται αυξημένη ζήτηση του φορτίου από το απόγευμα και μετά λόγω του ότι οι καταναλωτές επιστρέφουν στις οικίες τους μετά τη δουλειά τους. Το χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο δίνεται και αυτό ως είσοδος σε μορφή txt αρχείου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5, με τη διαφορά ότι δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί από τον αλγόριθμο PSO πια είναι η βέλτιστη ώρα λειτουργίας για κάθε συσκευή. Για κάθε συνδυασμό χρονοπρογραμματισμού προκύπτει μια λύση που αντιστοιχεί στο συνολικό κόστος του συστήματος. Το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται με το συνολικό κόστος της ισχύος που αγοράστηκε και πωλήθηκε από και προς τη γειτονιά ή το δίκτυο.

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος PSO, γίνεται αρχικοποίηση όλων των απαιτούμενων εισόδων. Αρχικά, για κάθε μεταβλητή βελτιστοποίησης ορίζεται η μέγιστη δυνατή τιμή της. Για παράδειγμα ως μέγιστη τιμή για τις χρονοπρογραμματιζόμενες συσκευές ορίστηκε η τελευταία δυνατή ώρα έναρξης τους η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.5. Επίσης, στον Πίνακα 3.5 φαίνεται το διάστημα λειτουργίας και η κατανάλωση της κάθε χρονοπρογραμματιζόμενης συσκευής.

Πίνακας 3.4: Μη-προγραμματιζόμενο φορτίο	
Ωρα ημέρας (h)	Κατανάλωση ισχύος (kW)
1	0.2
2	0.15
3	0.2
4	0.25
5	0.2
6	0.2
7	0.2
8	0.3
9	0.4
10	0.4
11	0.5
12	0.6
13	0.7
14	0.8
15	0.6
16	0.7
17	0.9
18	1.2
19	3
20	2.7
21	1.9
22	1.2
23	0.7
24	0.5
Σύνολο	18.5

Πίνακας 3.5: Χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο				
Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
Πλυντήριο ρούχων	00:00	23:59	1.5	800
Στεγνωτήριο ρούχων	00:00	23:59	1.5	1000
Πλυντήριο πιάτων	00:00	23:59	1	850
PEV	00:00	23:59	2	2000
EWB	00:00	23:59	1.5	500
HVAC	00:00	23:59	1.5	700

Στον Πίνακα 3.5 φαίνεται το διάστημα λειτουργίας, η κατανάλωση και η νωρίτερη και τελευταία ώρα έναρξης της κάθε χρονοπρογραμματιζόμενης συσκευής.

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίων				
Ονομαστική ισχύς P_u^{pv} (Watt)	Φ/Β σε σειρά	Φ/Β παράλληλα	Ηλιακή ακτινοβολία σε STC (W/m^2)	Θερμοκρασία σε STC ($^{\circ}C$)
200	3	2	1000	25

Στον Πίνακα 3.6 φαίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β. Αυτά είναι η ισχύς, ο αριθμός Φ/Β πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν σε σειρά ή και παράλληλα καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία σε STC.

Πίνακας 3.7: Χαρακτηριστικά μπαταρίας				
Ονομαστική χωρητικότητα (Ah)	Μπαταρίες σε σειρά	Ελάχιστο επιτρεπτό ποσοστό φόρτισης (%)	Ονομαστική τάση (V)	Βαθμός απόδοσης φόρτισης/εκφόρτισης
300	3	0.3	24	0.9

Στον Πίνακα 3.7 φαίνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της συστοιχίας μπαταριών όπως δίνονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

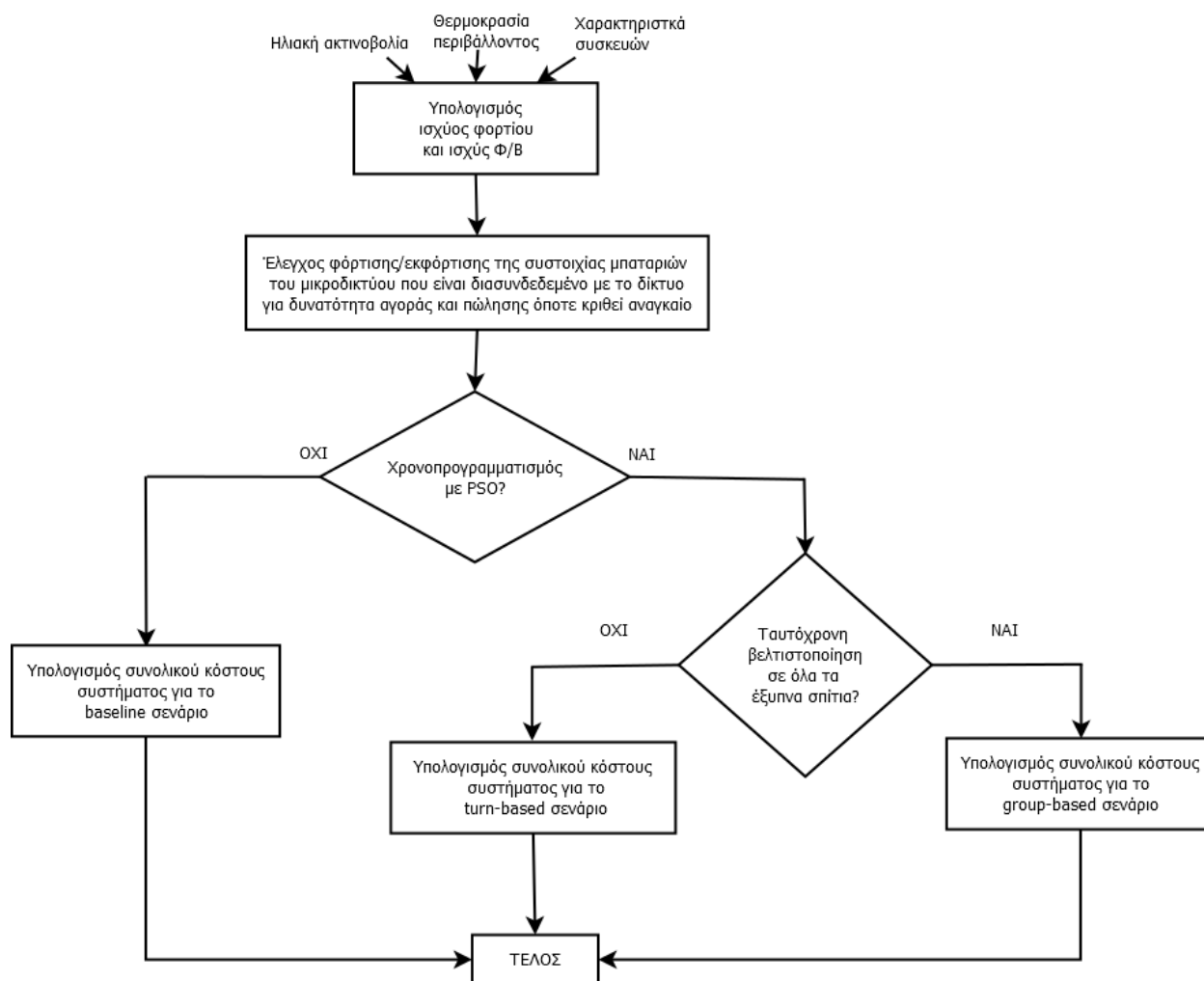
Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικά φορτιστή μπαταρίας και μετατροπέα DC/AC	
Βαθμός απόδοσης φορτιστή μπαταρίας	Βαθμός απόδοσης μετατροπέα DC/AC
0.9	0.9

Ο βαθμός απόδοσης του φορτιστή μπαταρίας και του μετατροπέα DC/AC όπως δίνονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης φαίνονται στον Πίνακα 3.8.

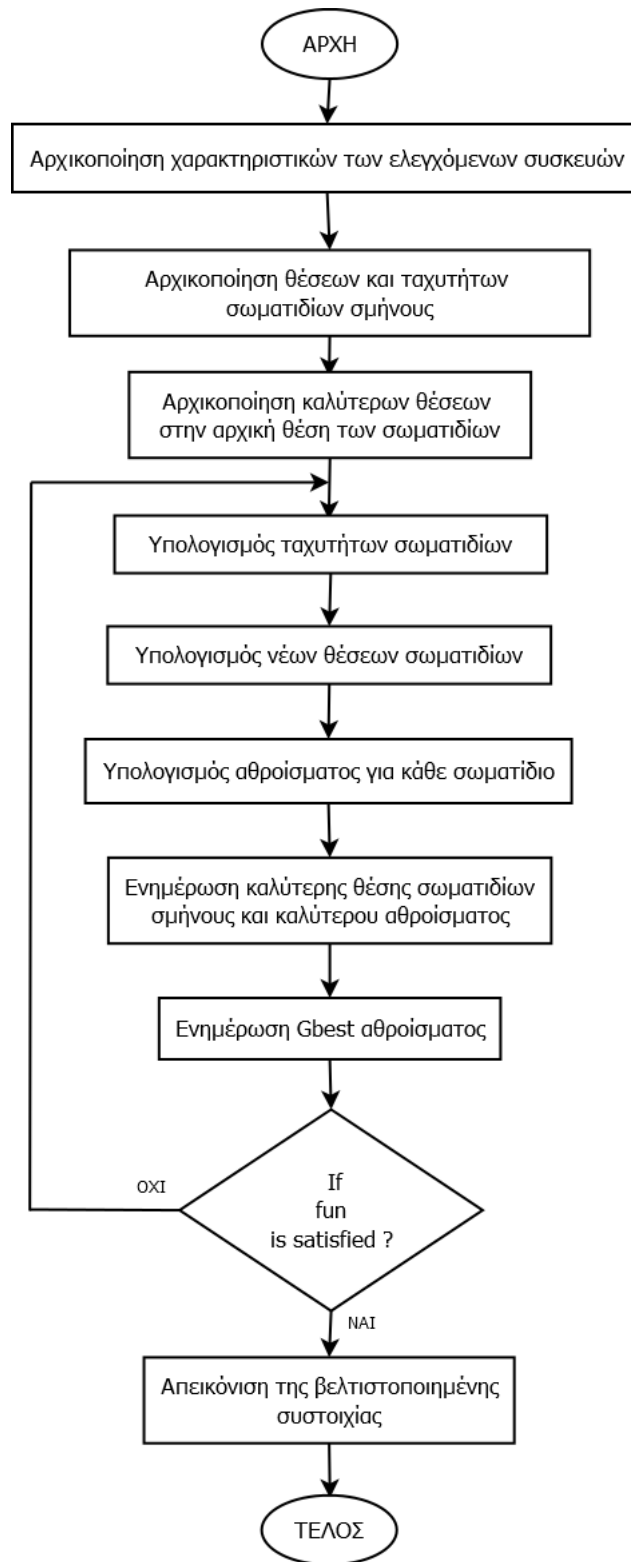
Πίνακας 3.9: Χαρακτηριστικά περιοχής			
Γεωγραφικό πλάτος (°)	Γεωγραφικό μήκος (°)	Συντελεστής ανάκλασης εδάφους	Ζώνη ώρας GMT
35.3	24.02	0.2	2

Στον Πίνακα 3.9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία βρίσκεται η γειτονιά με τα κτήρια όπου γίνεται η εγκατάσταση όπως δίνονται ως είσοδοι στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Αρχικά, ο αλγόριθμος επιλέγει με πιο σενάριο θα πραγματοποιήσει την βελτιστοποίηση του προβλήματος. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η διαδικασία απόφασης των σεναρίων. Για κάθε σενάριο υπολογίζονται οι χρόνοι λειτουργίας των ελεγχόμενων συσκευών με τους οποίους πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος. Στο τέλος υπολογίζεται το συνολικό κόστος του συστήματος για το κάθε σενάριο.



Σχήμα 3.5: Συνολική διαδικασία βελτιστοποίησης και διαδικασία απόφασης των σεναρίων.



Σχήμα 3.6: Διαδικασία βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο PSO.

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης του αλγόριθμου PSO που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των group-based και turn-based σεναρίων. Στο baseline σενάριο δεν πραγματοποιείται ο αλγόριθμος PSO αφού δεν εκτελείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών. Ο αλγόριθμος PSO υπολογίζει τη βέλτιστη ώρα λειτουργίας των χρονοπρογραμματιζόμενων συσκευών. Παρακάτω αναλύεται η εκτέλεση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος PSO επιλύει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Σκοπός του είναι να βρει την καλύτερη θέση στην αντικειμενική συνάρτηση, η οποία ονομάζεται σωματίδιο, δηλαδή στην παρούσα εργασία να βρεθεί η βέλτιστη ώρα λειτουργίας των χρονοπρογραμματιζόμενων συσκευών. Τα σωματίδια αντιπροσωπεύουν υποψήφιες λύσεις σε ένα χώρο λύσης και η βέλτιστη λύση βρίσκεται μέσω της μετακίνησης των θέσεων των σωματιδίων στον χώρο. Για τα σωματίδια, οι αρχικές θέσεις και οι ταχύτητες αρχικοποιούνται τυχαία. Κάθε σωματίδιο αποκτά μια αρχική ταχύτητα. Μόλις αρχικοποιηθούν όλα τα δεδομένα, μέσα σε κάθε βρόχο επανάληψης ο αλγόριθμος υπολογίζει το κάθε αποτέλεσμα. Στο βρόχο υπολογίζεται για κάθε σωματίδιο και η ταχύτητα του. Για κάθε επανάληψη, το pbest είναι η βέλτιστη λύση του σωματιδίου. Από όλες τις επαναλήψεις που πραγματοποιούνται, το gbest ορίζεται ως η βέλτιστη λύση του σωματιδίου. Στην συνέχεια, με την εύρεση των καλύτερων λύσεων, τα σωματίδια ενημερώνονται με τις καινούργιες τους θέσεις. Έτσι σε κάθε επανάληψη αναζητείται ο καλύτερος συνδυασμός θέσεων των σωματιδίων του σμήνους αφού αλλάζουν θέσεις με βάση την τιμή της ταχύτητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αποτελέσματος της για κάθε σωματίδιο. Ακολούθως, πραγματοποιείται έλεγχος για το αν το αποτέλεσμα της συνάρτησης έχει μικρότερη τιμή από το pbest και αν αυτό ισχύει τότε το pbest αποθηκεύει το αποτέλεσμα της συνάρτησης διαφορετικά κράτα την τιμή που είχε προηγουμένως. Αφού γίνει η ενημέρωση όλων των τιμών του pbest θα βρεθεί το gbest το οποίο είναι η βέλτιστη τιμή όλων των επαναλήψεων. Στο τέλος της προσομοίωσης, το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα λαμβάνεται ως λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Αρχικά, ο αλγόριθμος PSO αρχικοποιεί όλες τις απαιτούμενες εισόδους και ορίζει ως μέγιστη τιμή για τις χρονοπρογραμματιζόμενες συσκευές την τελευταία ώρα έναρξης τους. Η διάρκεια ολοκλήρωσης μιας βελτιστοποίησης είναι 4 ώρες.

Από τη σχέση (3.13) δίνεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Στην συνάρτηση αυτή, πολλαπλασιάζεται η ισχύς που αγοράστηκε από το δίκτυο, P^{buy} , με το χρονικό διάστημα ΔT και την τιμή αγοράς της ισχύος λ_t^{buy} . Η ισχύς που πωλήθηκε στο δίκτυο, P^{sell} , πολλαπλασιάζεται με το χρονικό διάστημα ΔT και την τιμή πώλησης λ_t^{sell} . Η διαφορά των δύο αυτών όρων καθορίζει το ελάχιστος κόστος λειτουργίας του συστήματος μέσω του βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού λειτουργίας των ελεγχόμενων συσκευών.

$$C_u = \sum_{t=1}^T (P^{buy} \cdot \Delta t \cdot \lambda_t^{buy} - P^{sell} \cdot \Delta t \cdot \lambda_t^{sell}) \quad (3.13)$$

όπου:

P^{buy} : η ισχύς που αγοράστηκε την ώρα t από το δίκτυο,

P^{sell} : η ισχύς που πωλήθηκε την ώρα t στο δίκτυο,

λ_t^{buy} : τιμή αγοράς της ισχύος [€/kWh],

λ_t^{sell} : τιμή πώλησης της ισχύος [€/kWh].

4.

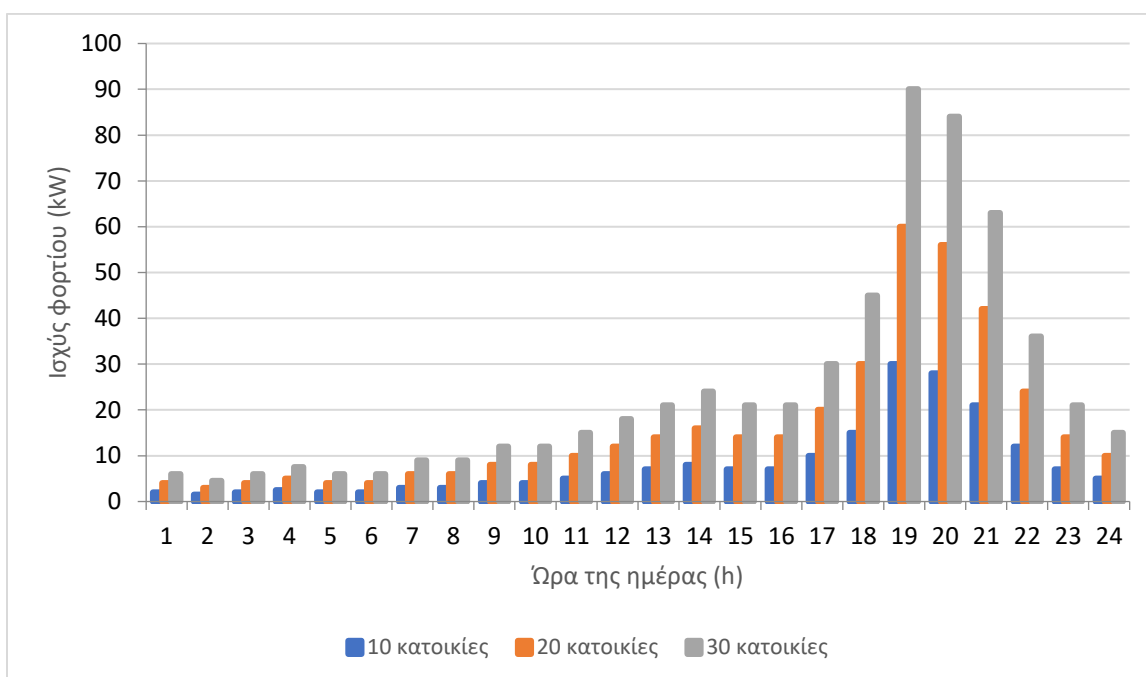
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας ενός μικροδικτύου το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο της ΔΕΗ. Στο μικροδίκτυο περιλαμβάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των Φ/Β, το σύστημα της συστοιχίας μπαταριών για την αποθήκευση της ενέργειας και η δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των κατοικιών. Παρουσιάζονται αποτελέσματα για διαφορετικούς αριθμούς κατοικιών σε μια γειτονιά (10, 20, 30), για διαφορετικές μέρες ανά εποχή του έτους καθώς και για μη-χρονικά μεταβαλλόμενες και χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα αποτελέσματα αφορούν τα σενάρια βελτιστοποίησης και μεθόδων συντονισμού της έξυπνης γειτονιάς που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και ο αλγόριθμος προσομοίωσης που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εκτελέστηκαν για τα τρία σενάρια της έξυπνης γειτονιάς τα οποία είναι:

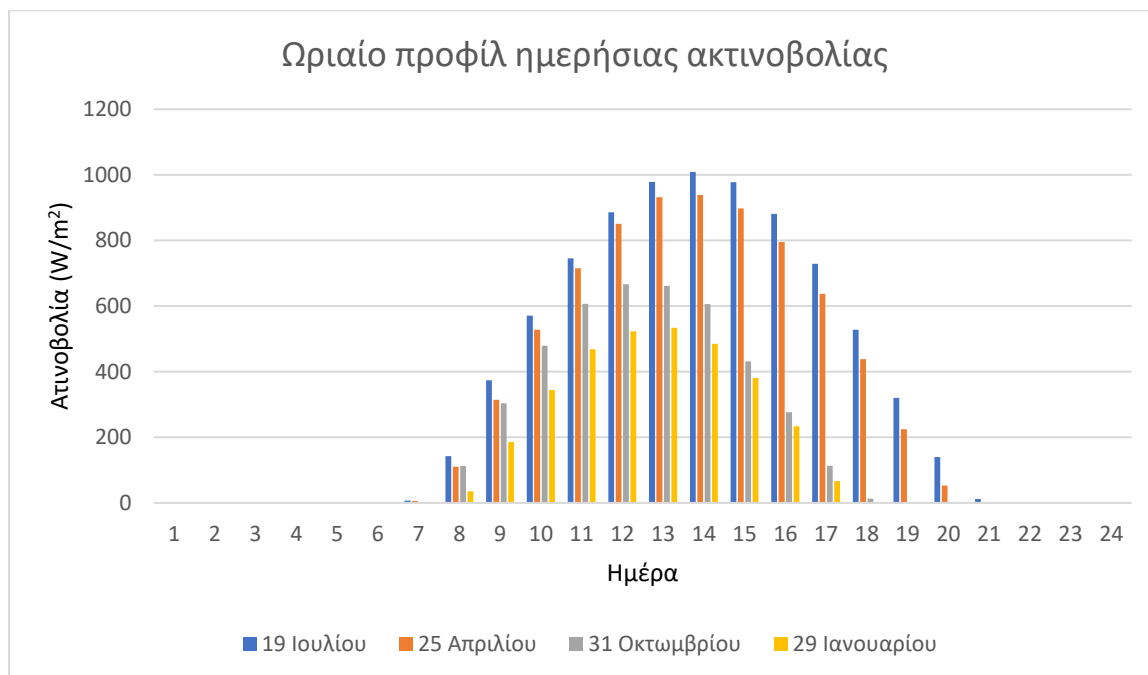
- Baseline σενάριο
- Group-based συντονισμός
- Turn-based συντονισμός

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο είναι για κτήρια στη πόλη των Χανίων με γεωμετρικό πλάτος 35.3° , γεωγραφικό μήκος 24.02° και με συντελεστή ανάκλασης εδάφους ίσο με 0.2. Επίσης, η ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας κάθε κατοικίας είναι 1200W αφού η Φ/Β συστοιχία της κάθε κατοικίας αποτελείται από τρία Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και δύο τέτοιες σειρές συνδεδεμένες παράλληλα. Η ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών της κάθε κατοικίας είναι 300Ah. Η συστοιχία μπαταριών της κάθε κατοικίας αποτελείται από τρεις μπαταρίες σε σειρά, με συνολική ονομαστική τάση 72V.

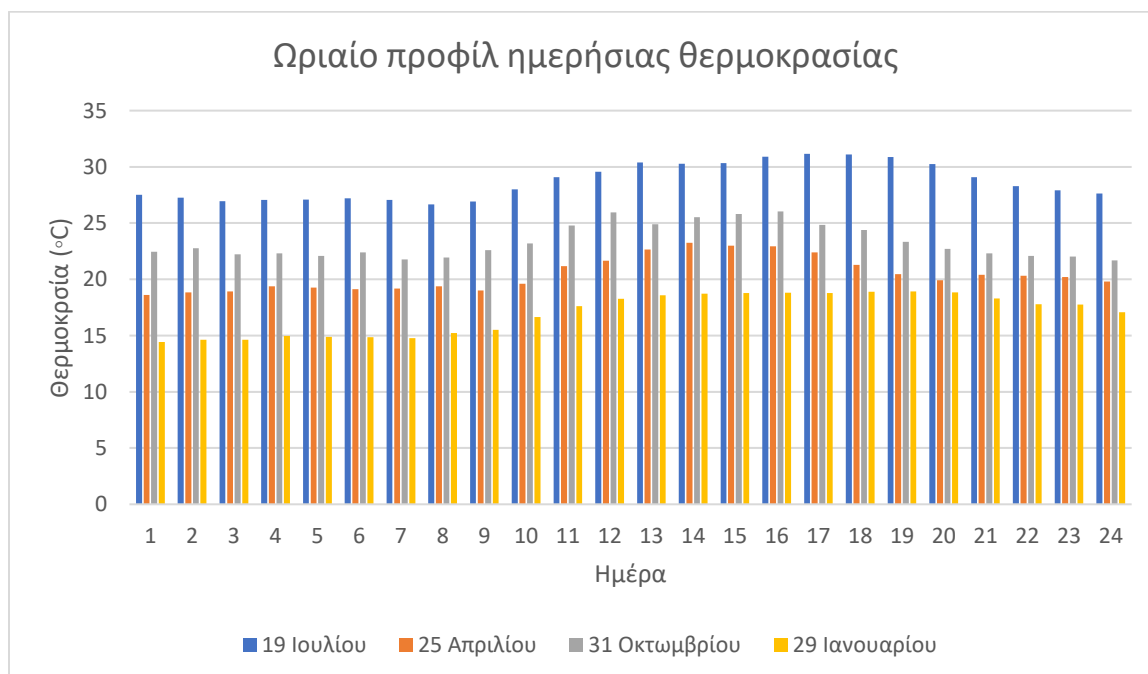


Σχήμα 4.1: Ωριαίο ημερήσιο προφίλ φορτίου της γειτονιάς χωρίς χρονοπρογραμματισμό.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια κατανάλωση ισχύος σε kW ανά ώρα χωρίς χρονοπρογραμματισμό για διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30) που βρίσκονται στη γειτονιά, που φανερώνει πως οι οικιακοί καταναλωτές έχουν αυξημένες ανάγκες κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τις πρωινές και τις μεσημβρινές ώρες η πλειοψηφία των καταναλωτών βρίσκεται στο χώρο εργασίας του και έτσι δεν υπάρχει ταυτοχρονισμός της μέγιστης ζήτησης με τη μέγιστη παραγωγή του Φ/Β συστήματος, που είναι κατά τις μεσημβρινές ώρες όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Επίσης, παρατηρείται ότι με την αύξηση του μεγέθους της γειτονιάς, υπάρχει αύξηση και στην κατανάλωση.



Σχήμα 4.2: Ωριαίο προφίλ ημερήσιας ακτινοβολίας για διαφορετικές ημέρες ανά εποχή.



Σχήμα 4.3: Ωριαίο προφίλ ημερήσιας θερμοκρασίας για διαφορετικές ημέρες ανά εποχή.

Στο Σχήμα 4.2 και στο Σχήμα 4.3, φαίνονται αντίστοιχα οι ωριαίες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για διαφορετικές ημέρες ανά εποχή του έτους, βασισμένες στα αρχεία txt με τις ωριαίες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση ενέργειας του συστήματος επιλέγοντας την κατάλληλη ώρα λειτουργίας κάθε ελεγχόμενου φορτίου του Πίνακα 3.5 έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει το κόστος λειτουργίας για μια μέρα λειτουργίας.

Αρχικά, εξετάστηκε η περίπτωση που η τιμή αγοράς κιλοβατώρας από τη γειτονιά είναι 0.13 €/kWh και 0.16 €/kWh από το δίκτυο, ενώ η τιμή πώλησης από τη γειτονιά είναι 0.07 €/kWh και 0.09 €/kWh από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, το συνολικό ενεργειακό κόστος για μια ημέρα λειτουργίας με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές πώλησης και αγοράς ανέρχεται στα 14.59 € και το βελτιστοποιημένο κόστος με το group-based σενάριο ανέρχεται στα 12.93 €. Επομένως, οι καταναλωτές είναι σε θέση να εξοικονομήσουν 1.66 € ή 11.37 % του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ημέρα, γεγονός που αντιπροσωπεύει σημαντική μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά μακροπρόθεσμα. Επίσης, το βελτιστοποιημένο κόστος για το turn-based σενάριο ανέρχεται στα 11.12 €. Επομένως, οι καταναλωτές είναι σε θέση να εξοικονομήσουν 3.47 € ή 23.78 % του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ημέρα.

Στο επόμενο σενάριο που εξετάστηκε, η τιμή πώλησης κιλοβατώρας από τη γειτονιά μεταξύ των 12:00-15:00 και 20:00-08:00 είναι 0.12 €/kWh και από τις 08:00-12:00 και 15:00-20:00 η τιμή πώλησης κιλοβατώρας από τη γειτονιά είναι 0.15 €/kWh. Η τιμή αγοράς από τη γειτονιά από τις 00:00-24:00 είναι 0.08 €/kWh. Η τιμή πώλησης κιλοβατώρας από το δίκτυο μεταξύ των 12:00-15:00 και 20:00-08:00 είναι 0.13 €/kWh και από τις 08:00-12:00 και 15:00-20:00 η τιμή πώλησης κιλοβατώρας στο δίκτυο είναι 0.16 €/kWh. Η τιμή αγοράς από το δίκτυο από τις 00:00-24:00 είναι 0.09 €/kWh. Τότε, το συνολικό ενεργειακό κόστος για μια ημέρα λειτουργίας με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές πώλησης και αγοράς ανέρχεται στα 13.31 € και το βελτιστοποιημένο κόστος με το group-based σενάριο ανέρχεται στα 11.53 €, για χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης. Επομένως, οι καταναλωτές είναι σε θέση να εξοικονομήσουν 1.78 € ή 13.37 % του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ημέρα, γεγονός που αντιπροσωπεύει σημαντική μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά μακροπρόθεσμα. Επίσης, το βελτιστοποιημένο κόστος για το turn-based σενάριο ανέρχεται στα

9.78 €. Επομένως, οι καταναλωτές είναι σε θέση να εξοικονομήσουν 3.53 € ή 26.52 % του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ημέρα.

Στους Πίνακες 4.1 έως 4.3, φαίνονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης για το baseline σενάριο, group-based σενάριο και turn-based σενάριο αντίστοιχα, δηλαδή η βέλτιστη ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που υπολογίστηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου για το baseline σενάριο					
Baseline	Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
	Πλυντήριο ρούχων	00:00	23:59	1.5	800
	Στεγνωτήριο ρούχων	00:00	23:59	1.5	1000
	Πλυντήριο πιάτων	00:00	23:59	1	850
	PEV	00:00	23:59	2	2000
	EWH	00:00	23:59	1.5	500
	HVAC	00:00	23:59	1.5	700

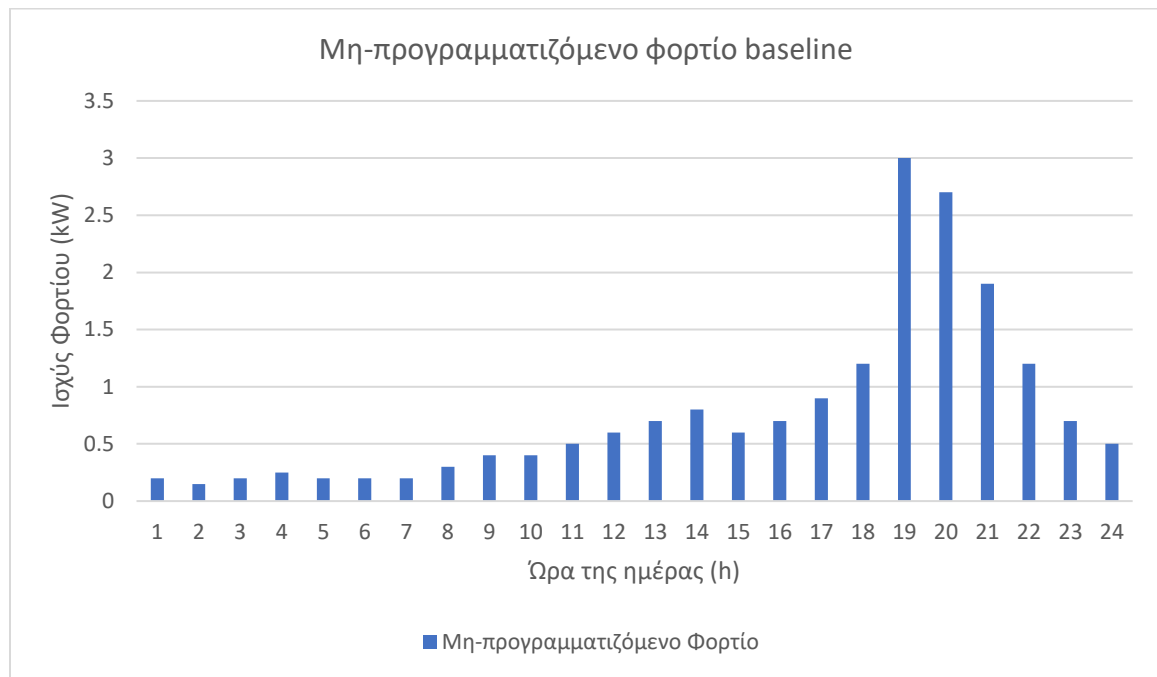
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου για το group-based σενάριο

	Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
Group-based	Πλυντήριο ρούχων	15:00	16:30	1.5	800
	Στεγνωτήριο ρούχων	16:30	18:00	1.5	1000
	Πλυντήριο πιάτων	12:00	13:00	1	850
	PEV	13:00	15:00	2	2000
	EWH	12:00	13:30	1.5	500
	HVAC	13:30	15:00	1.5	700

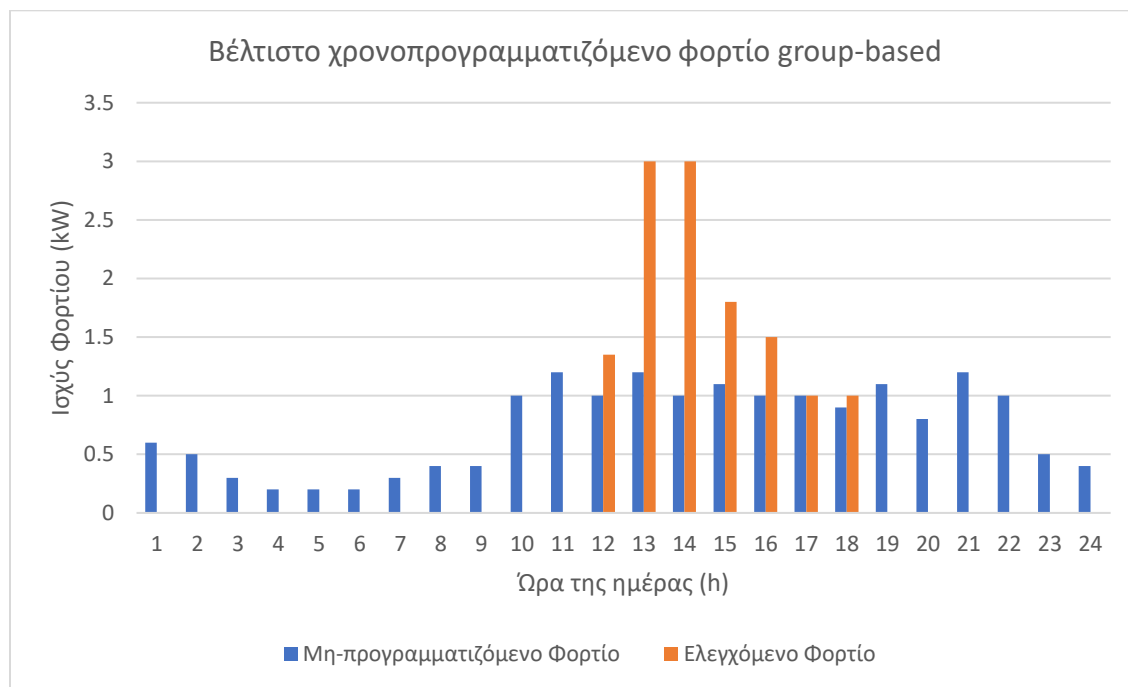
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου για το turn-based σενάριο

	Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
Turn-based	Πλυντήριο ρούχων	15:00	16:30	1.5	800
	Στεγνωτήριο ρούχων	16:30	18:00	1.5	1000
	Πλυντήριο πιάτων	12:00	13:00	1	850
	PEV	13:00	15:00	2	2000
	EWH	11:00	12:30	1.5	500
	HVAC	12:30	14:00	1.5	700

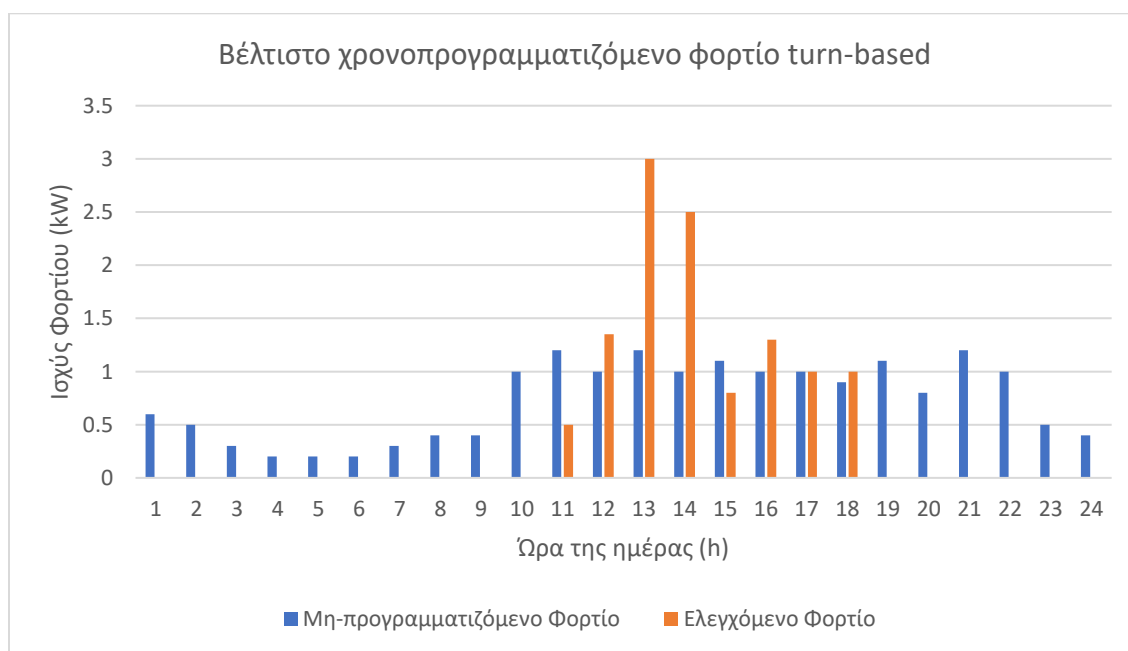
Στα Σχήματα 4.4 έως 4.6 παρουσιάζεται η ισχύς του φορτίου σε kW για το μη-προγραμματιζόμενο φορτίο με μπλε χρώμα και με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου για τα σενάρια baseline, group-based και turn-based, αντίστοιχα, με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.



Σχήμα 4.4: Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα για το baseline σενάριο με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.



Σχήμα 4.5: Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα για το group-based σενάριο με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.



Σχήμα 4.6: Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα για το turn-based σενάριο με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.

Στους Πίνακες 4.4 έως 4.6 φαίνονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης για το baseline σενάριο, group-based σενάριο και turn-based σενάριο αντίστοιχα, δηλαδή η βέλτιστη ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που υπολογίστηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου για το baseline σενάριο					
Baseline	Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
	Πλυντήριο ρούχων	00:00	23:59	1.5	800
	Στεγνωτήριο ρούχων	00:00	23:59	1.5	1000
	Πλυντήριο πιάτων	00:00	23:59	1	850
	PEV	00:00	23:59	2	2000
	EWH	00:00	23:59	1.5	500
	HVAC	00:00	23:59	1.5	700

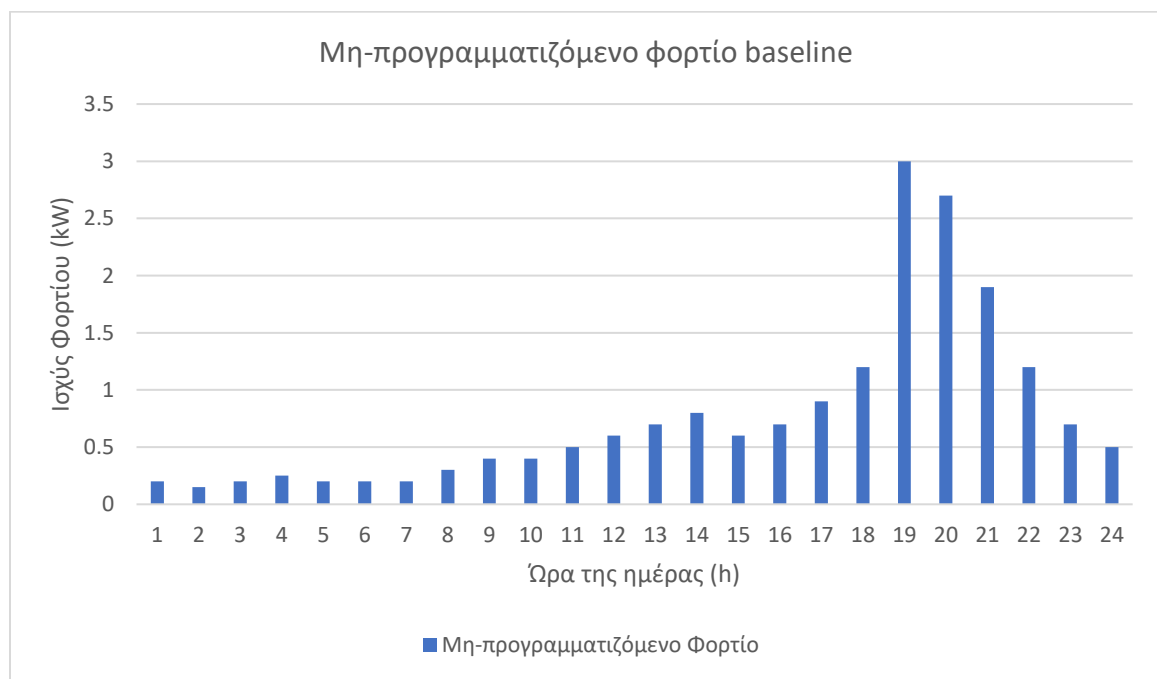
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου για το group-based σενάριο

	Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
Group-based	Πλυντήριο ρούχων	12:00	13:30	1.5	800
	Στεγνωτήριο ρούχων	13:30	15:00	1.5	1000
	Πλυντήριο πιάτων	07:00	08:00	1	850
	PEV	04:00	06:00	2	2000
	EWH	20:00	21:30	1.5	500
	HVAC	06:00	07:30	1.5	700

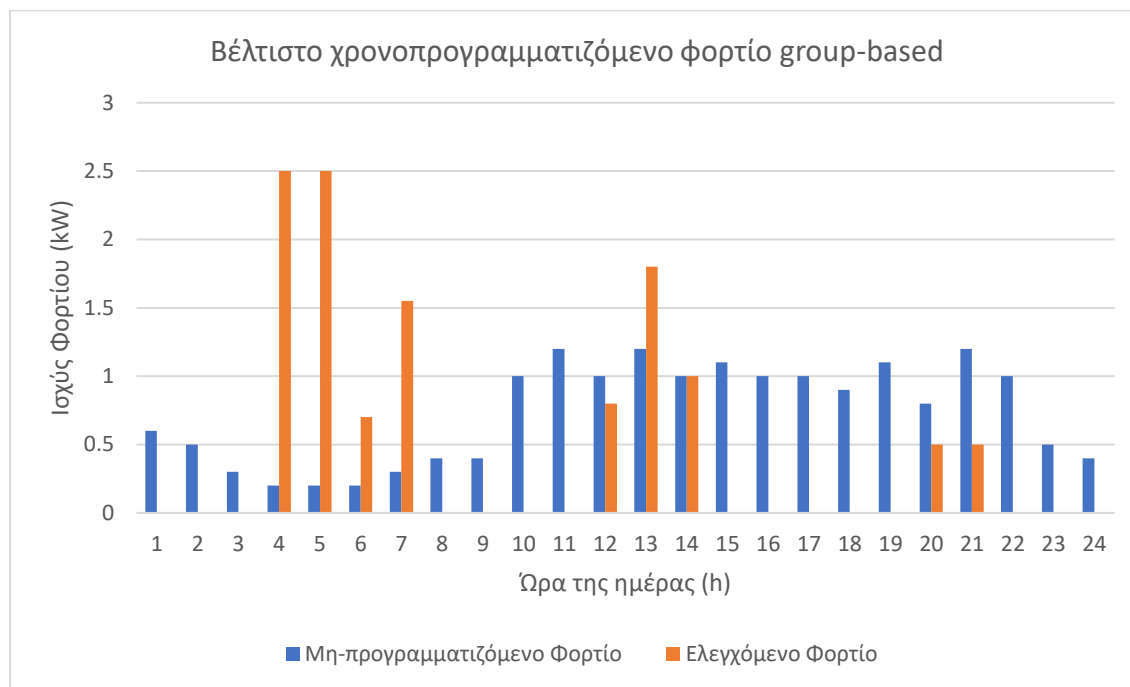
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου για το turn-based σενάριο

	Είδος συσκευής	Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
Turn-based	Πλυντήριο ρούχων	12:00	13:30	1.5	800
	Στεγνωτήριο ρούχων	13:30	15:00	1.5	1000
	Πλυντήριο πιάτων	07:00	08:00	1	850
	PEV	03:30	05:30	2	2000
	EWH	20:00	21:30	1.5	500
	HVAC	05:30	07:00	1.5	700

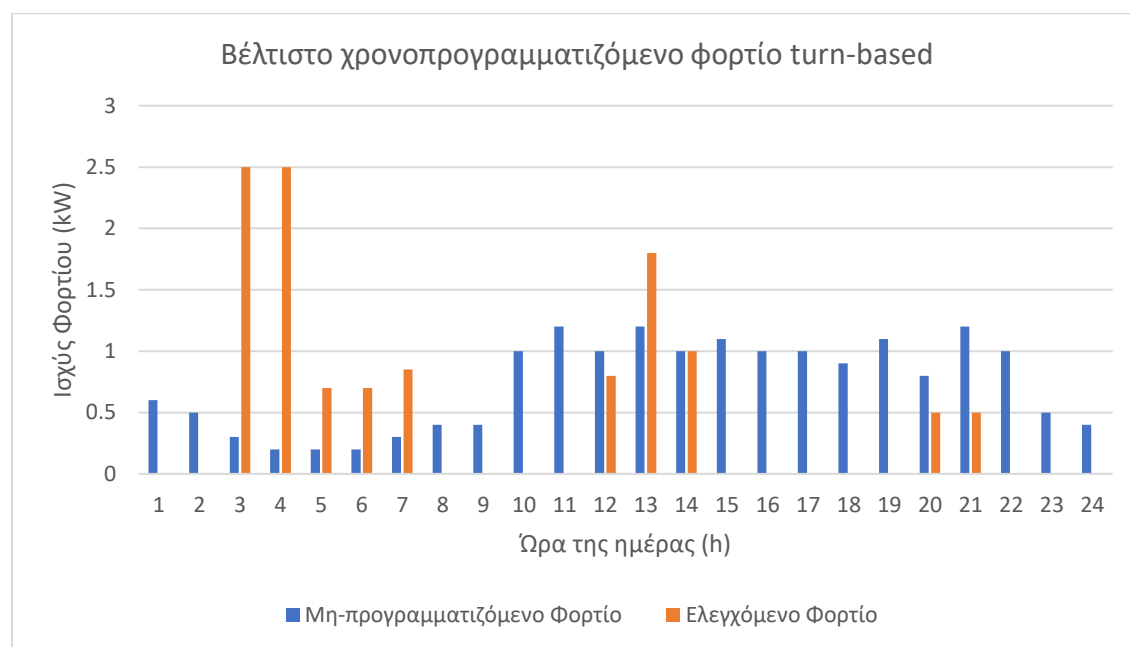
Στα Σχήματα 4.7 έως 4.9 παρουσιάζεται η ισχύς του φορτίου σε kW για το μη-προγραμματιζόμενο φορτίο με μπλε χρώμα και με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου για τα σενάρια baseline, group-based και turn-based, αντίστοιχα, με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.



Σχήμα 4.7: Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα για το baseline σενάριο με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.

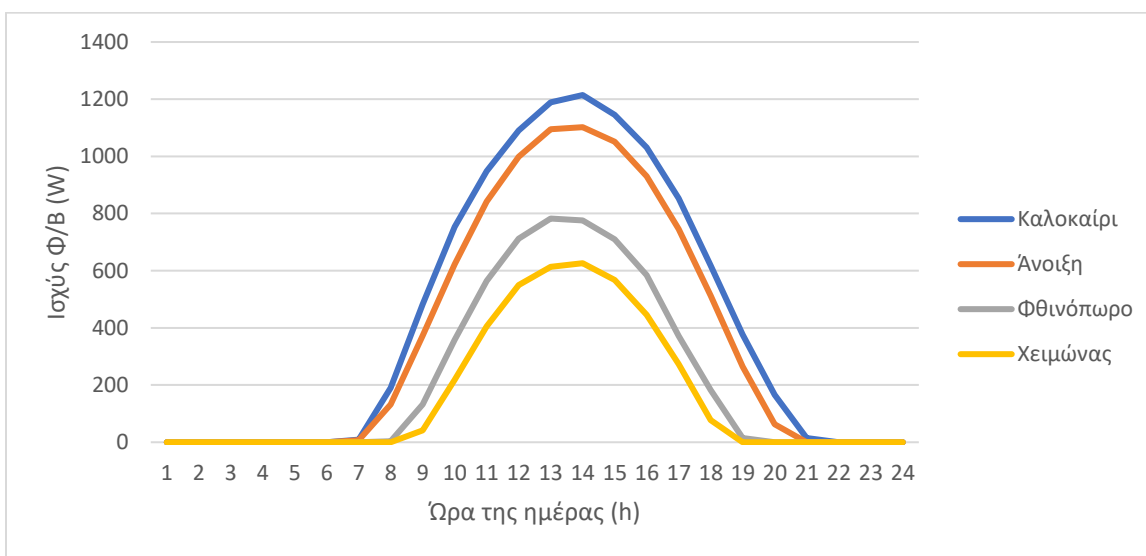


Σχήμα 4.8: Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα για το group-based σενάριο με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.

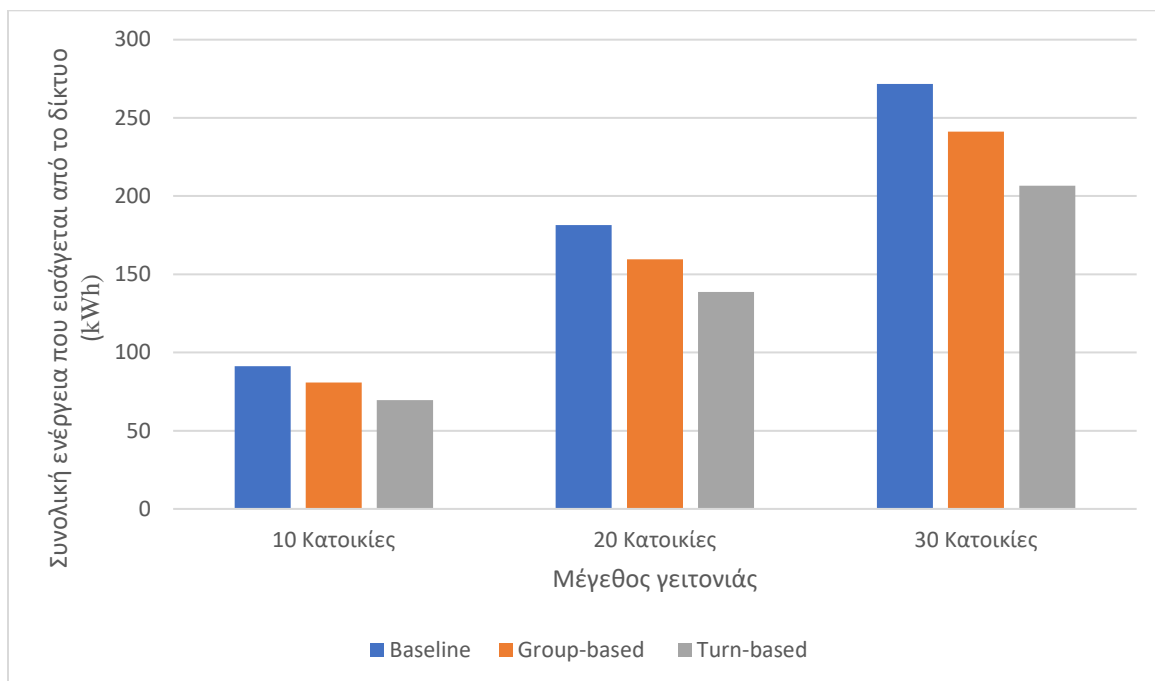


Σχήμα 4.9: Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα για το turn-based σενάριο με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης.

Ακολουθώντας, στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η ημερήσια Φ/Β παραγωγή ισχύος σε W ανά ώρα για τις 4 εποχές του έτους. Η Φ/Β συστοιχία της κάθε κατοικίας αποτελείται από τρία σε σειρά και δύο σε παράλληλα Φ/Β πλαίσια. Επομένως, η ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας για την κάθε κατοικία είναι 1200W. Διαπιστώνεται ότι το Φ/Β σύστημα παράγει ισχύ για δώδεκα περίπου ώρες ημερησίως και κορυφώνεται κατά τις μεσημβρινές ώρες. Στο Σχήμα 4.10 συγκρίνονται τέσσερις διαφορετικές ημέρες του έτους που αντιστοιχούν η κάθε ημέρα και σε μια εποχή. Παρατηρούμε ότι την ημέρα που αντιστοιχεί στην περίοδο του Καλοκαιριού η ισχύς του Φ/Β συστήματος είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ημέρα που αντιστοιχεί στην περίοδο του Χειμώνα. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κατά την Καλοκαιρινή περίοδο (19 Ιουλίου) σε σχέση με τη Χειμερινή περίοδο (29 Ιανουαρίου), αντίστοιχα, και για την Άνοιξη (25 Απριλίου) και το Φθινόπωρο (31 Οκτωβρίου).



Σχήμα 4.10: Ημερήσια Φ/Β παραγωγή ισχύος ανά ώρα για διαφορετικές ημέρες ανά εποχή.

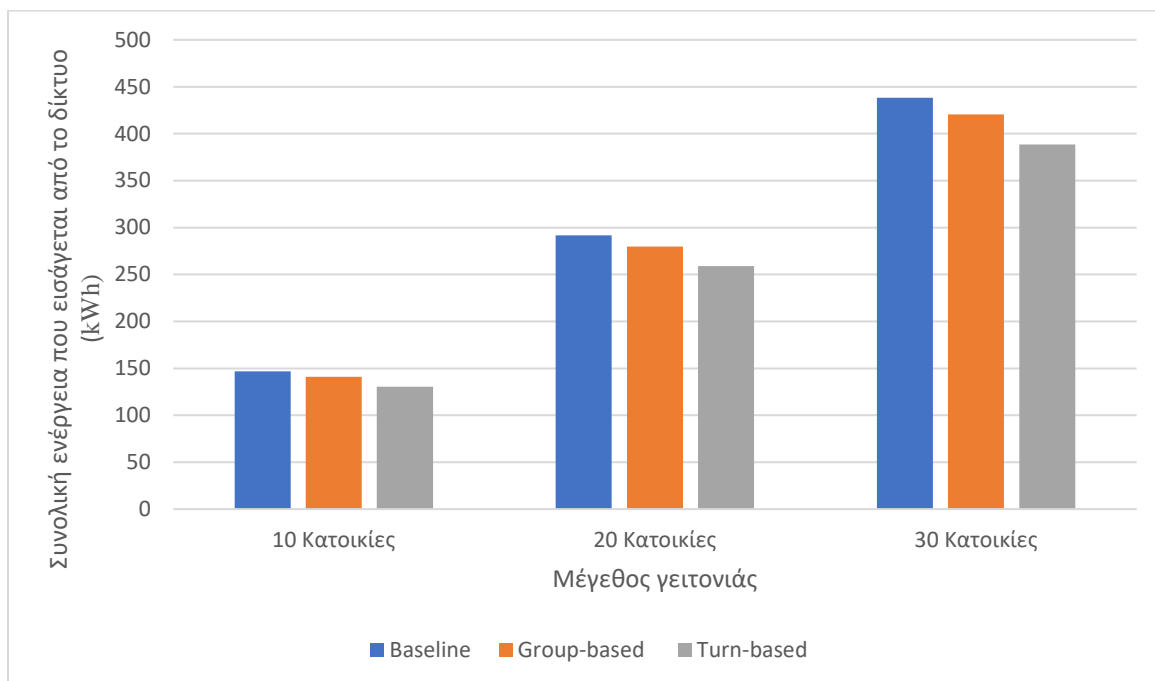


Σχήμα 4.11: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια καλοκαιρινή ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια ημέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η ημέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια καλοκαιρινή ημέρα (19 Ιουλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος turn-based δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ ο αλγόριθμος group-based κατατάσσεται δεύτερος. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.7: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια καλοκαιρινή ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	91.21	14.59
	Group-based	24	80.813	12.93
	Turn-based	24	69.5	11.12
20 Κατοικίες	Baseline	24	181.412	29.025
	Group-based	24	159.626	23.94
	Turn-based	24	138.72	22.195
30 Κατοικίες	Baseline	24	271.67	43.467
	Group-based	24	241.239	38.598
	Turn-based	24	206.53	33.044

Στον Πίνακα 4.7 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/B σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια καλοκαιρινή ημέρα (19 Ιουλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ο turn-based αλγόριθμος δείχνει μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

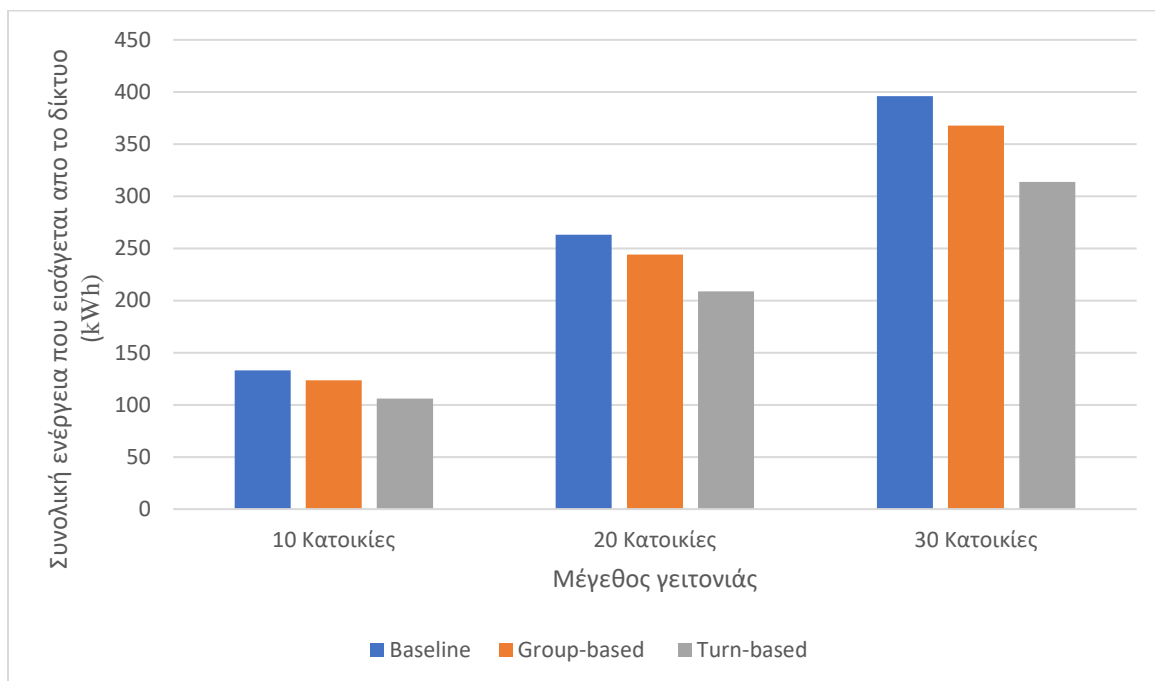


Σχήμα 4.12: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για χειμερινή ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια ημέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η μέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια χειμερινή ημέρα (29 Ιανουαρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Επίσης, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος turn-based παραγματοποιεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε σχέση με το group-based και baseline σενάριο. Ωστόσο, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.8: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια χειμερινή ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	146.810	23.49
	Group-based	24	140.875	22.54
	Turn-based	24	130.562	20.89
20 Κατοικίες	Baseline	24	291.632	43.745
	Group-based	24	279.75	46.66
	Turn-based	24	258.974	41.436
30 Κατοικίες	Baseline	24	438.34	70.134
	Group-based	24	420.625	67.34
	Turn-based	24	388.678	62.18

Στον Πίνακα 4.8 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/B σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές αριθμών των κατοικιών για μια χειμερινή ημέρα (29 Ιανουαρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ωστόσο, ο turn-based αλγόριθμος προσφέρει περισσότερη εξοικονόμηση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

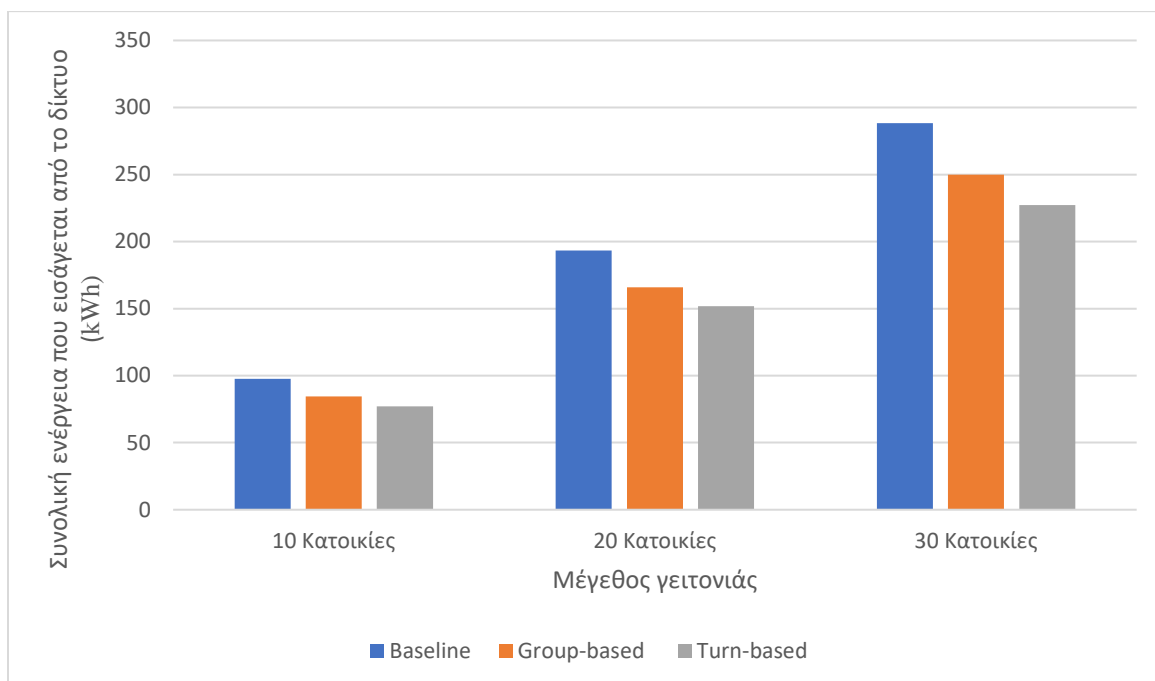


Σχήμα 4.14: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για φθινοπωρινή ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια ημέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η μέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια φθινοπωρινή ημέρα (31 Οκτωβρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Ο αλγόριθμος turn-based προσφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε σχέση με το group-based και baseline σενάριο. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.9: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια φθινοπωρινή ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	133.050	21.288
	Group-based	24	123.625	19.78
	Turn-based	24	105.875	18.94
20 Κατοικίες	Baseline	24	263.100	42.076
	Group-based	24	244.125	39.06
	Turn-based	24	208.75	33.44
30 Κατοικίες	Baseline	24	396.147	63.383
	Group-based	24	367.874	58.86
	Turn-based	24	313.625	50.18

Στον Πίνακα 4.9 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/B σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια φθινοπωρινή ημέρα (31 Οκτωβρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ο turn-based αλγόριθμος δείχνει μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

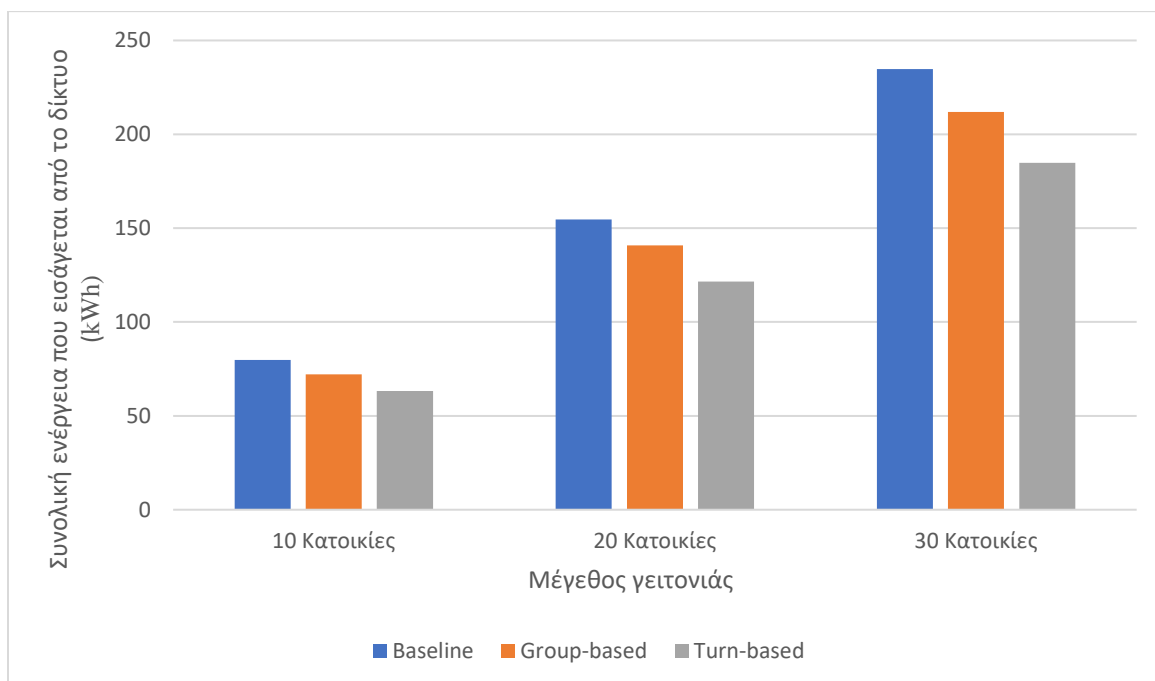


Σχήμα 4.15: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για ανοιξιιάτικη ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια μέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η μέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ανοιξιιάτικη ημέρα (25 Απριλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος turn-based δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και από τα τρία σενάρια, ενώ ο αλγόριθμος group-based δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το baseline σενάριο. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.10: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια ανοιξιιάτικη ημέρα με μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	97.610	15.617
	Group-based	24	84.437	14.51
	Turn-based	24	77.06	12.73
20 Κατοικίες	Baseline	24	193.210	30.913
	Group-based	24	165.875	26.54
	Turn-based	24	151.725	24.276
30 Κατοικίες	Baseline	24	288.430	46.148
	Group-based	24	249.911	39.98
	Turn-based	24	227.188	36.35

Στον Πίνακα 4.10 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια ανοιξιιάτικη ημέρα (25 Απριλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μη-χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ο turn-based αλγόριθμος δείχνει μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

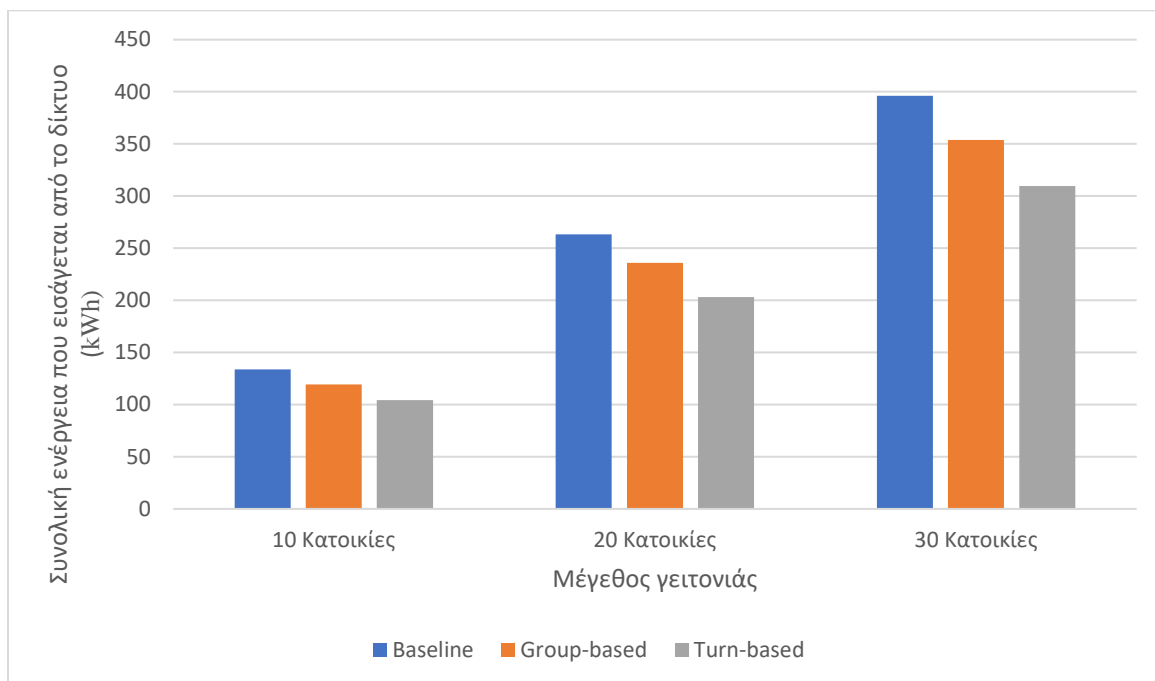


Σχήμα 4.16: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια καλοκαιρινή ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια μέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η ημέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια καλοκαιρινή ημέρα (19 Ιουλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος turn-based δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ ο αλγόριθμος group-based κατατάσσεται δεύτερος. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.11: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια καλοκαιρινή ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	79.822	13.31
	Group-based	24	72.062	11.53
	Turn-based	24	63.25	9.78
20 Κατοικίες	Baseline	24	154.694	24.54
	Group-based	24	140.824	22.06
	Turn-based	24	121.5	19.23
30 Κατοικίες	Baseline	24	234.766	37.315
	Group-based	24	211.861	33.59
	Turn-based	24	184.75	29.36

Στον Πίνακα 4.11 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια καλοκαιρινή ημέρα (19 Ιουλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ο turn-based αλγόριθμος δείχνει μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

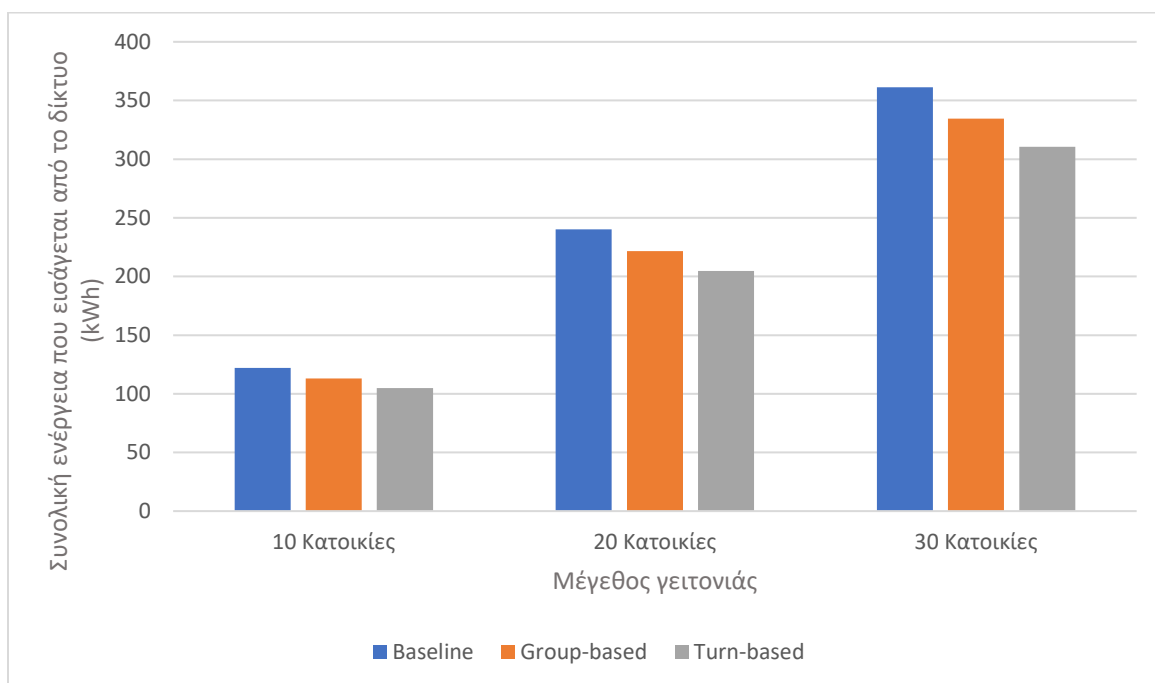


Σχήμα 4.17: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια χειμερινή ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια μέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η ημέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια χειμερινή ημέρα (29 Ιανουαρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Επίσης, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος turn-based παραγματοποιεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε σχέση με το group-based και baseline σενάριο. Ωστόσο, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.12: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια χειμερινή ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	133.75	21.72
	Group-based	24	119.437	19.43
	Turn-based	24	104.43	17.19
20 Κατοικίες	Baseline	24	263.25	41.82
	Group-based	24	235.874	36.89
	Turn-based	24	203.186	31.42
30 Κατοικίες	Baseline	24	396.215	64.21
	Group-based	24	353.721	55.169
	Turn-based	24	309.563	49.12

Στον Πίνακα 4.12 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια χειμερινή ημέρα (29 Ιανουαρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ωστόσο, ο turn-based αλγόριθμος προσφέρει περισσότερη εξοικονόμηση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

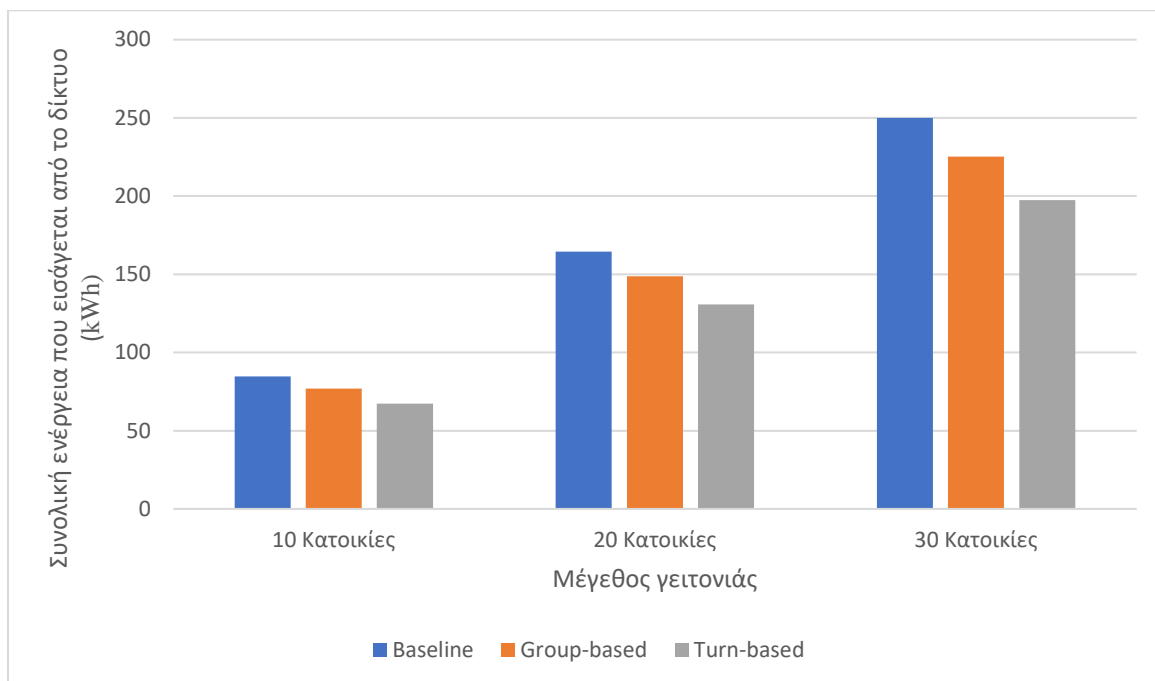


Σχήμα 4.18: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια φθινοπωρινή ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια ημέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η ημέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια φθινοπωρινή μέρα (31 Οκτωβρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Ο αλγόριθμος turn-based προσφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε σχέση με το group-based και baseline σενάριο. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.13: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια φθινοπωρινή ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	122.125	19.86
	Group-based	24	113.187	18.43
	Turn-based	24	104.825	17.32
20 Κατοικίες	Baseline	24	240.124	37.71
	Group-based	24	221.732	34.9
	Turn-based	24	204.75	32.88
30 Κατοικίες	Baseline	24	361.357	56.58
	Group-based	24	334.524	53.97
	Turn-based	24	310.476	49.99

Στον Πίνακα 4.13 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια φθινοπωρινή ημέρα (31 Οκτωβρίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες, με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ο turn-based αλγόριθμος δείχνει μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.



Σχήμα 4.19: Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για κάθε στρατηγική με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια ανοιξιιάτικη ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται για κάθε στρατηγική (baseline, group-based, turn-based) η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο για μια ημέρα λειτουργίας της γειτονιάς με διαφορετικό αριθμό κατοικιών (10, 20, 30). Η ημέρα λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ανοιξιιάτικη ημέρα (25 Απριλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος turn-based δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και από τα τρία σενάρια, ενώ ο αλγόριθμος group-based δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το baseline σενاريو. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού, αφού πραγματοποιείται μόνο έλεγχος της συστοιχίας μπαταριών και δεν πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των συσκευών.

Πίνακας 4.14: Συνολικά αποτελέσματα των σεναρίων για μια ανοιξιιάτικη ημέρα με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας				
Μέγεθος γειτονιάς	Σενάρια	Διάρκεια προσομοίωσης (h)	Συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο (kWh)	Συνολικό κόστος (€)
10 Κατοικίες	Baseline	24	84.687	13.71
	Group-based	24	76.92	12.32
	Turn-based	24	67.375	10.94
20 Κατοικίες	Baseline	24	164.471	27.09
	Group-based	24	148.723	23.614
	Turn-based	24	130.75	20.88
30 Κατοικίες	Baseline	24	249.961	39.649
	Group-based	24	225.176	34.761
	Turn-based	24	197.327	29.82

Στον Πίνακα 4.14 φαίνεται η συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο και το συνολικό κόστος για τα τρία σενάρια βελτιστοποίησης της έξυπνης γειτονιάς με διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα και συστοιχίες μπαταριών. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα με διαφορετικό αριθμό κατοικιών για μια ανοιξιιάτικη ημέρα (25 Απριλίου). Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω αποτελέσματα ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δύο μέθοδοι συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην εργασία παρατηρούμε ότι δίνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το βασικό σενάριο όσο αφορά το κόστος αλλά και την συνολική ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο. Ο turn-based αλγόριθμος δείχνει μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο group-based όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, το baseline σενάριο, είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τους προτεινόμενους αλγόριθμους συντονισμού αφού δεν πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

5.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν τρία σενάρια, ένα βασικό σενάριο (baseline) και δύο αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι συντονισμού (group-based και turn-based) για τη διαχείριση και την κατανομή ενέργειας σε μια περιοχή γειτονιάς, σύμφωνα με τις μεθόδους της εργασίας [5]. Και οι δυο αποκεντρωμένοι συντονισμοί, στοχεύουν στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην περιοχή της γειτονιάς και τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου προς όφελος των καταναλωτών με σκοπό τη μείωση του κόστους. Και στους δύο μηχανισμούς συντονισμού, επιλύεται το ίδιο πρόβλημα βελτιστοποίησης από τις κατοικίες με διαφορετική σειρά. Οι κατοικίες βελτιστοποιούν τα προφίλ ισχύος τους για να μειώσουν τον ημερήσιο λογαριασμό ηλεκτρικού ρεύματος, προγραμματίζοντας τις συσκευές τους και ελέγχοντας το σύστημα της συστοιχίας μπαταριών τους. Στον αλγόριθμο group-based, οι κατοικίες βελτιστοποιούν ταυτόχρονα, ενώ στον αλγόριθμο turn-based πραγματοποιείται το καθένα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα των μεθόδων συντονισμού συγκρίνονται με ένα βασικό σενάριο (baseline) το οποίο δίνει την δυνατότητα ελέγχου της συστοιχίας μπαταριών αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου. Και οι δύο αλγόριθμοι συντονισμού δείχνουν καλή απόδοση σε σύγκριση με το baseline σενάριο όσον αφορά το κόστος και την κατανάλωση ισχύος. Μεταξύ των αλγορίθμων, ο αλγόριθμος turn-based δίνει τα

καλύτερα αποτελέσματα, ενώ ο αλγόριθμος group-based κατατάσσεται δεύτερος. Στην συνέχεια το τελευταίο αποδοτικότερο σενάριο είναι το baseline.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που παρουσιάστηκαν για διαφορετικές ημέρες ανά εποχή του έτους, το καλύτερο σενάριο βελτιστοποίησης, είναι το turn-based σενάριο το οποίο προσφέρει μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με το group-based σενάριο. Ωστόσο, το group-based σενάριο προσφέρει μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με το baseline σενάριο. Αντιθέτως, στα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας που παρουσιάστηκαν για διαφορετικές ημέρες ανά εποχή του έτους, το καλύτερο σενάριο βελτιστοποίησης είναι το turn-based σενάριο το οποίο προσφέρει μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με το group-based σενάριο. Το group-based σενάριο προσφέρει μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με το baseline σενάριο. Παρατηρείται ότι στα προγράμματα τιμολόγησης με χρονικά μεταβαλλόμενες και μη-χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας, το καλύτερο σενάριο είναι το turn-based, εντούτοις υπάρχει μια μικρή μείωση στο κόστος όταν οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τύπους κτηρίων που βρίσκονται σε διάφορες περιοχές.

Ως μελλοντική εργασία μπορεί να αναπτυχθεί μια γραφική διεπαφή χρήστη (graphical user interface), με την οποία ο χρήστης θα ελέγχει τις συσκευές της κατοικίας του ανά πάσα στιγμή οπουδήποτε βρίσκεται. Επίσης, σε αυτό το γραφικό περιβάλλον, μπορεί να ενσωματωθεί μια βάση δεδομένων από την οποία θα λαμβάνονται μετεωρολογικές πληροφορίες.

6.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Φραγκιαδάκης Ι.Ε. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2006.
- [2] European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future, available at:
https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf, 2006.
- [3] Guérard G., Amor B.E, Bui A., “A Complex System Approach for Smart Grid Analysis and Modeling”, Advances in Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, vol. 243, pp 788-797, 2012.
- [4] U.S. Department of Commerce, “NIST Special Publication 1108 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0”, 2010.
- [5] Celik B., Roche R., Bouquain D., Miraoui A., “Decentralized neighborhood energy management with coordinated smart home energy sharing”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6387-6397, 2018.
- [6] Macedo M., Galo J., Almeida L., and Lima A.D., “Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.41, pp. 128-133, 2015.

- [7] Khan A.A., Razzaq S., Khan A., Khursheed F., Owais, “HEMSs and enabled demand response in electricity market: an overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 773–785, 2015.
- [8] Beaudin M., Zareipour H., “Home Energy Management Systems: a review of modelling”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 318-335, 2015.
- [9] Katiraei F., Iravani M.R., Lehn P.W., “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp 2157-2165, 2012.
- [10] Kennedy J., “The particle swarm: social adaption of knowledge”, *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 303-308, 1997.
- [11] Shi Y., Eberhart R.C., “A modified particle swarm optimizer”, *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 69-73, 1997.
- [12] Kennedy J., Eberhart, R.C., Shi Y., “Swarm Intelligence”, Morgan Kaufmann. ISBN 978-1-55860-595-4, 2001.
- [13] Hu Q., Li F., “Hardware design of smart Home Energy Management System with dynamic price response”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1878-1887, 2013.
- [14] Wu X., Hu X., Yin X., Moura S.J., “Stochastic optimal energy management of smart home with PEV energy storage”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2065-2075, 2018.