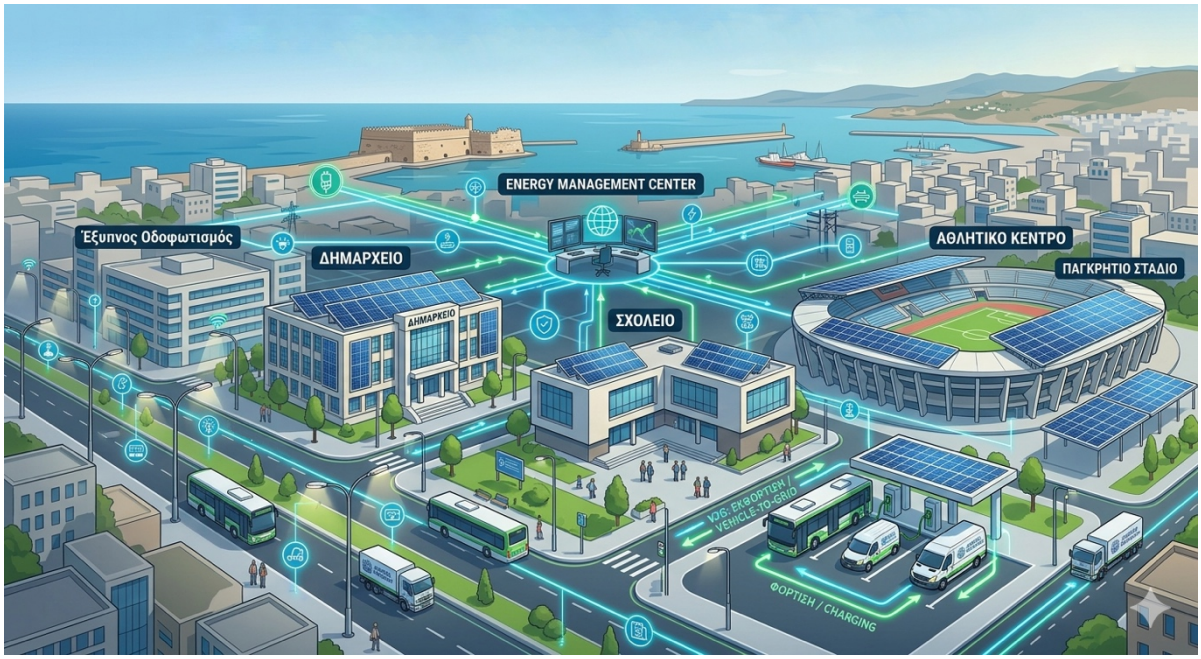
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ανάπτυξη έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας επί των δημοτικών υποδομών του Δήμου Ηρακλείου



Ονοματεπώνυμο: Ιωάννης Αντωνακάκης

Επιβλέπων Διδάσκοντας: Δημήτριος Κατσαπρακάκης

Αριθμός μητρώου σχολής: ΜΜ98

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη *4*

Εισαγωγή *7*

1. Λόγοι που γέννησαν την ανάγκη ύπαρξης των έξυπνων δικτύων *10*

2. Πως τα έξυπνα δίκτυα προσπαθούν να καλύψουν αυτές τις ανάγκες *14*

2.1. Η διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης (DSM) *14*

2.2. Ταξινόμηση των καταναλωτών 15

2.3. Στρατηγικές διαχείρισης Πλευράς Ζήτησης DSM 20

2.3.1. Διασκορπισμένη παραγωγή ενέργειας 20

2.3.2. Μετατόπιση φορτίου (αποκοπή μέγιστης ζήτησης) 22

2.3.3. Περιορισμός φορτίου 24

2.3.4. Ενεργειακή απόδοση 25

3. Προγράμματα DSM *28*

4. Τα οφέλη του DSM *32*

5. Εξέλιξη του έξυπνου δικτύου *36*

5.1. Το υπάρχον δίκτυο 36

5.2. Μετάβαση στο έξυπνο δίκτυο 38

6. Έξυπνα Μικροδίκτυα *39*

6.1. Τοπολογία μικροδικτύου 40

6.2. Τοπολογία έξυπνων δικτύων 41

6.3. Πρότυπα έξυπνων δικτύων 42

6.4. Αναδυόμενα πρότυπα έξυπνων δικτύων 43

6.5. Έρευνα, ανάπτυξη και επίδειξη έξυπνων δικτύων 45

6.6. Το μέλλον των έξυπνων δικτύων 46

7. Γιατί τα δημοτικά κτίρια ενδείκνυνται για υλοποίηση έξυπνων δικτύων *52*

8. Σενάριο δημιουργίας έξυπνου δικτύου στις κτιριακές και άλλες υποδομές του Δήμου Ηρακλείου *53*

8.1. Ενεργειακή απόδοση έξυπνου δικτύου για τον Δήμο Ηρακλείου 54

9. Συμπεράσματα *58*

10. Μελλοντικές βελτιώσεις της έρευνας *60*

Βιβλιογραφία *62*

Περίληψη

Το έξυπνο δίκτυο είναι μια προσπάθεια να δοθεί μεγαλύτερη αξιοπιστία στα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, να κατανεμηθεί γεωγραφικά η παραγωγή ενέργειας σε μικρότερες μονάδες και περισσότερους τόπους, να ευαισθητοποιήσει τους καταναλωτές στο να χρησιμοποιήσουν ενεργειακά αποδοτικότερες συσκευές, έξυπνους ελεγκτές για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της ενεργειακής κατανάλωσης και να μειωθεί το κόστος επέκτασης των μεγάλων κεντρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κάτι τέτοιο κατέστη δυνατό μετά την ανάπτυξη μικρής κλίμακας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών. Επειδή είναι πάρα πολύ δύσκολο να πειστούν οι καταναλωτές να επενδύσουν σε ενεργειακά αποδοτικότερα κτίρια ή και να υιοθετήσουν έξυπνα συστήματα ελέγχου της καταναλισκόμενης ενέργειας και επομένως να συνδεθούν σε ένα έξυπνο δίκτυο, θα μπορούσε να αποδειχθεί μια πάρα πολύ καλή αρχή η είσοδος των δημοτικών και κρατικών κτιρίων σε αυτά.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τα πιθανά οφέλη από την ανάπτυξη ενός έξυπνου δικτύου σε βασικές υποδομές του Δήμου Ηρακλείου, όπως το κτίριο του Δημαρχείο Loggia και το Παγκρήτιο Στάδιο. Το έργο χρηματοδοτείται από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων και το Ταμείο Ανάκαμψης (ΣΑΤΑ 063, κωδικός έργου 2022ΤΑ06300057) και υλοποιείται στο πλαίσιο του Εθνικού Σχεδίου «Ελλάδα 2.0», με τη στήριξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω του NextGeneration EU. Η σύμβαση εντάσσεται στο έργο «Δήμος Ηρακλείου – Υποέργο 1: Ελληνικές έξυπνες πόλεις», που αφορά επενδύσεις σε υποδομές και συστήματα για ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον αστικό μέλλον (κωδικός ΟΠΣ ΤΑ 5198269). Το έργο έχει εγκριθεί από το Υπουργείο Οικονομικών και έχει ενταχθεί στο Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας. Τέλος, το έργο αυτό περιλαμβάνει παρεμβάσεις σε πολλούς τομείς, όπως η παρακολούθηση δεδομένων μέσω αισθητήρων, τα ασύρματα δίκτυα πόλης, οι πλατφόρμες ενημέρωσης και ελέγχου, η βιώσιμη κινητικότητα, η διαχείριση απορριμμάτων και οι υπηρεσίες υγείας και αποτελείται από 12 δράσεις: την αναβάθμιση της αστικής στάθμευσης, τις έξυπνες διαβάσεις πεζών, τους αισθητήρες κίνησης και διαχείρισης κυκλοφορίας, τις έξυπνες στάσεις συγκοινωνιών, τα έξυπνα καθίσματα, το πρόγραμμα «πληρώνω όσο καταναλώνω», την εγκατάσταση δικτύου Lorawan, την προσαρμογή ψηφιακών υπηρεσιών, δράσεις υγείας και πρόνοιας, συστήματα καταγραφής της σεισμικής δραστηριότητας σε κτίρια, παρακολούθηση κατανάλωσης ενέργειας σε δημοτικά κτίρια και τις πολυλειτουργικές στήλες.

Λέξεις-κλειδιά

Έξυπνο δίκτυο, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Ενεργειακή απόδοση, Έξυπνα συστήματα ελέγχου, Έξυπνες πόλεις, Δήμος Ηρακλείου, Δημόσιες υποδομές

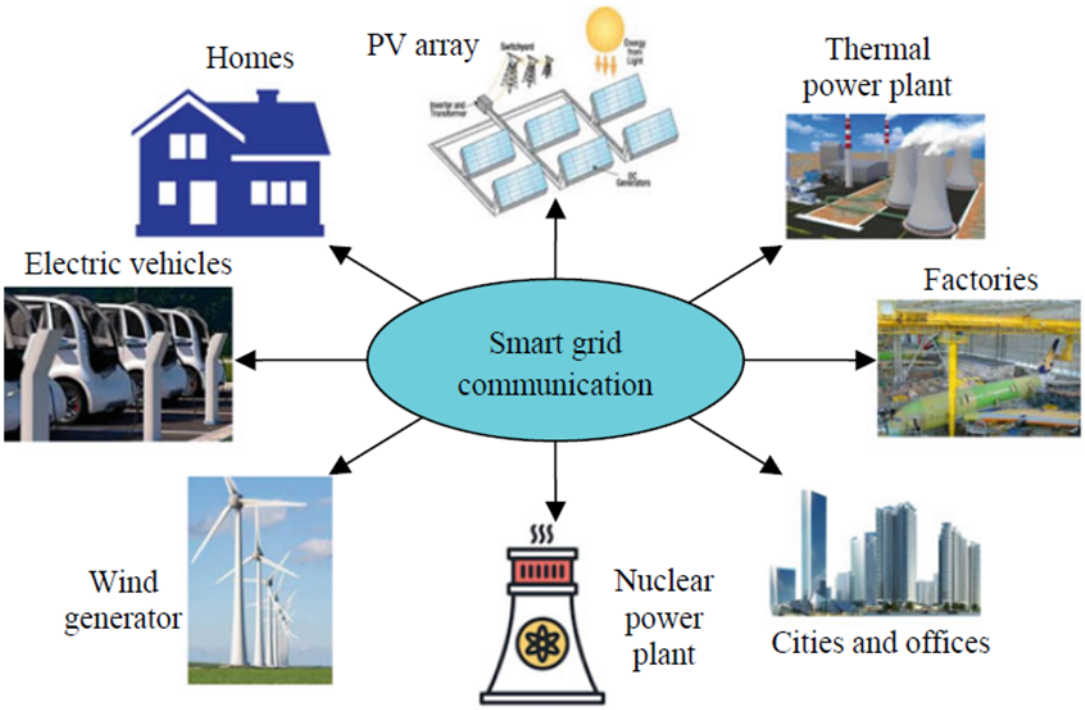
Abstract

The smart grid is an effort to enhance the reliability of electricity supply systems, to geographically distribute energy production into smaller units across more locations, to raise consumer awareness towards using more energy-efficient devices and smart controllers for better energy consumption management, and to reduce the cost of expanding large central power generation units. This has been made possible through the development of small-scale renewable energy sources and information and communication technologies. Since it is very difficult to persuade consumers to invest in more energy-efficient buildings or adopt smart energy management systems and thus connect to a smart grid, a very good starting point could be the integration of municipal and public buildings into such systems.

This study examines the potential benefits of developing a smart grid in key infrastructure of the Municipality of Heraklion, such as the Loggia City Hall building and the Pankritio Stadium. The project is funded by the Public Investment Program and the Recovery Fund (SATA 063, project code 2022TA06300057) and is implemented within the framework of the National Recovery and Resilience Plan "Greece 2.0", with the support of the European Union through NextGenerationEU. The contract is part of the project "Municipality of Heraklion – Subproject 1: Greek Smart Cities", which concerns investments in infrastructure and systems for a more sustainable and environmentally friendly urban future (OPS TA code 5198269). The project has been approved by the Ministry of Finance and has been included in the Recovery and Resilience Facility. Finally, the project includes interventions in multiple sectors, such as data monitoring through sensors, metropolitan wireless networks, information and control platforms, sustainable mobility, waste management, and healthcare services. It consists of 12 actions: upgrading urban parking, smart pedestrian crossings, traffic monitoring and management sensors, smart bus stops, smart benches, the "pay-as-you-throw" program, installation of a LoRaWAN network, adaptation of digital services, health and welfare actions, seismic activity monitoring systems in buildings, energy consumption monitoring in municipal buildings, and multifunctional smart poles.

Keywords

Smart grid, Renewable energy sources, Energy efficiency, Smart control systems, Smart cities, Municipality of Heraklion, Public infrastructure



Σχήμα 1: Σχήμα ενός έξυπνου δικτύου

Εισαγωγή

Απώτερος στόχος είτε των συμβατικών ηλεκτρικών συστημάτων είτε των έξυπνων δικτύων είναι η συνεχής διατήρηση της παραγωγής ενέργειας και η δυναμική ισορροπία ζήτησης. Στην πρώτη περίπτωση, αυτό προσεγγίζεται μέσω του ελέγχου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από σχετικά μικρό αριθμό κεντρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που εισάγεται στο σύστημα μέσω των δικτύων διανομής. Η ισορροπία αυτή διατηρείται μέσω εξαιρετικά εξελιγμένων αυτοματισμών και εγκαταστάσεων, τοποθετημένων τόσο μέσα στα δίκτυα μεταφοράς όσο και στα δίκτυα διανομής. Τα δίκτυα διανομής γνωστοποιούν στο σύστημα τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά της ζήτησης, καθώς πρέπει όλοι οι τελικοί καταναλωτές να εξυπηρετούνται από αυτά. Ως εκ τούτου, η διατήρηση μεταξύ του ισοζυγίου ζήτησης και προσφοράς μεταφράζεται στη διατήρηση αντίστοιχης ισορροπίας μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η επιτυχής εκπλήρωση αυτού του καθήκοντος απαιτεί συχνά την παρέμβαση ενός πολύ έμπειρου και εξειδικευμένου προσωπικού από την πλευρά του φορέα εκμετάλλευσης. Από την άλλη πλευρά, η δυναμική ισορροπία μεταξύ της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της προσφοράς σε έξυπνα δίκτυα δεν περιορίζεται πλέον αυστηρά στη διατήρηση της ζήτησης που επιβάλλεται από τα δίκτυα διανομής και της προσφοράς που διαθέτουν τα δίκτυα μεταφοράς. Οι νέες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας, που εισάγονται από την πλευρά των καταναλωτών και ενσωματώνονται στο πλαίσιο των χονδρικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέρουν νέες επιλογές για την επίτευξη του παραπάνω βασικού στόχου απευθείας εντός των δικτύων διανομής. Αυτό το δυναμικό αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό διάκρισης μεταξύ έξυπνων δικτύων και συμβατικών ηλεκτρικών συστημάτων.

Με τον όρο «έξυπνο δίκτυο» περιγράφεται ένα δυναμικό ηλεκτρικό σύστημα που έχει στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές μέσω μιας διαδραστικής διαδικασίας μεταξύ αυτών και του φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου. Απώτερος στόχος των έξυπνων δικτύων είναι η ασφαλής παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στους τελικούς καταναλωτές μέσω μιας ευέλικτης και οικονομικά αποδοτικής διαδικασίας. Προκειμένου να καταστεί δυνατός ο λεπτομερής έλεγχος και η παρακολούθηση, το έξυπνο δίκτυο εκμεταλλεύεται την σύγκλιση της τεχνολογίας των πληροφοριών και των τεχνολογιών της επικοινωνίας με τη μηχανική των συστημάτων ισχύος.

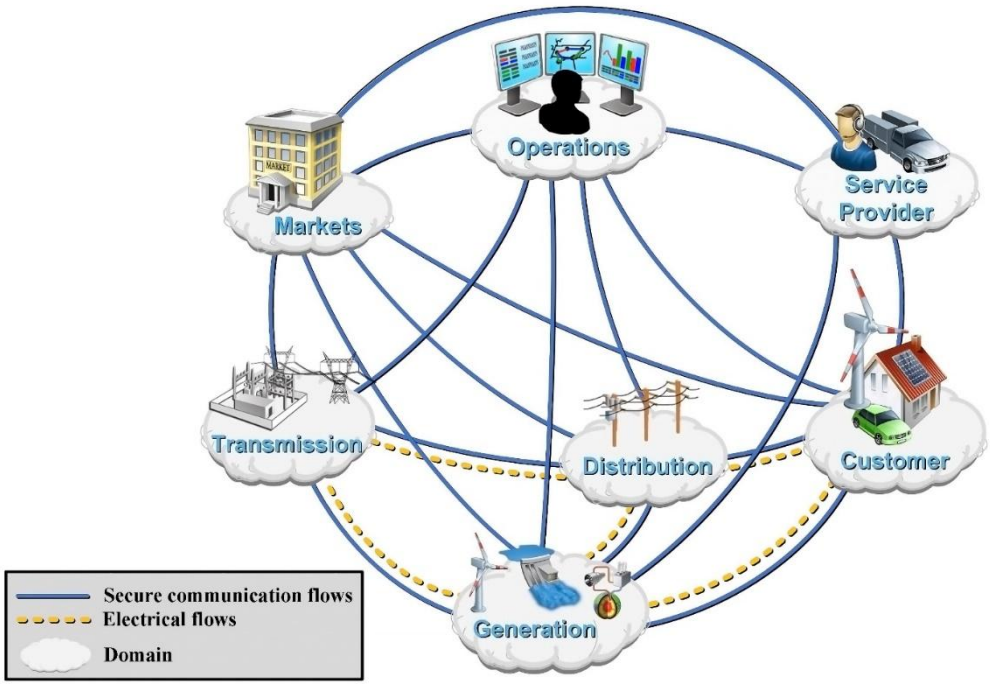
Existing Grid(Centralized)	Smart Grid(Decentralized)
Electromechanical	Digital
One-way communication	two-way communication
Centralized generation	Distributed generation
Few sensors	Sensors throughout
Manual monitoring	Self-monitoring
Manual restoration	Self-healing
Failures and blackouts	Adaptive and islanding
Few customer choices	Many customer choices

Πίνακας 1: Το έξυπνο δίκτυο σε σύγκριση με το υφιστάμενο δίκτυο

Δεδομένου ότι οι πηγή των προβλημάτων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται συνήθως στο σύστημα διανομής, η βασική μέριμνα για την αναβάθμιση του δικτύου δίνεται στον τελευταίο κρίκο της αλυσίδας. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας πιστεύουν ότι η επένδυση στην αυτοματοποίηση της διανομής θα τους παρέχει αυξανόμενες δυνατότητες με την πάροδο του χρόνου. Στο πλαίσιο αυτών των νέων δυνατοτήτων, η επικοινωνία και η διαχείριση δεδομένων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Αυτά τα βασικά συστατικά επιτρέπουν στις εταιρείες κοινής ωφέλειας να προσθέσουν ένα επίπεδο ευφυΐας πάνω στις παρούσες και μελλοντικές τους υποδομές, επιτρέποντας έτσι την εισαγωγή νέων εφαρμογών και διαδικασιών στις δραστηριότητές τους. Η σύγκλιση της τεχνολογίας των επικοινωνιών και της πληροφορικής με την μηχανική των συστημάτων ισχύος, βοηθούμενη από μια σειρά νέων προσεγγίσεων, τεχνολογιών και εφαρμογών, επιτρέπει στο υπάρχον δίκτυο να διασχίσει την πολύπλοκη, αλλά σταδιακή, πορεία της αρχιτεκτονικής, των πρωτοκόλλων και των προτύπων προς το έξυπνο δίκτυο.

Μέχρι στιγμής, αρκετά εννοιολογικά μοντέλα έξυπνων δικτύων έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικούς φορείς τυποποίησης. Το πιο ευρέως αποδεκτό και χρησιμοποιούμενο σε σχετικές αναφορές και επιστημονικά έργα είναι το εννοιολογικό μοντέλο που εισήγαγε το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST) των Ηνωμένων Πολιτειών. Σύμφωνα με την ενημερωμένη έκδοσή

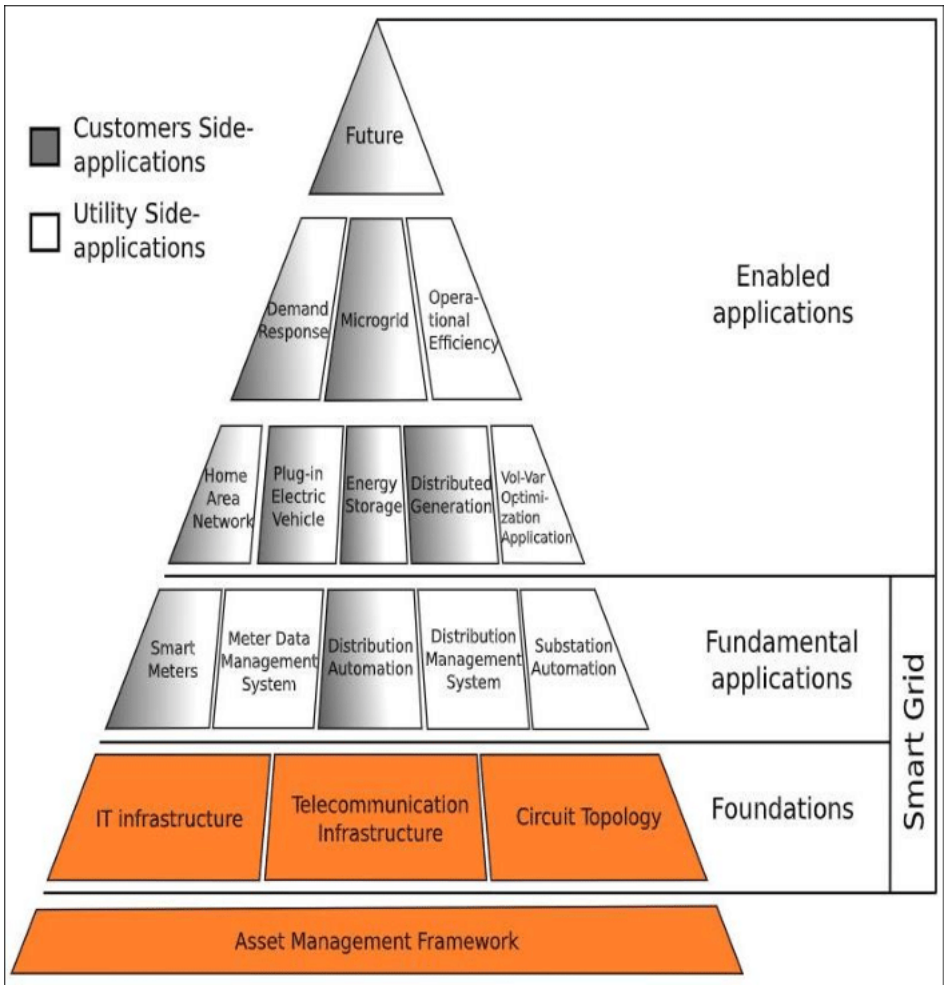
του, αυτό το εννοιολογικό μοντέλο προσδιορίζει επτά διακριτούς τομείς σε έξυπνα δίκτυα: α. πελάτες, β. αγορές, γ. παρόχους υπηρεσιών, δ. λειτουργίες, ε. παραγωγή, συμπεριλαμβανομένων των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, στ. μετάδοση, ζ. διανομή.



Σχήμα 2: Το εννοιολογικό πρότυπο NIST

1. Λόγοι που γέννησαν την ανάγκη ύπαρξης των έξυπνων δικτύων

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ραχοκοκαλιά της βιομηχανίας της ηλεκτρικής ενέργειας και γι' αυτόν τον λόγο βρίσκεται τώρα στο επίκεντρο διαφόρων τεχνολογικών καινοτομιών. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, για παράδειγμα στη Βόρεια Αμερική αλλά και σε όλο τον κόσμο, κάνουν σταθερά βήματα προς την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών σε πολλούς τομείς των υποδομών τους με σκοπό την αποτελεσματικότερη χρήση τους (Zheng, 2022). Στο επίκεντρο αυτού του μετασχηματισμού βρίσκεται η ανάγκη για αποτελεσματικότερη χρήση των υποδομών τους. Στη βάση μιας τυπικής πυραμίδας των εταιρειών κοινής ωφέλειας βρίσκεται η ανάπτυξη έξυπνων δικτύων. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας δημιουργούν τα θεμέλια για το έξυπνο δίκτυο μέσω μιας προσεκτικής αναθεώρησης της υποδομής τους προκρίνοντας το έξυπνο δίκτυο ως απάντηση στις ενεργειακές προκλήσεις των καιρών.

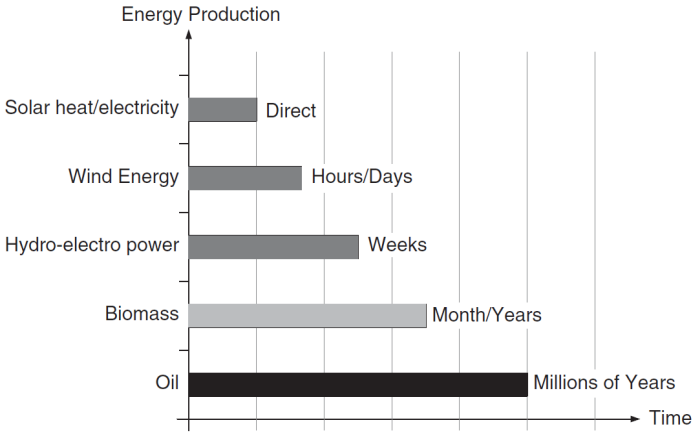


Σχήμα 3: *Πυραμίδα έξυπνου πλέγματος (πηγή: BC Hydro)*

Ως εκ τούτου, μπορεί κανείς να υποστηρίξει ότι δεδομένου του μεγέθους και της αξίας των περιουσιακών στοιχείων των εταιρειών κοινής ωφέλειας, η εμφάνιση του έξυπνου δικτύου θα είναι

πιο πιθανό να ακολουθήσει μια εξελικτική πορεία παρά να εμφανιστεί σαν μια ριζική και δραστική αναθεώρηση (Fang, 2012). Επομένως, το έξυπνο δίκτυο θα υλοποιηθεί μέσω στρατηγικά εμφυτευμένων και κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης, εντός και παράλληλα, του υφιστάμενου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργική και τεχνολογική ανάπτυξη αυτών των εμβρύων με την πάροδο του χρόνου τα βοηθά να αναδειχθούν ως μεγάλοι θύλακες ευφυών συστημάτων σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Αυτή η οργανική ανάπτυξη θα επιτρέψει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να μεταφέρουν ένα μεγαλύτερο μέρος του φορτίου και των λειτουργιών του παλαιού δικτύου στο νέο δίκτυο και έτσι να βελτιώσουν και να ενισχύσουν τις κρίσιμες υπηρεσίες τους.

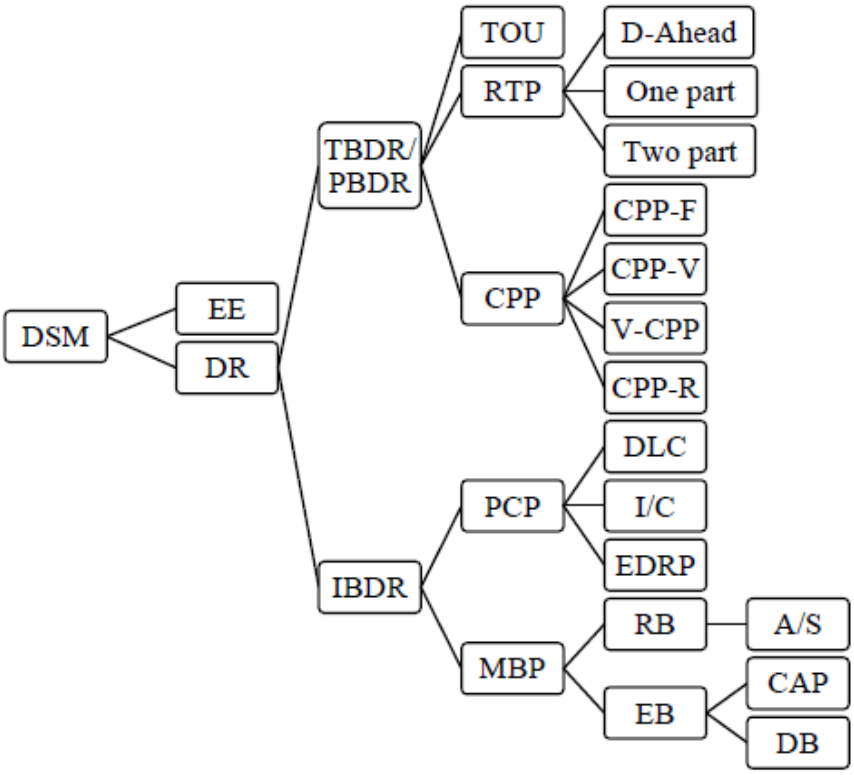
Αυτά τα έμβρυα ευφυών δικτύων θα συμβάλλουν στην κατανεμημένη παραγωγή και συμπαραγωγή ενέργειας. Θα προβλέπουν επίσης την ενσωμάτωση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και τη διαχείριση των εκπομπών και του αποτυπώματος του άνθρακα ενός συστήματος. Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό, θα επιτρέπουν στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να κάνουν πιο αποτελεσματική χρήση των υφιστάμενων περιουσιακών τους στοιχείων μέσω της απόκρισης της ζήτησης, της αποκοπής των αιχμών και του ελέγχου της ποιότητας των υπηρεσιών.



Σχήμα 4: Ο κατά προσέγγιση χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή διαφόρων πηγών ενέργειας

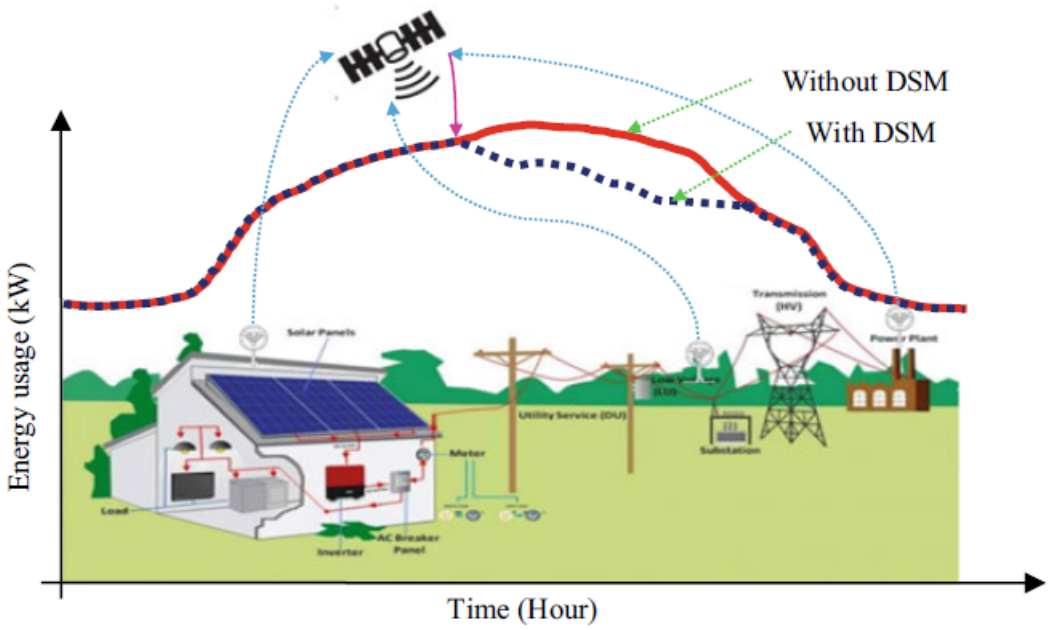
Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι περισσότεροι πάροχοι υπηρεσιών κοινής ωφέλειας σε όλο τον κόσμο είναι πώς να φτάσουν εκεί που χρειάζεται το συντομότερο δυνατό, με το ελάχιστο κόστος και χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο τις κρίσιμες υπηρεσίες που παρέχουν επί του παρόντος. Μια καλή γενική αναφορά για το θέμα της βέλτιστης δρομολόγησης/ελαχιστοποίησης κόστους, είναι η διερεύνηση των μαθηματικών προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων (*Vehicle Routing Problem – VRP*), τα οποία αφορούν τον σχεδιασμό των βέλτιστων διαδρομών της ενέργειας με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους και του χρόνου μετακίνησης. Το VRP αποτελεί κεντρικό θέμα στην

εφοδιαστική και στις πρακτικές εφαρμογές υπηρεσιών, και έχει εκτεταμένη ερευνητική βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση τέτοιων βελτιστοποιήσεων (Bulhões, 2017). Επιπλέον, οι επιχειρήσεις κοινής ωφελείας πρέπει να αποφασίσουν ποιες στρατηγικές και ποιο προγραμματικό σχεδιασμό θα πρέπει να ακολουθήσουν για να διασφαλίσουν ότι θα επιτύχουν την υψηλότερη δυνατή απόδοση των απαιτούμενων επενδύσεων για αυτές τις μεγάλες επιχειρήσεις.



Σχήμα 5:Κατηγορίες προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης

Όπως συμβαίνει με κάθε νέα τεχνολογία, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στον αναπτυσσόμενο κόσμο έχουν ένα σαφές πλεονέκτημα έναντι των ομολόγων τους στον ανεπτυγμένο κόσμο. Οι πρώτοι έχουν λιγότερα ζητήματα παλαιού τύπου για να αντιμετωπίσουν και έτσι μπορεί να είναι σε θέση να κάνουν άλματα προς τα εμπρός χωρίς την ανάγκη συμβατότητας προς τα πίσω με τα υπάρχοντα συστήματά τους. Η έννοια του πλεονεκτήματος της υστέρησης (*backward advantage*), περιγράφει αυτή ακριβώς τη δυνατότητα υιοθέτησης σύγχρονων τεχνολογιών χωρίς βάρη προηγούμενων επενδύσεων (Gerschenkron, 1962; Fong, 2009).



Σχήμα 6: Η επίδραση των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης στην κατανάλωση των πελατών

2. Πως τα έξυπνα δίκτυα προσπαθούν να καλύψουν αυτές τις ανάγκες

2.1.Η διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης (DSM)

Η Διαχείριση Πλευράς Ζήτησης (Demand Side Management – DSM) περιλαμβάνει όλες τις δράσεις που εκτελούνται από την πλευρά της ζήτησης ενός ηλεκτρικού συστήματος και αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των έξυπνων δικτύων (Albadi & El-Saadany, 2008). Στόχος της DSM είναι να βελτιώσει την ευελιξία, την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των δικτύων, οδηγώντας επίσης σε επακόλουθη μείωση του κόστους παραγωγής, μέσω της εφαρμογής δράσεων από την πλευρά των καταναλωτών ή από τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου, πάντα με την έγκριση και συγκατάθεση των καταναλωτών (Palensky & Dietrich, 2011).

Τόσο οι καταναλωτές, όσο και οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, αποκομίζουν συγκεκριμένα οφέλη από την υλοποίηση δράσεων DSM, τα οποία περιλαμβάνουν τη μείωση των λειτουργικών δαπανών, την αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Kok et al., 2011). Οι δράσεις DSM μπορεί να υλοποιούνται είτε απευθείας από τους καταναλωτές, είτε μέσω μεσαζόντων/aggregators, οι οποίοι συντονίζουν την συμμετοχή πολλών τελικών καταναλωτών για να παρέχουν συλλογικά ευελιξία στο σύστημα (Tantau et al., 2021).

Η DSM αποτελεί στρατηγική για την επίτευξη αποτελεσματικότερης κατανάλωσης και μείωσης της αιχμής ζήτησης σε ενεργειακά συστήματα (Lampropoulos *et al.*, 2023). Επιπλέον, στο πλαίσιο της DSM, η απόκριση ζήτησης (Demand Response) αποτελεί συμπληρωματικό μηχανισμό που επιτρέπει στους καταναλωτές να τροποποιούν τα μοτίβα κατανάλωσής τους σε απάντηση σε οικονομικά σήματα ή κίνητρα (Masters, 2004). Πιο συγκεκριμένα, σε μια πιο ευέλικτη και αποτελεσματική προσέγγιση, ιδίως στις πλήρως απελευθερωμένες χονδρικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, οι τελικοί καταναλωτές οργανώνονται σε ομάδες υπό μεσάζοντες/aggregators που διαχειρίζονται τη συμμετοχή τους στα προγράμματα απόκρισης ζήτησης. Αυτοί οι μεσάζοντες, γνωστοί σε πολλές μελέτες ως πάροχοι υπηρεσιών περικοπών (CSP) ή φορείς συγκέντρωσης καταναλωτών (ARC/DR aggregators), λειτουργούν ως ενδιάμεσοι μεταξύ των καταναλωτών και της αγοράς/εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας, συγκεντρώνοντας και προσφέροντας στο σύνολο την ικανότητα των καταναλωτών να ανταποκρίνονται στα αιτήματα ευελιξίας του συστήματος (Ponds *et al.*, 2018; Tantau *et al.*, 2021). Με αυτόν τον τρόπο, οι aggregators μπορούν να συμμετέχουν σε αγορές χονδρικής εκπροσωπώντας έναν επίσης μεγάλο όγκο ενέργειας που προκύπτει από τη συνάθροιση πολλών μικρών χρηστών, κάτι που δεν θα ήταν εφικτό αν γινόταν μεμονωμένα από κάθε μικρό χρήστη (da Costa *et al.*, 2022).

Η παρουσία των aggregators επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αξιοποιούν αποτελεσματικότερα την ευελιξία ζήτησης μέσω οργανωμένης συμμετοχής των καταναλωτών, υποστηρίζοντας τόσο την περιοδική μείωση της ζήτησης όσο και τη συνολική σταθερότητα του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιόδους που η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές μεταβάλλεται δραστικά (Ponds *et al.*, 2018). Ο ρόλος αυτός περιλαμβάνει την συγκέντρωση φορτίων, την παροχή δυναμικών υπηρεσιών εξισορρόπησης και την προσφορά στη χονδρεμπορική αγορά ως συνολικό μπλοκ ευελιξίας, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του ηλεκτρικού δικτύου και διευρύνοντας τη συμμετοχή των τελικών καταναλωτών στην αγορά ενέργειας (Tantau *et al.*, 2021; da Costa *et al.*, 2022).

Πολύ σημαντικός παράγοντας είναι ότι η DSM μπορεί να εντοπίζει τις τυχόν αλλαγές στα προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των τελικών καταναλωτών, προκειμένου να διεκδικήσει χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με την πολιτική τιμολόγησης που ισχύει. Πρακτικά, οι τελικοί καταναλωτές παρακινούνται από τον φορέα εκμετάλλευσης να τροποποιήσουν – προσαρμόσουν το προφίλ κατανάλωσης ισχύος τους σύμφωνα με τις υφιστάμενες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου:

- Να διευκολύνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες ειδικές παραμέτρους λειτουργίας, όπως η διαθέσιμη συνολική δυναμικότητα παραγωγής, ο τύπος και η αποδοτικότητα των γεννητριών, η διατήρηση της δυναμικής ασφάλειας του συστήματος και το ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Kundur, 1994).
- Να προσεγγίσουν το χαμηλότερο κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας για τις αγορές, λαμβάνοντας υπόψη τα προκαθορισμένα οικονομικά κίνητρα, συμπεριλαμβανομένου του παρόχου, ή να επιδιώξουν χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στο πλαίσιο μιας πλήρως απελευθερωμένης χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Stoft, 2002).

2.2. Ταξινόμηση των καταναλωτών

Οι τελικοί καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας (ή πελάτες) κατατάσσονται σε διακριτές ομάδες ανάλογα με το μέγεθός τους και τη συνολική κατανάλωση (Albadi & El-Saadany, 2008; Palensky & Dietrich, 2011):

- Μεγάλοι εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές (C&I)
- Μικροί εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές (C&I)
- Οικιακοί χρήστες/καταναλωτές

- Μεμονωμένα ή στόλος plug-in ηλεκτρικών οχημάτων (PEVs)

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι σημαντική για την εφαρμογή στρατηγικών DSM και Demand Response, καθώς οι διαφορετικοί τύποι καταναλωτών έχουν διαφορετική ικανότητα και ευελιξία στη μεταβολή της κατανάλωσής τους (Tantau et al., 2021; da Costa et al., 2022).

Το μέγεθος και το είδος των παραπάνω κατηγοριών καταναλωτών προσφέρουν διαφορετικές επιλογές και ευκαιρίες για την εφαρμογή στρατηγικών DSM. Για παράδειγμα, οι μεγάλοι εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές είναι συνήθως εξοπλισμένοι με προηγμένες υποδομές ελέγχου και διαχείρισης φορτίων, με αποτέλεσμα να διαθέτουν υψηλότερη τεχνική ευελιξία στη μεταβολή της κατανάλωσης και μεγαλύτερο οικονομικό όφελος από την εφαρμογή DSM στρατηγικών, λόγω του υψηλού μεριδίου του κόστους ενέργειας στις λειτουργικές δαπάνες τους (Williams *et al.*, 2023). Αυτή η δυναμική μπορεί επίσης να δικαιολογήσει την οικονομική σκοπιμότητα για περαιτέρω επενδύσεις σε τεχνολογίες που ενισχύουν τις στρατηγικές DSM, όπως η προμήθεια συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες για οικιακή χρήση δεν είναι, προς το παρόν τουλάχιστον, οικονομικά βιώσιμες με τις τρέχουσες τιμές προμήθειας μπαταριών. Κατά συνέπεια, οι εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές μεγάλου μεγέθους είναι τεχνικά και οικονομικά σε θέση να εισάγουν στρατηγικές DSM στις εγκαταστάσεις τους με υψηλότερη πιθανότητα επιτυχίας (Williams *et al.*, 2023)

Τα πιο συνηθισμένα φορτία που συναντώνται σε εμπορικούς καταναλωτές μικρού μεγέθους αναφέρονται στα ενεργά συστήματα θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού και στον εξοπλισμό φωτισμού. Οι μικρές βιομηχανίες μπορούν να συμμετάσχουν σε διάφορες στρατηγικές DSM. Ανάλογα με τον τύπο και τον προγραμματισμό των γραμμών παραγωγής τους, μπορούν ενδεχομένως να εφαρμόσουν διασκορπισμένη παραγωγή, μετατόπιση φορτίου, ενεργειακή απόδοση και ακόμη και περικοπή φορτίου. Στην περίπτωση των εμπόρων καταναλωτών (καταστήματα, εμπορικά κέντρα κ.λπ.) η χρήση των εγκαταστάσεών τους από τους πελάτες τους περιορίζει τις επιλογές τους για την εφαρμογή στρατηγικών DSM. Ωστόσο, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των καταναλωτών είναι ότι οι περισσότεροι από αυτούς διαθέτουν επί τόπου μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγκατεστημένες, συνήθως ντίζελ gen-sets, για εφεδρική παραγωγή έκτακτης ανάγκης ή για βοηθητική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι εφεδρικές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, στο πλαίσιο ειδικών συμβάσεων με την επιχείρηση κοινής ωφέλειας, ως μονάδες παραγωγής διασκορπισμένης ισχύος, σε περίπτωση ανεπαρκούς κεντρικά εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σε θέση να προσφέρουν κρύα εφεδρικά αποθέματα, γεγονός που αποτρέπει την εγκατάσταση και τη συντήρηση πρόσθετων γεννητριών παραγωγής από την επιχείρηση κοινής ωφέλειας (Williams, 2023).

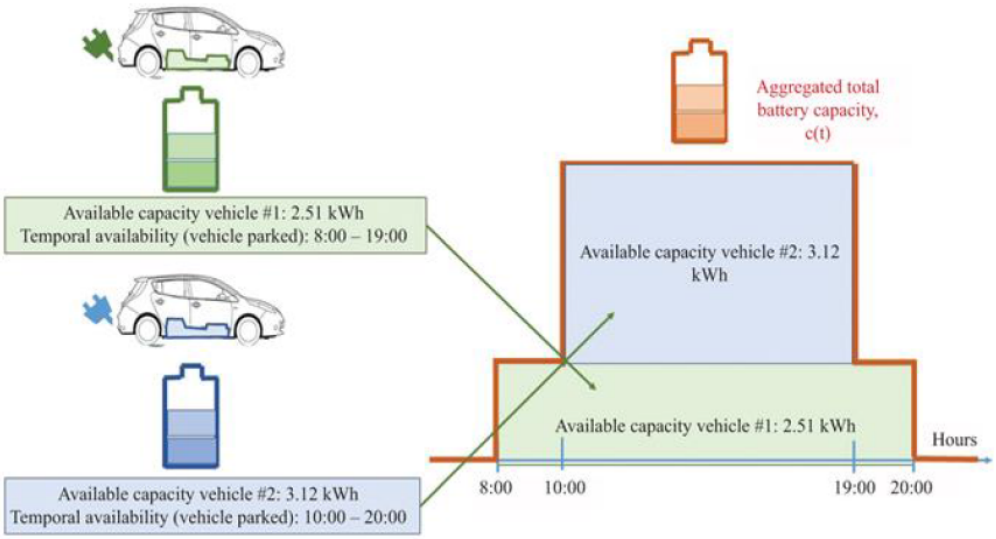
Οι οικιακοί χρήστες δεν φαίνονται ακόμη ώριμοι και παρακινημένοι να συμμετέχουν σε στρατηγικές DSM, ίσως με εξαίρεση ορισμένες χώρες. Αυτό οφείλεται αφενός στην έλλειψη επίγνωσης ή αφετέρου σε επαρκή τεχνική υποδομή, ιδίως όσον αφορά στην απαιτούμενη τεχνολογία επικοινωνίας και αυτοματισμού. Συνήθως οι οικιακοί καταναλωτές είναι εξοικειωμένοι με το ισχύον καθεστώς παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, από μια μοναδική επιχείρηση κοινής ωφέλειας ή μέσω ορισμένων εμπλεκόμενων παρόχων, σε σταθερή, προκαθορισμένη τιμή σε μια σύμβαση που έχει υπογραφεί μεταξύ αυτών και των παρόχων τους. Δεν είναι εξοικειωμένοι με τη διαδικασία συμμετοχής τους στις λιανικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (Palensky & Dietrich, 2011). Επιπλέον, οι οικιακοί καταναλωτές χαρακτηρίζονται συνήθως από σχετικά μικρούς και πολύ συγκεκριμένους τύπους φορτίων, συνήθως εσωτερικός κλιματισμός χώρων, φωτισμός και ισχύς κινητήρα, ως εκ τούτου, είναι μάλλον απρόθυμοι να επενδύσουν στην εφαρμογή στρατηγικών DSM που θα καταλήξουν σε μια πιο ορθολογική χρήση της ενέργειας στις εγκαταστάσεις τους. Ως αποτέλεσμα, οι εφαρμογές στρατηγικών DSM στον οικιακό τομέα παραμένουν περιορισμένες έως σήμερα (Tantau et al., 2021; da Costa et al., 2022).

Ωστόσο, όλη η παραπάνω κατάσταση για τους οικιακούς καταναλωτές έχει αρχίσει να αλλάζει. Αυτό οφείλεται στις ευκαιρίες που αναμένονται από την πλήρη απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι καταναλωτές θα είναι υποχρεωμένοι να προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά τους σε ένα νέο καθεστώς προμήθειας και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελεί, από μόνο του, ενεργό μέρος αυτής της διαδικασίας. Στο νέο αυτό περιβάλλον, οι καταναλωτές δεν θα είναι απλώς παθητικοί χρήστες, αλλά θα συμμετέχουν ενεργά στη διαδικασία προμήθειας και ζήτησης ενέργειας, επηρεάζοντας το κόστος, την αξιοπιστία και την ευελιξία του συστήματος (S. Iqbal et al., 2021). Επιπλέον, οι νέες εξελίξεις στη σχετική τεχνολογία, ιδίως όσον αφορά στα απαιτούμενα συστήματα επικοινωνιών, αυτοματισμού και μέτρησης, θα επιτρέψουν ένα πιο ασφαλές, φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη. Οι προηγμένες υποστηριζόμενες δράσεις και οι προσφερόμενες εγκαταστάσεις, όπως άμεση επιθεώρηση της ζήτησης και της παραγωγής από όλους τους παραγωγούς, σε πραγματικό χρόνο διαμορφωμένη μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, ταχεία μεταφορά παραγγελιών, προσφορών και αιτημάτων από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, τους φορείς συγκέντρωσης, τους παραγωγούς ή οποιοδήποτε άλλο εμπλεκόμενο μέρος με on-line ειδοποιήσεις κ.λπ., θα καταστήσουν το εν λόγω περιβάλλον αξιόπιστο (Said et al., 2024).

Μελλοντικά, τέτοιες λύσεις, όπως ο προγραμματισμός συσκευών, η ενσωμάτωση ΑΠΕ και αποθηκευτικών μονάδων και η αυτόματη απόκριση σε δυναμικά σήματα τιμολόγησης (Habibu et al., 2025), αναμένεται να μειώσουν τις ενεργειακές δαπάνες των νοικοκυριών και να αυξήσουν τα οφέλη από προγράμματα μετατόπισης φορτίου και ελέγχου αιχμής (Iqbal et al., 2021). Παράλληλα, οι

εξελίξεις στις πλατφόρμες επικοινωνίας και αυτοματισμού για έξυπνα σπίτια και κοινότητες επιτρέπουν την ενσωμάτωση των οικιακών καταναλωτών σε ευρύτερα ενεργειακά σχήματα, όπως κοινότητες μικροδικτύων και προγράμματα Demand Response σε επίπεδο γειτονιάς, με στόχο τη μείωση της αιχμής και την αύξηση της συμμετοχής στον ενεργειακό «χώρο». Η εμπλοκή των χρηστών μέσω τεχνολογιών που επιτρέπουν προσωποποιημένη ανατροφοδότηση, αυτοματοποίηση και οικονομικά κίνητρα», όπως έξυπνοι πίνακες ελέγχου κατανάλωσης, προγράμματα δυναμικής τιμολόγησης και εφαρμογές κινητών που ενημερώνουν σε πραγματικό χρόνο για το κόστος και την κατανάλωση (Iqbal et al., 2021; Samadi et al., 2013), αποτελεί και το κομβικό σημείο για τη μετάβαση στο έξυπνο δίκτυο. Επομένως, οι οικιακοί χρήστες αναμένεται να αυξηθούν θεαματικά και η συμμετοχή αυτή προοδευτικά θα μετατραπεί από προαιρετική σε πιο συστηματική, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση συνολικού κόστους όσο και στην ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας του ευρύτερου ενεργειακού συστήματος (Iqbal et al., 2021; Samadi et al., 2013)

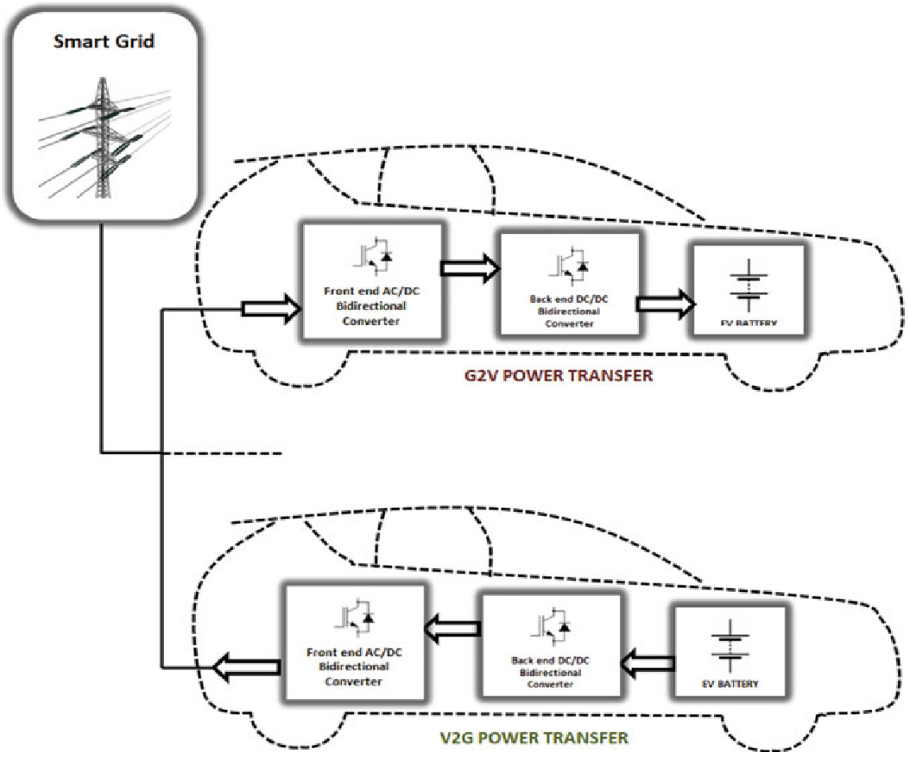
Τέλος, Τα plug-in ηλεκτρικά οχήματα (PEVs) αποτελούν έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τύπο ηλεκτρικών φορτίων, του οποίου η διείσδυση στα ηλεκτρικά δίκτυα αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια, κυρίως λόγω της πτώσης του κόστους μπαταριών ιόντων λιθίου και της ευρείας υιοθέτησης της ηλεκτροκίνησης (Yu *et al*., 2025).



Σχήμα 7: Συνολική χωρητικότητα μπαταρίας

Η μαζική εισαγωγή ηλεκτρικών οχημάτων θα οδηγήσει, αναπόφευκτα, σε αύξηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα, με ακανόνιστες και υψηλές ανάγκες φόρτισης που ενδέχεται να προκαλέσουν αυξημένα αιχμιακά φορτία και πιέσεις στη λειτουργία διανομής, ιδίως εάν η φόρτιση δεν συντονίζεται αποτελεσματικά (Chadha, 2022; Nutkani *et al*., 2024). Ωστόσο, δεδομένης

της ευελιξίας στο χρονοδιάγραμμα φόρτισης των PEVs — δηλαδή της δυνατότητας να φορτίζονται σε ώρες χαμηλής ζήτησης — αυτά τα οχήματα μπορούν να αξιοποιηθούν ως ευέλικτα φορτία στο πλαίσιο στρατηγικών DSM, συμβάλλοντας στη μείωση αιχμιακών πιέσεων και στη μετατόπιση φορτίου από ώρες αιχμής σε ώρες μειωμένης ζήτησης (Chadha, 2022; Ayoade & Longe, 2024). Περαιτέρω, με την ανάπτυξη τεχνολογιών έξυπνης φόρτισης («smart charging») και Vehicle-to-Grid (V2G), τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν όχι μόνο να απορροφούν ενέργεια από το δίκτυο, αλλά και να επικουρούν σε αυτό επιστρέφοντας ενέργεια όταν αυτό απαιτείται, παρέχοντας υπηρεσίες όπως ρύθμιση συχνότητας, εξάλειψη αιχμών και υποστήριξη ανανεώσιμων πηγών (Ayoade & Longe, 2024; *Role of Plug-in Electric Vehicles in Grid Management Services*, 2026). Σε μια πιο οργανωμένη και ελεγχόμενη προσέγγιση, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μπορούν να προτείνουν χρονοδιαγράμματα φόρτισης που ενσωματώνουν κινήσεις αποθήκευσης και αποφόρτισης από τα PEVs ώστε να ελαχιστοποιούν τις αιχμές φορτίου και να βελτιώνουν την ισορροπία ζήτησης–προσφοράς σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του ενεργειακού συστήματος συνολικά (*A Review on Smart Charging impacts of Electric Vehicles on Grid*, 2022).



Σχήμα 8: Μεταφορά ισχύος μεταξύ δύο ηλεκτρικών οχημάτων μέσω του ίδιου ηλεκτρικού δικτύου

2.3.Στρατηγικές διαχείρισης Πλευράς Ζήτησης DSM

Τέσσερις εναλλακτικές στρατηγικές είναι δυνατές για την υλοποίση της DSM οι οποίες στοχεύουν στη βελτίωση της ευελιξίας, της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων (Palensky & Dietrich, 2011; Williams et al., 2023):

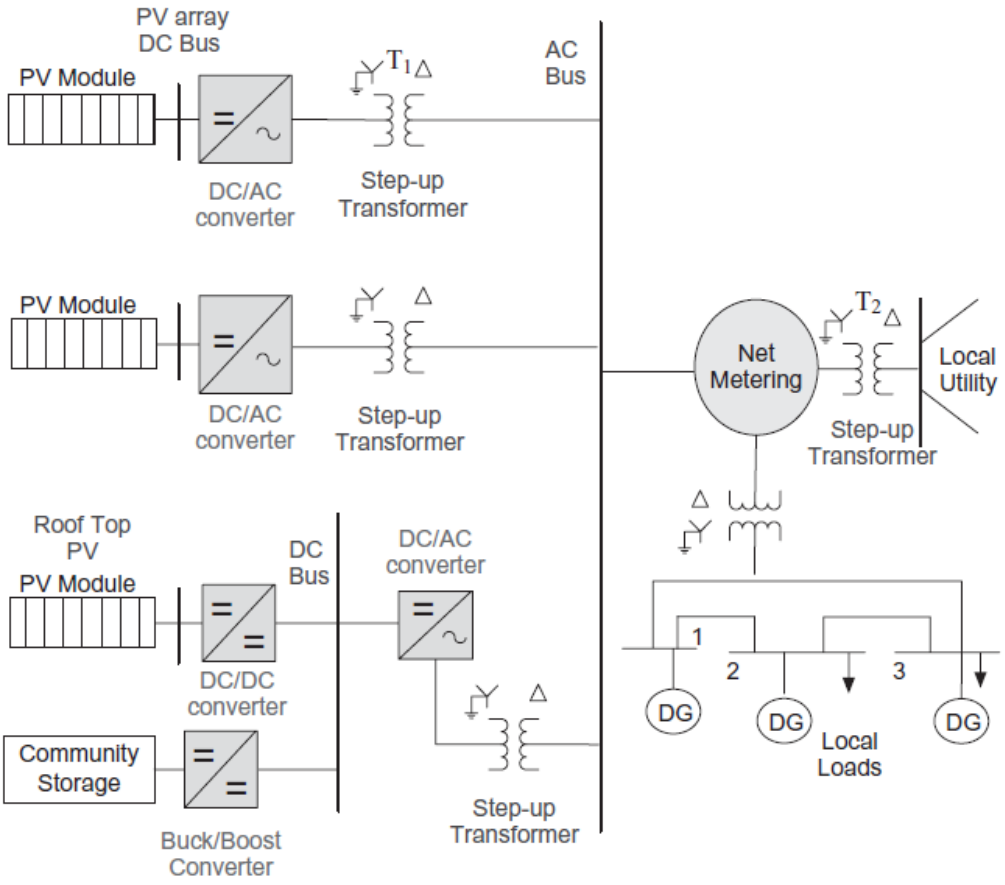
1. Διασκορπισμένη παραγωγή ενέργειας (Distributed Generation, DG): Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ή μικρές μονάδες συμβάλλει στη μείωση της φόρτισης του κεντρικού δικτύου και μπορεί να υποστηρίξει στρατηγικές DSM, ενισχύοντας την ασφάλεια και την αξιοπιστία (da Costa et al., 2022).
2. Μετατόπιση φορτίου (Load Shifting / Peak Shaving): Η κατανάλωση μετακινείται από ώρες αιχμής σε ώρες μειωμένης ζήτησης, γεγονός που μειώνει τις ώρες της αιχμής και το κόστος παραγωγής. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται τεχνολογίες αυτοματισμού και έξυπνης μέτρησης (Samadi et al., 2013; Said et al., 2024).
3. Περιορισμός φορτίου (Load Curtailment): Περιλαμβάνει την προαιρετική ή προγραμματισμένη μείωση της ζήτησης σε ώρες αιχμής για την αποφυγή υπερφόρτωσης ή για τη στήριξη της αξιοπιστίας του συστήματος (Tantau et al., 2021).
4. Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency): Καθώς βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση των εγκαταστάσεων και των συσκευών, μειώνεται η συνολική κατανάλωση και τα κόστη, ενώ ενισχύονται παράλληλα τα οφέλη των υπολοίπων στρατηγικών DSM (Habibu et al., 2025).

Οι παραπάνω στρατηγικές μπορούν να συνδυαστούν ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόκριση ζήτησης και η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των καταναλωτών (οικιακοί, εμπορικοί ή βιομηχανικοί) και την τεχνολογική υποδομή που διαθέτουν (Williams et al., 2023).

2.3.1. Διασκορπισμένη παραγωγή ενέργειας

Πιο αναλυτικά, η διασκορπισμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διασκορπισμένες μονάδες μικρού μεγέθους, που ανήκουν στους καταναλωτές ή σε μεμονωμένους παραγωγούς (Ackermann, Andersson & Söder, 2001). Αυτές οι διασκορπισμένες μονάδες συνήθως περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκούς σταθμούς, μικρές ανεμογεννήτριες, σταθμούς βιομάζας, μονάδες συνδυασμένης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) και ακόμη και θερμικές γεννήτριες μικρού μεγέθους (Lund et al., 2015; IEA, 2022). Τέτοιοι

σταθμοί μικρού μεγέθους μπορούν να εφαρμοστούν στο πλαίσιο δύο εναλλακτικών κινήτρων και πολιτικών ενέργειας. Το πρώτο είναι η αποζημίωση των παραγωγών για την ηλεκτρική ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο, στο πλαίσιο εναλλακτικών τιμολογιακών πολιτικών, όπως είναι οι προκαθορισμένες, οι σταθερές και οι εγγυημένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας (καθεστώς τροφοδοσίας σε τιμολόγιο) ή σε ποικίλες τιμές, που καθορίζονται με βάση τις προσφορές που αναρτώνται on-line από τους παραγωγούς στις απελευθερωμένες, χονδρικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (REN21, 2023; IEA, 2022). Ένα δεύτερο εναλλακτικό κίνητρο είναι η λειτουργία σε κατάσταση net-metering. Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται με συγκεκριμένο καταναλωτή. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηνιαία ή, συνήθως, ετήσια βάση αντισταθμίζεται με τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του συνδεδεμένου καταναλωτή. Δεν παρέχεται αμοιβή για τυχόν πλεονάζουσα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τον παραγωγό στο τέλος της υπό εξέταση χρονικής περιόδου, ενώ ο καταναλωτής θα πρέπει να πληρώσει μόνο για την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται, αφού αποζημιωθεί με τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Eid et al., 2014).



Σχήμα 9:Διάγραμμα μίας γραμμής για ένα κοινοτικό σύστημα διανομής μικροδυκτύων συνδεδεμένο με ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κοινής ωφέλειας

Η διασκορπισμένη παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για τη λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων. Παρά το γεγονός ότι πολλές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, όπως τα φωτοβολταϊκά και οι μικρές ανεμογεννήτριες, είναι μη εγγυημένες μονάδες παραγωγής, η γεωγραφική διασπορά των μονάδων συμβάλλει στη μείωση των συνολικών διακυμάνσεων παραγωγής και στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος (Ackermann, Andersson & Söder, 2001; Lund et al., 2015). Επιπλέον, επειδή οι μονάδες αυτές εγκαθίστανται κοντά στους τελικούς καταναλωτές και συνδέονται κυρίως στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, μειώνονται ή ελαχιστοποιούνται οι απώλειες μεταφοράς και μετασχηματισμού ηλεκτρικής ενέργειας (IEA, 2022).

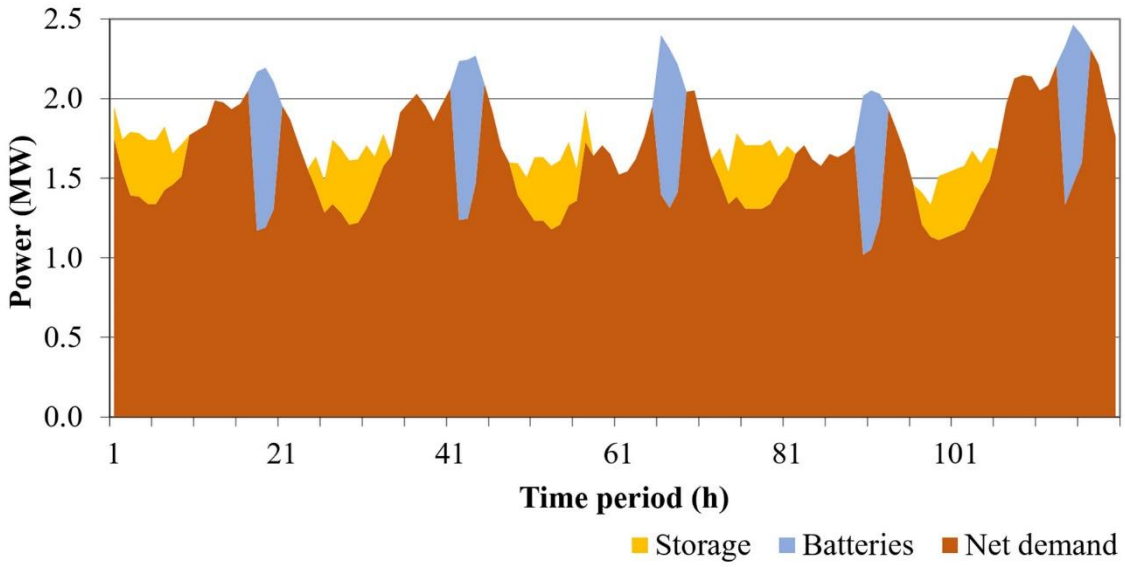
Η πιο κοινή τεχνολογία που εμπλέκεται στην παραγωγή διασκορπισμένης ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά. Η σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής και προμήθειας πάνελ p/v έχει οδηγήσει σε επακόλουθη μείωση του συνολικού κόστους εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών σταθμών σε τιμές χαμηλότερες από 1.000 €/kWp. Ενδεικτικά, ένα τυπικό ευρωπαϊκό νοικοκυριό παρουσιάζει μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 12 kWh, γεγονός που αντιστοιχεί σε ετήσια κατανάλωση περίπου 4.380 kWh. Υποθέτοντας έναν ετήσιο συντελεστή απόδοσης φωτοβολταϊκού συστήματος περίπου 16,5%, η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς για την κάλυψη της παραπάνω ετήσιας κατανάλωσης ανέρχεται περίπου στα 3 kW. Με ειδικό κόστος εγκατάστασης της τάξης των 1.000 €/kWp, το συνολικό κόστος επένδυσης ανέρχεται περίπου στα 3.000 €. Εφόσον ληφθεί υπόψη μια καθαρή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 0,12 €/kWh για τους τελικούς καταναλωτές, ο ετήσιος οικονομικός συμψηφισμός της παραγωγής 4.380 kWh οδηγεί σε οικονομικό όφελος περίπου 525,6 € ετησίως, γεγονός που αντιστοιχεί σε περίοδο αποπληρωμής περίπου 5,7 ετών (IEA, 2022; REN21, 2023).

2.3.2. Μετατόπιση φορτίου (αποκοπή μέγιστης ζήτησης)

Η μετατόπιση ισχύος (load shifting) αποτελεί βασική στρατηγική διαχείρισης της ζήτησης ενέργειας στο πλαίσιο των πρακτικών διαχείρισης της πλευράς της ζήτησης (Demand Side Management – DSM). Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μέσω της μετατόπισης της λειτουργίας ευέλικτων ηλεκτρικών φορτίων από περιόδους αιχμής της ζήτησης σε περιόδους χαμηλότερης κατανάλωσης, δηλαδή στις «κοιλάδες» του ημερήσιου προφίλ φορτίου (Palensky & Dietrich, 2011; Albadi & El-Saadany, 2008). Στο πλαίσιο αυτό, οικιακές δραστηριότητες όπως η λειτουργία πλυντηρίων ρούχων, το σιδέρωμα ή το μαγείρεμα μπορούν να προγραμματιστούν σε ώρες εκτός αιχμής χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η άνεση των χρηστών (Beaudin & Zareipour, 2015). Επιπλέον, η μετατόπιση φορτίου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προψύξης ή της προθέρμανσης των

εσωτερικών χώρων ενός κτιρίου κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης, αξιοποιώντας τη θερμική αδράνεια του κτιριακού κελύφους για τη διατήρηση των επιθυμητών συνθηκών θερμικής άνεσης σε μεταγενέστερο χρόνο (Reynders, Diriken & Saelens, 2017). Παράλληλα, η εφαρμογή συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, τα οποία μπορούν να λειτουργούν συνεχώς και να εκμεταλλεύονται τη θερμική αποθήκευση της κατασκευής, συμβάλλει στην εξομάλυνση του ενεργειακού φορτίου ακόμη και σε περιόδους μικρής απουσίας των ενοίκων (Arteconi, Hewitt & Polonara, 2013). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών αποτελεί η συνδυασμένη λειτουργία αντλιών θερμότητας με συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, τα οποία επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω στρατηγικών μετατόπισης φορτίου (Li et al., 2017).

Μια δεύτερη σημαντική προσέγγιση για τη διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι η εισαγωγή κατανεμημένων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, η βασική αρχή είναι παρόμοια με τη διαδικασία αποκοπής της μέγιστης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (peak shaving), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα DSM (Siano, 2014). Ωστόσο, αντί της εγκατάστασης μιας μεγάλης κεντρικής μονάδας αποθήκευσης, η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην εγκατάσταση μικρών, αποκεντρωμένων συστημάτων αποθήκευσης από τους ίδιους τους καταναλωτές, όπως για παράδειγμα ηλεκτροχημικές μπαταρίες (Lund et al., 2015; Zakeri & Syri, 2015). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα αποκεντρωμένο δίκτυο αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να ενισχύσει την ευελιξία του ενεργειακού συστήματος και να συμβάλει στη μείωση των αιχμών ζήτησης. Η λειτουργική αρχή των συστημάτων αυτών βασίζεται στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης και χαμηλότερων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε η αποθηκευμένη ενέργεια να χρησιμοποιείται ή να επανεισάγεται στο δίκτυο κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης (Lund et al., 2015; Zakeri & Syri, 2015; Denholm et al., 2010).



Σχήμα 10: Μετατόπιση φορτίου που πραγματοποιείται με κατανεμημένη αποθήκευση ενέργειας στη σύνθεση παραγωγής ενέργειας για το νησί της Σίφνου, Ελλάδα.

2.3.3. Περιορισμός φορτίου

Ο περιορισμός της ενέργειας αναφέρεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των τελικών χρηστών, ανεξάρτητα από τις ενεργειακές τους ανάγκες, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και κατόπιν σχετικού αιτήματος του χειριστή ή του φορέα συγκέντρωσης (Albadi & El-Saadany, 2008). Στόχος αυτής της στρατηγικής είναι η μείωση της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η αποφυγή ενεργοποίησης μονάδων υψηλού ειδικού κόστους παραγωγής, όπως αεριοστρόβιλοι, ή η αντιμετώπιση περιορισμένης διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας (Siano, 2014). Αυτή η στρατηγική μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες εναλλακτικές προσεγγίσεις και προγράμματα. Το απλούστερο είναι μέσω ενός προγράμματος άμεσου ελέγχου φορτίου (**Direct Load Control -** DLC). Τα προγράμματα DLC βασίζονται σε συμφωνίες μεταξύ του βοηθητικού προγράμματος και των καταναλωτών που καθορίζουν τους όρους και τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες το βοηθητικό πρόγραμμα, ή ένας φορέας συγκέντρωσης, μπορεί να ελέγχει και να διαχειρίζεται εξ αποστάσεως τη χρήση συγκεκριμένων ηλεκτρικών συσκευών (Beaudin & Zareipour, 2015). Το DLC εφαρμόζεται κυρίως για τον έλεγχο της χρήσης των συσκευών φωτισμού και της λειτουργίας του εξοπλισμού θερμικής άνεσης και, δευτερευόντως, για άλλους τύπους καταναλώσεων, όπως ψυγεία, καταψύκτες και αντλίες. Στην πράξη, ο έλεγχος του φωτισμού πραγματοποιείται με τη μείωση της φωτεινής ροής που εκπέμπεται από τους λαμπτήρες φωτισμού, η οποία με την σειρά της γίνεται με την ρύθμιση (dimming) του φωτισμού, ενώ ο έλεγχος του εξοπλισμού θέρμανσης ή ψύξης πραγματοποιείται απλά με τη μείωση ή

την αύξηση, αντίστοιχα, της επιθυμητής εσωτερικής θερμοκρασίας χώρου. Στις συμφωνίες DLC ορίζονται επίσης οι χρονικές περίοδοι εφαρμογής, οι εποχές χρήσης (π.χ. καλοκαίρι σε τουριστικές περιοχές), τα όρια μέγιστης μείωσης ισχύος ανά τύπο φορτίου, καθώς και οικονομικά ή άλλα κίνητρα για τους συμμετέχοντες (Palensky & Dietrich, 2011; Reynders, Diriken & Saelens, 2017). Εναλλακτικά, οι περικοπές φορτίου μπορούν να εφαρμοστούν με εθελοντική συμμετοχή των καταναλωτών στο πλαίσιο **προγραμμάτων έξυπνης τιμολόγησης (Smart Pricing)**, η οποία αναφέρεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε περιόδους υψηλής τιμολόγησης. Επίσης, οι πιο δημοφιλείς διαθέσιμες επιλογές είναι η Κρίσιμη Μέγιστη Τιμολόγηση (CPP), οι Τιμές Ώρας Χρήσης (ToU) και η Τιμολόγηση σε Πραγματικό Χρόνο (RTP) (Albadi & El-Saadany, 2008; Siano, 2014).. Με την προσέγγιση CPP, μια προκαθορισμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας ενεργοποιείται από την επιχείρηση κοινής ωφέλειας σε περίπτωση που η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει ένα επίσης προκαθορισμένο ανώτερο επίπεδο και διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα υπάρχει αυτή η κατάσταση. Σύμφωνα με την ToU, η διαφορετική τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προκαθορισμένη για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τέλος, η RTP αναφέρεται σε συνεχώς ποικίλες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίο συνήθως επαναπροσδιορίζονται σε ωριαία βάση, ως απάντηση στη χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας που ελευθερώνεται. Οι καταναλωτές είναι ελεύθεροι να προσαρμόσουν την κατανάλωσή τους δεδομένης της εφαρμοζόμενης τιμολογιακής πολιτικής από την επιχείρηση κοινής ωφέλειας, προκειμένου να επιτύχουν τελικά τη χαμηλότερη δυνατή τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με τις ανάγκες τους.

2.3.4. Ενεργειακή απόδοση

Η στρατηγική ενεργειακής απόδοσης επιβάλλει την κατανάλωση λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας ή, γενικότερα, πρωτογενών ενεργειακών πόρων για την κάλυψη της ίδιας ποσότητας τελικών ενεργειακών αναγκών, όπως φωτισμός, θέρμανση ή ψύξη χώρων, ισχύς κινητήρων κ.ά. (IEA, 2014; Lund et al., 2015). Η εφαρμογή αυτή της στρατηγικής συνεπάγεται ότι η μειωμένη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να καταναλώνεται χωρίς να τροποποιούνται τα πρότυπα και οι συνήθειες κατανάλωσης ενέργειας, τα οποία, με τη σειρά τους, καθορίζουν τις ίδιες τελικές ενεργειακές ανάγκες (Palensky & Dietrich, 2011). Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με την αντικατάσταση των παλαιών αναποτελεσματικών ηλεκτρικών συσκευών, όπως ψυγεία, τηλεοράσεις, πλυντήρια ρούχων, συσκευές φωτισμού, με νέες υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης. Για να στραφεί το καταναλωτικό κοινό προς αυτή την κατεύθυνση, πρέπει να εισαχθούν οικονομικά κίνητρα από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, τις ρυθμιστικές αρχές ή τις αρμόδιες κρατικές αρχές (Sorrell, 2007). Ίσως το συνηθέστερο κίνητρο για

τους τελικούς καταναλωτές, για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των εγκαταστάσεών τους, είναι η επιδότηση ή η χρηματοδότηση μέρος του κόστους αντικατάστασης των παλαιών ηλεκτρικών συσκευών, το οποίο μπορεί να ποικίλει και να είναι ανάλογο με το ετήσιο εισόδημα του αιτούντος ή του απαιτούμενου κεφαλαίου για την αναβάθμιση των ενεργειακών επιδόσεων των κτιρίων του. Οι οικιακές συσκευές τελευταίας τεχνολογίας, οι έξυπνες συσκευές, είναι ένα ακόμα εργαλείο ενεργειακής απόδοσης. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο γιατί προσφέρουν υψηλότερη απόδοση, αλλά επειδή παρουσιάζουν επίσης μια σειρά καινοτόμων χαρακτηριστικών που στοχεύουν στην υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας και να διευκολύνουν την αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Αυτές οι έξυπνες συσκευές παρέχουν δυνατότητες παρακολούθησης και ελέγχου, επιτρέπουν την επικοινωνία με άλλες συσκευές, με έξυπνους μετρητές και με συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Η Ένωση Οικιακών Συσκευών (AHAM) ορίζει τις έξυπνες συσκευές ως «*εκσυγχρονισμό του συστήματος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας μιας οικιακής συσκευής, έτσι ώστε να παρακολουθεί, να προστατεύει και να προσαρμόζει αυτόματα τη λειτουργία της στις ανάγκες του ιδιοκτήτη της*» (AHAM, 2015) .

Αρκετές τυπικές ηλεκτρικές συσκευές μπορούν να εξοπλιστούν με τεχνικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν τη λειτουργία τους ως έξυπνες συσκευές. Ενδεικτικά, οι έξυπνες συσκευές μπορούν να περιλαμβάνουν τυπικά λευκά προϊόντα, όπως ψυγεία και καταψύκτες, πλυντήρια ρούχων, στεγνωτήρια ρούχων και πλυντήρια πιάτων, φούρνους και σόμπες, καθώς και κλιματιστικά, αντλίες κυκλοφορίας για συστήματα κεντρικής θέρμανσης, θέρμανση ηλεκτρικής αποθήκευσης και θερμαντήρες νερού (Beaudin & Zareipour, 2015). Το κύριο χαρακτηριστικό λειτουργίας αυτών των συσκευών είναι η χρήση ενός έξυπνου αλγόριθμου διαχείρισης που στοχεύει στη βελτιστοποίηση του επαγόμενου φορτίου τους στο ηλεκτρικό σύστημα, σύμφωνα με τα ληφθέντα σήματα από την υπηρεσία κοινής ωφέλειας (Palensky & Dietrich, 2011). Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να επαναπρογραμματίσουν τη λειτουργία ορισμένων έξυπνων συσκευών, όπως πλυντήρια ρούχων, στεγνωτήρια ή πλυντήρια πιάτων, για να αποφευχθεί η λειτουργία τους κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής ζήτησης. Μπορούν επίσης να ενεργοποιήσουν τη διαλείπουσα λειτουργία συγκεκριμένων συσκευών ή τη χρήση άλλων συσκευών ως ένα είδος συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να αποφεύγεται η κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως πρόψυξη ή προθέρμανση εσωτερικού χώρου ή ψυγείων και καταψυκτών εκ των προτέρων (Reynders, Diriken & Saelens, 2017). Επιπλέον, οι έξυπνες συσκευές μπορούν να ανιχνεύσουν διαταραχές ποιότητας ισχύος ή απρόβλεπτα μέτρα ασφαλείας στο δίκτυο και να προσαρμόσουν αντίστοιχα τη λειτουργία τους για να υποστηρίξουν τη σταθεροποίηση της κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Μπορούν, για παράδειγμα, να απενεργοποιηθούν αυτόματα για λίγα λεπτά,

σε περίπτωση ανίχνευσης ολίσθησης συχνότητας για να υποστηρίξουν τη θεμελιώδη συχνότητα ανάκτησης του δικτύου στην ονομαστική του τιμή (Eid et al., 2014).

3. Προγράμματα DSM

Τα προγράμματα Διαχείρισης Ζήτησης (Demand Side Management – DSM) περιλαμβάνουν ένα σύνολο μέτρων ή κινήτρων που καθορίζονται από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ή τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου, με στόχο την ενθάρρυνση των τελικών καταναλωτών να συμμετάσχουν σε μία ή περισσότερες στρατηγικές DSM (Albadi & El-Saadany, 2008; Siano, 2014). Η συμμετοχή αυτή μπορεί να προσφέρει στους καταναλωτές οικονομικά οφέλη και αυξημένο έλεγχο των οικιακών τους εγκαταστάσεων και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος (Palensky & Dietrich, 2011). Ωστόσο, διάφοροι παράγοντες μπορεί να αποθαρρύνουν τη συμμετοχή των καταναλωτών στα εν λόγω προγράμματα, όπως:

- η συνήθειά τους να ενεργούν αποκλειστικά ως παθητικοί καταναλωτές, όσον αφορά τυχόν διαδικασίες παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό ίσως με τα υπερφορτωμένα καθημερινά προγράμματά τους και την έλλειψη χρόνου
- η αβεβαιότητα τους να συμμετάσχουν σε προγράμματα απόκρισης στις τιμές και την αντίστοιχη οικονομική βιωσιμότητα, στα πλαίσια της χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι είναι εξοικειωμένοι με την ασφάλεια σταθερών και συχνά αρκετά χαμηλών τιμών προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από την κλίμακα και την ημερήσια ή εποχιακή διακύμανση του προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας
- η έλλειψη εξοικείωσης, ειδικά για τους ηλικιωμένους καταναλωτές, με τις σύγχρονες τεχνολογίες και την απροθυμία τους να συνηθίσουν με τον εξοπλισμό υλικού και τις εφαρμογές λογισμικού που απαιτούνται για την ενσωμάτωση στρατηγικών DSM
- η προθυμία τους να διατηρήσουν το επίπεδο άνεσής τους και την επακόλουθη απροθυμία να προβούν σε μείωση της κατανάλωσής τους κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης στο ηλεκτρικό σύστημα, π.χ. συμμετέχοντας σε στρατηγικές περιορισμού του φορτίου.

Δηλαδή οι μεμονωμένοι οικιακοί ή εμπορικοί πελάτες μικρού ή μεσαίου μεγέθους ενδέχεται να μην αισθάνονται ασφαλείς κατά τη δημιουργία εμπορικών σχέσεων με παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας ή τους φορείς συγκέντρωσης και γι' αυτό μπορούν να αποφασίσουν να συμμετάσχουν σε ορισμένα προγράμματα DSM, μόνο εάν οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας συνεργάζονται μαζί τους στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων. Τα προγράμματα DSM ταξινομούνται κυρίως σε τρεις κατηγορίες:

1. Προγράμματα DSM βάσει τιμών: οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλουν χρονικά, με στόχο την προώθηση μεταφοράς της κατανάλωσης σε περιόδους χαμηλής τιμής (Albadi & El-

Saadany, 2008; Siano, 2014). Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να καθορίζονται εκ των προτέρων σε προκαθορισμένες χρονικές περιόδους ή ενδέχεται να διαφέρουν δυναμικά σε σχέση με τη χρονική περίοδο του 24ωρου διαστήματος, τη συγκεκριμένη ημέρα της εβδομάδας ή την εποχή του έτους, ανάλογα με τη διαμορφωμένη ισορροπία μεταξύ της διαθέσιμης δυναμικότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και του υφιστάμενου περιθωρίου αποθεματικού. Σε περίπτωση δυναμικά ποικίλης τιμολόγησης, οι τιμές μπορούν να καθορίζονται σε ημερήσια ή ωριαία βάση, δηλαδή μία ημέρα ή μία ώρα νωρίτερα, ή ακόμη και σε πραγματικό χρόνο και οι πελάτες καλούνται να αντιδράσουν αντίστοιχα στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας. Ανεξάρτητα από την τιμολογιακή πολιτική, οι πελάτες θα πληρώνουν προφανώς υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και χαμηλότερες τιμές κατά τις περιόδους εκτός αιχμής. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τις επιλογές Time-of-Use (ToU), Critical Peak Pricing (CPP) και Real-Time Pricing (RTP). Στο ToU, οι τιμές είναι προκαθορισμένες για συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, στο CPP ενεργοποιείται υψηλή τιμή σε περίπτωση αιχμής ζήτησης και στο RTP οι τιμές μεταβάλλονται δυναμικά σε ωριαία βάση.

2. Κίνητρα προγραμμάτων DSM βάσει συμβάντων: οι καταναλωτές ανταμείβονται για μείωση της κατανάλωσης κατόπιν αιτήματος ή για παροχή πρόσβασης στον έλεγχο του εξοπλισμού τους (Beaudin & Zareipour, 2015). Τα πιο τυπικά προγράμματα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν:

- Άμεσο έλεγχο φορτίου (DLC),
- Προγράμματα αντιμετώπισης ζήτησης έκτακτης ανάγκης,
- Προγράμματα αγοράς δυναμικότητας,
- Διακοπτόμενα/περικοπτόμενα προγράμματα,
- Προγράμματα αγοράς βοηθητικών υπηρεσιών.

3. Προσφορές μείωσης ζήτησης (Demand Bidding/Response): οι καταναλωτές υποβάλλουν προσφορές μείωσης της ζήτησης, καθορίζοντας ποσότητα και τιμή, κυρίως σε περιόδους αιχμής, με στόχο τη βελτιστοποίηση οικονομικών οφελών και την ενίσχυση της συμμετοχής σε στρατηγικές περιορισμού φορτίου (Albadi & El-Saadany, 2008; Eid et al., 2014).

Υπάρχουν διάφορα προγράμματα DSM που προτείνονται στη βιβλιογραφία, ταξινομημένα σύμφωνα με διάφορα κριτήρια [24, 25]. Σε γενικές γραμμές, αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες, σύμφωνα με το μέρος που ξεκινά την εκτελεσθείσα εργασία:

- Προγράμματα DSM βάσει τιμών: οι τιμές προμήθειας ποικίλλουν σε σχέση με το χρόνο και οι πελάτες παρακινούνται να μεταφέρουν την κατανάλωσή τους σε περιόδους χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τρεις εναλλακτικές επιλογές τιμολόγησης που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή οι επιλογές ToU, CPP και RTP, εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία προγραμμάτων DSM. Οι τιμές ώρας χρήσης αναφέρονται στον ορισμό των σταθερών μπλοκ τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας (υψηλότερες τιμές κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και αντιστρόφως). Η κρίσιμη μέγιστη τιμολόγηση περιλαμβάνει μια προκαθορισμένη αυξημένη τιμή που ενεργοποιείται από το βοηθητικό πρόγραμμα, εάν η ζήτηση ενέργειας γίνει υψηλότερη από ένα προκαθορισμένο όριο. Η τιμή αυτή διατηρείται σε αυτό το αυξημένο επίπεδο είτε για περιορισμένο αριθμό ωρών είτε έως ότου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας πέσει και πάλι κάτω από το προκαθορισμένο όριο. Τέλος, σε ένα καθεστώς pricing σε πραγματικό χρόνο, οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνονται συνεχώς, συνήθως επαναπροσαρτίθενται σε ωριαία βάση, ως απάντηση στη χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

1. Κίνητρο προγραμμάτων DSM που βασίζονται σε συμβάντα: **Κίνητρα προγραμμάτων DSM βάσει συμβάντων:** οι καταναλωτές ανταμείβονται για μείωση της κατανάλωσης κατόπιν αιτήματος ή για παροχή πρόσβασης στον έλεγχο του εξοπλισμού τους (Beaudin & Zareipour, 2015). Τα πιο τυπικά προγράμματα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν:
   - Άμεσος έλεγχος φορτίου: οι πελάτες ανταμείβονται που επέτρεψαν στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αποκτήσουν έλεγχο μέχρι ένα μέγιστο επίπεδο σχετικά με τη χρήση συγκεκριμένου ηλεκτρικού εξοπλισμού.
   - Προγράμματα αντιμετώπισης ζήτησης έκτακτης ανάγκης: οι πελάτες λαμβάνουν πληρωμές κινήτρων για τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όσον αφορά τη σταθερότητα και τη δυναμική ασφάλεια του ηλεκτρικού δικτύου.
   - Προγράμματα αγοράς δυναμικότητας: οι πελάτες λαμβάνουν πληρωμές κινήτρων για περικοπές φορτίου ως υποκατάστατα της συνολικής διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας του ηλεκτρικού συστήματος.
   - Περικοπτόμενος: οι πελάτες λαμβάνουν μια μειωμένη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος (προεξοφλητικό επιτόκιο) για να συμφωνήσουν να μειώσουν το φορτίο μετά από αίτημα.
   - Προγράμματα αγοράς βοηθητικών υπηρεσιών: οι πελάτες λαμβάνουν πληρωμές από τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ηλεκτρικής

ενέργειας κατόπιν αιτήματος για την υποστήριξη της ασφαλούς λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Κατά μία έννοια, αυτό αντικαθιστά την παροχή παρεπόμενων υπηρεσιών.

- Προσφορές μείωσης ζήτησης: οι πελάτες που συμμετέχουν σε αυτή την κατηγορία προγραμμάτων στέλνουν προσφορές μείωσης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην επιχείρηση κοινής ωφέλειας ή στον φορέα συγκέντρωσης, ανάλογα με την ικανότητά τους να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας. Σε αυτά, τοποθετείται η προσφερόμενη μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και οι ζητούμενες τιμές. Αυτό το πρόγραμμα ενθαρρύνει κυρίως τους πελάτες μεγάλου μεγέθους να συμμετάσχουν σε στρατηγικές περικοπής φορτίου. Από την άλλη, μέσω της συμμετοχής τους σε αυτή τη διαδικασία, έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίσουν το ποσό του φορτίου που θα ήταν πρόθυμοι να περιορίσουν στις ανακοινωθείσες τιμές. Προφανώς, οι πιο ευνοϊκές από οικονομική άποψη περίοδοι για την υποβολή προσφορών είναι οι περίοδοι αιχμής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, όταν μεγιστοποιείται το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υπάρχουν περιθώρια για υψηλότερες ανταμοιβές για την περιορισμένη αύξηση του φορτίου (Albadi & El-Saadany, 2008; Eid et al., 2014).

Μια εναλλακτική ταξινόμηση των προγραμμάτων DSM μπορεί να βασίζεται στην πηγή του κινήτρου, ιδίως εάν καθοδηγείται από οικονομικές παραμέτρους έξυπνων δικτύων, δηλαδή τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο, σήματα τιμών και κίνητρα, ή από τη φυσική λειτουργία των έξυπνων δικτύων και τα ζητήματα που αφορούν την αξιοπιστία και την ασφάλειά τους, για παράδειγμα διαχείριση του δικτύου και σήματα έκτακτης ανάγκης. Στην πρώτη περίπτωση, τα προγράμματα DSM ενεργοποιούνται από τα οικονομικά των έξυπνων δικτύων, δηλαδή τη μείωση του κόστους παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που, με τη σειρά του, οδηγεί στη μείωση της τιμής προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές. Το DSM με στόχο τη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών ενεργοποιείται από προγράμματα απόκρισης στις τιμές, υπό την ηγεσία της αγοράς και σε τιμές. Στη δεύτερη περίπτωση, τα φυσικά προγράμματα DSM εξαρτώνται από τις απαιτήσεις αξιοπιστίας του έξυπνου πλέγματος. Αυτές οι εργασίες ενεργοποιούνται από προγράμματα ελέγχου βάσει έκτακτης ανάγκης, καθοδηγούμενο από το σύστημα, απόκρισης φορτίου, βάσει κινήτρων και άμεσου φορτίου (Palensky & Dietrich, 2011; Reynders, Diriken & Saelens, 2017).

4. Τα οφέλη του DSM

Τα προγράμματα Διαχείρισης Ζήτησης (DSM) παρέχουν πολλαπλά οφέλη για τα έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία εξαρτώνται από τη διάταξη του δικτύου, τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες και τις στρατηγικές DSM, καθώς και από τον τύπο των συμμετεχόντων καταναλωτών (Albadi & El-Saadany, 2008; Palensky & Dietrich, 2011). Τα οφέλη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

α. Εξοικονόμηση λογαριασμών για πελάτες-καταναλωτές που συμμετέχουν σε προγράμματα DSM:

Αυτά μπορεί να προέλθουν από χρηματική εξοικονόμηση στους λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της αύξησης της ενεργειακής απόδοσης, της περικοπής φορτίου, της διασκορπισμένης παραγωγής ή της μετατόπισης φορτίου ή των άμεσων πληρωμών κινήτρων από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στους πελάτες για την εφαρμογή ορισμένων ή όλων των παραπάνω στρατηγικών DSM. Για παράδειγμα, οι καταναλωτές μπορούν να μειώσουν το κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίζοντας τα φορτία από τις περιόδους αιχμής στη χαμηλή ζήτηση ενέργειας. Μπορούν επίσης να επωφεληθούν από την άμεση μείωση των λογαριασμών ηλεκτρικού ρεύματος μειώνοντας την κατανάλωσή τους, είτε μέσω περικοπών φορτίου, βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης είτε μέσω αντιστάθμισης της κατανάλωσής τους με την παραγωγή τους από απομακρυσμένους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που λειτουργούν υπό τον τρόπο net-metering (Siano, 2014). Ταυτόχρονα, μπορούν να επωφεληθούν από άμεσες πληρωμές κινήτρων από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας (Reynders, Diriken & Saelens, 2017).

β. Εξοικονόμηση λογαριασμών για πελάτες-καταναλωτές που δεν συμμετέχουν σε προγράμματα DSM:

Εξαιτίας της εφαρμογής των προγραμμάτων DSM σε έξυπνα δίκτυα, μπορεί να επιτευχθεί μειωμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Αυτό μπορεί να είναι το αποτέλεσμα αποκοπής μέγιστης ζήτησης ισχύος (μετατόπιση φορτίου) ή περικοπών φορτίου, ειδικά κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής ζήτησης. Και οι δύο παραπάνω στρατηγικές μπορούν να οδηγήσουν στην ισοπέδωση του ημερήσιου προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία, με τη σειρά της, θα οδηγήσει σε μια σειρά θετικών επιπτώσεων, όπως η εξάλειψη της λειτουργίας των κορυφαίων γεννητριών, οι μειωμένες απαιτήσεις για περιστρεφόμενη εφεδρική συντήρηση, με τελικό αποτέλεσμα το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν η

επιτευχθείσα μείωση του κόστους παραγωγής μεταφερθεί ως έκπτωση στην τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους παρόχους σε όλους τους τελικούς καταναλωτές, επίσης οι καταναλωτές που δεν συμμετέχουν σε προγράμματα DSM μπορούν να επωφεληθούν από μειωμένους λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος (Eid et al., 2014).

γ. Οφέλη αξιοπιστίας για όλους τους πελάτες-καταναλωτές:

Η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε κάθε είδους όφελος που θα προκύψει και που σχετίζεται με την επιτευχθείσα βελτιωμένη αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος. Βελτιωμένη αξιοπιστία σημαίνει μειωμένη πιθανότητα διακοπών παροχής ρεύματος, υψηλότερη ποιότητα ισχύος και καλύτερη απόδοση του συστήματος (Palensky & Dietrich, 2011). Όλα αυτά μπορεί να συνεπάγονται απώλειες εισοδήματος για τους βιομηχανικούς και εμπορικούς καταναλωτές, αλλά μια σειρά κοινωνικών οφελών για τους πολίτες γενικά.

δ. Επιδόσεις της αγοράς:

Η DSM αυξάνει την ανταγωνιστικότητα της χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και βελτιώνει την τεχνική και οικονομική ευελιξία και αποτελεσματικότητα του συστήματος προσφέροντας περισσότερες επιλογές για τη διατήρηση της ισορροπίας ζήτησης και προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την αντιμετώπιση κρίσιμων και έκτακτων γεγονότων. Με τον τρόπο αυτό, η DSM εμποδίζει τα μονοπώλια της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και συμβάλλει στην σταθεροποίηση των τιμών (Albadi & El-Saadany, 2008; Siano, 2014). Η ισοπέδωση της ζήτησης μειώνει το κόστος παραγωγής και ενισχύει την ευελιξία του συστήματος μέσω περικοπών και μετατόπισης φορτίου.

Τα προγράμματα DSM με γνώμονα την αγορά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή τιμολογίων που μεταβάλλονται με την ώρα, επιτρέποντας την ενεργό συμμετοχή της πλευράς της ζήτησης στην αγορά. Η DSM μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των τιμών της χονδρικής αγοράς. Στην πραγματικότητα, τα προγράμματα DSM μπορούν να λειτουργήσουν ως αποσβεστήρας σε περιόδους υψηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας συμβάλλοντας στην απόσβεση των επιπτώσεων των γεγονότων του ακραίου συστήματος. Αυτό προσεγγίζεται μέσω της προσαρμογής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους τελικούς καταναλωτές. Με τον τρόπο αυτό, η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται σε αντίστροφη αναλογία προς το κόστος της, οδηγώντας στη διατήρηση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ κατανάλωσης και προσφερόμενων τιμών. Με τον τρόπο αυτό, οι πελάτες και οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας προστατεύονται από τον κίνδυνο να εκτεθούν στην αστάθεια των τιμών και στις

καταστάσεις έκτακτης ανάγκης του συστήματος. Η επιπεδοποίηση του καθημερινού προφίλ της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταφράζεται σε άμεσο οικονομικό όφελος τόσο για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας όσο και για τους καταναλωτές. Τα ίδια αποτελέσματα επιτυγχάνονται επίσης από τη βελτίωση της ευελιξίας της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω περικοπών φορτίων και μετατόπισης, περιορίζοντας την έκταση και τον αριθμό των αιχμών των τιμών.

ε. Βελτιωμένη ασφάλεια και απόδοση του συστήματος:

Παρέχονται περισσότερες επιλογές και δυνατότητες στη διαχείριση ζητημάτων σταθερότητας και ασφάλειας του συστήματος. Για παράδειγμα, σε περίπτωση διακοπής της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ικανότητα άμεσης (π.χ. διασκορπισμένης παραγωγής) ή έμμεσης (π.χ. περικοπών φορτίου) παροχής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω στρατηγικών DSM για να συμβάλλει στην ανάκτηση του ηλεκτρικού συστήματος σε επίπεδα προ έκτακτης ανάγκης. Για τον ίδιο λόγο, οι στρατηγικές DSM μπορούν επίσης να θεωρηθούν εναλλακτικά μέσα παροχής βοηθητικών υπηρεσιών για τους διαχειριστές συστημάτων, όπως η υποστήριξη τάσης, το ενεργό και αντιδραστικό ισοζύγιο ισχύος, η ρύθμιση συχνότητας και η διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Οι στρατηγικές DSM μπορούν να υποκαταστήσουν παραδοσιακές υπηρεσίες αποθεματικής ισχύος, λειτουργώντας ως «εικονική αποθήκευση» και μειώνοντας την ανάγκη για περιστρεφόμενη εφεδρική συντήρηση (Beaudin & Zareipour, 2015; Reynders, Diriken & Saelens, 2017). Η συγκέντρωση και η διαχείριση σημαντικού ποσού διαθέσιμων φορτίων που πρόκειται να συμμετάσχουν σε διαδικασίες μετατόπισης φορτίου, μπορούν συνολικά να προσφέρουν εναλλακτικές επιλογές αποθήκευσης για τις αγορές χονδρικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, ανταγωνιζόμενες, με τον τρόπο αυτό, τις παραδοσιακές τεχνολογίες αποθήκευσης, με τα κύρια πλεονεκτήματα του μη απαιτούμενου κόστους εγκατάστασης ή προμήθειας και χωρίς επιβαλλόμενο κόστος συντήρησης ή αντικατάστασης, όπως και με τις πραγματικές συσκευές αποθήκευσης. Επιπλέον, η DSM συμβάλλει στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας παραγωγής από μη εγγυημένους σταθμούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (R.E.S.) και στη μείωση των απωλειών μεταφοράς ενέργειας μέσω δικτύων διανομής. Επίσης, οι στρατηγικές DSM, ιδίως η διασκορπισμένη παραγωγή, η μετατόπιση φορτίου και ο περιορισμός του φορτίου, συμβάλλοντας στη διατήρηση του ισοζυγίου ζήτησης και προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως σημαντικό μέσο για τον μετριασμό τυχόν προβλημάτων που προκαλούνται από την αυξημένη, αβέβαιη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μη εγγυημένων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα σταθμοί Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Οι ίδιες στρατηγικές

DSM, μέσω της υποστήριξής τους στην ικανότητα του συστήματος να αντιδρά αποτελεσματικά, σε περίπτωση σφάλματος ή έκτακτης ανάγκης, μπορούν να ανακουφίσουν την ανάγκη για περιστρεφόμενη εφεδρική συντήρηση. Αυτό, με τη σειρά του, θα οδηγήσει σε υψηλότερη αποδοτικότητα λειτουργίας του συνολικού συστήματος και οικονομικά αποδοτική απόδοση.

Και οι παραπάνω πέντε στρατηγικές DSM, είτε μέσω της άμεσης διασκορπισμένης παραγωγής, της μείωσης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είτε της μετατόπισης φορτίου μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών μετάδοσης ισχύος, μέσω της μεταφοράς ή των δικτύων διανομής, δηλαδή σε έναν άλλο μέσο αύξησης της αποδοτικότητας και της οικονομικά αποδοτικής λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Για τον ίδιο λόγο, οι στρατηγικές DSM μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην ανακούφιση των περιορισμών του δικτύου ή στην αποφυγή διακοπών ρεύματος σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή συμφόρησης στο δίκτυο μεταφοράς ή διανομής.

στ. Επέκταση του συστήματος:

Όπως προαναφέρθηκε στην παραπάνω ανάλυση, η DSM μπορεί να συμβάλει με διάφορους τρόπους στην ισοπέδωση του καθημερινού προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του μέγιστου αποκοπής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και, γενικά, στη μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι, δεδομένου ότι τα ηλεκτρικά συστήματα κατασκευάζονται και διαστασιολογούνται για την αναμενόμενη μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να οδηγήσει σε αναβολή ή ακόμη και ακύρωση νέων επενδύσεων για την κατασκευή και την ανάπτυξη πρόσθετων υποδομών στις εγκαταστάσεις παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού συστήματος, χωρίς να επηρεάζεται η αξιοπιστία του συστήματος και η καταλληλότητά του για την υποστήριξη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (Albadi & El-Saadany, 2008; Palensky & Dietrich, 2011).

5. Εξέλιξη του έξυπνου δικτύου

5.1. Το υπάρχον δίκτυο

Το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι προϊόν του περασμένου αιώνα και αναπτύχθηκε μέσα σε συνθήκες ταχείας αστικοποίησης και ανάπτυξης υποδομών σε διάφορα μέρη του κόσμου. Αν και τα υπάρχοντα δίκτυα βρίσκονται σε πολλές και διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας έχουν γενικά υιοθετήσει παρόμοιες τεχνολογίες. Η ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο, έχει επηρεαστεί από οικονομικούς, πολιτικούς και γεωγραφικούς παράγοντες που είναι μοναδικοί για κάθε εταιρεία κοινής ωφέλειας. Παρά τις διαφορές αυτές, η βασική τοπολογία του υπάρχοντος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρέμεινε αμετάβλητη. Από την ίδρυσή της, η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί με σαφείς οριοθετήσεις μεταξύ των υποσυστημάτων παραγωγής, μετάδοσης και διανομής και έτσι έχει διαμορφώσει διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού, εξέλιξης και μετασχηματισμού σε κάθε επί μέρους στοιχείο της. Το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα αυστηρά ιεραρχικό σύστημα στο οποίο οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας στη κορυφή της αλυσίδας εξασφαλίζουν την παροχή ισχύος στα φορτία των πελατών στο τέλος της αλυσίδας (Farhangi, 2010). Το σύστημα είναι ουσιαστικά ένας μονοκατευθυντήριος αγωγός όπου η πηγή δεν έχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τις παραμέτρους εξυπηρέτησης των τερματικών σημείων.

Ως εκ τούτου, το δίκτυο είναι καθ' υπερβολή σχεδιασμένο ώστε να αντέχει στη μέγιστη αναμενόμενη ζήτηση αιχμής σε όλο το συνολικό φορτίο του. Και δεδομένου ότι αυτή η μέγιστη ζήτηση είναι ένα σπάνιο φαινόμενο, το σύστημα είναι εγγενώς αναποτελεσματικό. Επιπλέον, η προηγούμενη αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια, σε συνδυασμό με τις καθυστερημένες επενδύσεις στην υποδομή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει μειώσει τη σταθερότητα του συστήματος. Με τα ασφαλή περιθώρια εξαντλημένα, οποιαδήποτε απρόβλεπτη αύξηση της ζήτησης ή ανωμαλίες σε όλο το δίκτυο διανομής που προκαλούν βλάβες εξαρτημάτων μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικές διακοπές ρεύματος.

Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και οι καθυστερημένες επενδύσεις στις υποδομές μείωσαν περαιτέρω τη σταθερότητα του συστήματος, καθώς οποιαδήποτε απρόβλεπτη αύξηση ζήτησης ή βλάβη σε εξαρτήματα του δικτύου διανομής μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες διακοπές ρεύματος. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας εισήγαγαν συστήματα εποπτικού ελέγχου και απόκτησης δεδομένων (SCADA), τα οποία προσφέρουν περιορισμένο έλεγχο ανάντη λειτουργιών, αφήνοντας το δίκτυο διανομής εκτός άμεσου ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη και στις πιο ανεπτυγμένες περιοχές, όπως η Βόρεια Αμερική, η διείσδυση

αυτοματισμού σε επίπεδο διανομής δεν ξεπερνά το 20%, ενώ περίπου το 90% των διακοπών ρεύματος προκύπτει από το δίκτυο διανομής, υποδεικνύοντας ότι η μετάβαση προς το έξυπνο δίκτυο πρέπει να εστιάσει στην κατώτερη αλυσίδα (Palensky & Dietrich, 2011). Επιπλέον, η ραγδαία αύξηση του κόστους των ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με την αδυναμία των εταιρειών κοινής ωφέλειας να επεκτείνουν την παραγωγική τους ικανότητα σύμφωνα με την αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, επιτάχυνε την ανάγκη εκσυγχρονισμού του δικτύου διανομής με την εισαγωγή τεχνολογιών που μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση της ζήτησης και στην προστασία των εσόδων. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα, η πλευρά της μέτρησης του συστήματος διανομής αποτέλεσε το επίκεντρο των πιο πρόσφατων επενδύσεων σε υποδομές. Τα προηγούμενα έργα στον τομέα αυτό περιλάμβαναν την εισαγωγή συστημάτων αυτόματης διαχείρισης μετρητών (AMR) στο δίκτυο διανομής. Η AMR επιτρέπει στα βοηθητικά προγράμματα να διαβάζουν τα αρχεία κατανάλωσης, τους συναγερμούς και την κατάσταση από τις εγκαταστάσεις των πελατών από απόσταση. Αν και η τεχνολογία AMR αποδείχθηκε αρχικά ελκυστική, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας συνειδητοποίησαν ότι οι AMR δεν αντιμετωπίζουν το μείζον ζήτημα που πρέπει να επιλύσουν: την πλευρά της ζήτησης διαχείριση. Λόγω του συστήματος μονόδρομης επικοινωνίας, η δυνατότητα της AMR περιορίζεται στην ανάγνωση δεδομένων μετρητών. Δεν επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να λάβουν διορθωτικά μέτρα με βάση τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τους μετρητές. Με άλλα λόγια, οι AMR δεν επιτρέπουν τη μετάβαση στο έξυπνο δίκτυο, όπου ο διάχυτος έλεγχος σε όλα τα επίπεδα είναι βασική απαίτηση (Gungor et al., 2013).

Κατά συνέπεια, η τεχνολογία των AMR δεν επιβίωσε για πολύ. Αντί να επενδύσουν στους AMR, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας σε όλο τον κόσμο κινήθηκαν προς την εξελιγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure -AMI). Η AMI παρέχει βοηθητικά προγράμματα με αμφίδρομα συστήματα επικοινωνίας με τον μετρητή, καθώς και τη δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων του επιπέδου εξυπηρέτησης των πελατών. Μέσω της AMI, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας μπορούν να επιτύχουν τους βασικούς τους στόχους για τη διαχείριση φορτίου και την προστασία των εσόδων (Farhangi, 2010; Amin, 2000). Δεν μπορούν μόνο να πάρουν στιγμιαίες πληροφορίες σχετικά με ατομική και συγκεντρωτική ζήτηση, αλλά μπορούν επίσης να επιβάλουν ορισμένα ανώτατα όρια στην κατανάλωση, καθώς και τη θέσπιση διαφόρων μοντέλων εσόδων για τον έλεγχο του κόστους τους.

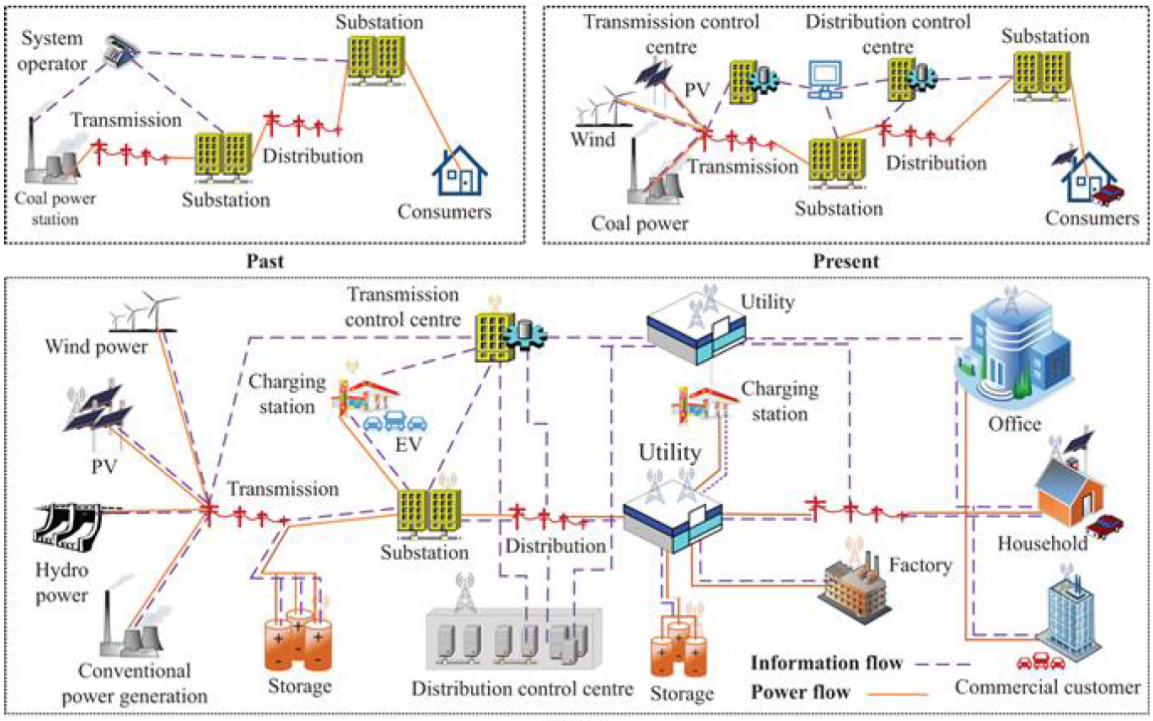
Η υιοθέτηση της AMI επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αμφίδρομη επικοινωνία με τους μετρητές και παρέχει δυνατότητες τροποποίησης των παραμέτρων εξυπηρέτησης των πελατών. Μέσω αυτής της υποδομής, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας μπορούν να επιτύχουν τη διαχείριση φορτίου,

την προστασία των εσόδων και την άμεση συλλογή πληροφοριών σχετικά με ατομική και συγκεντρωτική ζήτηση (Bezas, 2024; Athanasiadis, 2025). Η εμφάνιση του AMI προανήγγειλε μια συντονισμένη κίνηση προς τη βελτίωση των συνεχώς μεταβαλλόμενων εννοιών του έξυπνου δικτύου, ενώ η επιλογή τεχνολογιών AMI εξαρτάται από τη συμβατότητά τους με τις μελλοντικές τοπολογίες και τεχνολογίες έξυπνου δικτύου (Barouksi, 2023; Openarchives.gr, n.d.).

Οι εταιρείες κοινής ωφέλειας έχουν πλήρη επίγνωση των δυσκολιών που συνεπάγεται η μετάβαση των υποδομών, των οργανισμών και των διαδικασιών τους προς ένα αβέβαιο μέλλον (Ferrag et al., 2016).

5.2.Μετάβαση στο έξυπνο δίκτυο

Ως επόμενο λογικό βήμα, το έξυπνο δίκτυο πρέπει να αξιοποιήσει την υποδομή AMI και να εφαρμόσει τις κατανεμημένες στρατηγικές διοίκησης και ελέγχου στη ραχοκοκαλιά του AMI (Bezas, 2024; Barouksi, 2023). Ο διάχυτος έλεγχος και η ευφυΐα που ενσωματώνει το έξυπνο δίκτυο πρέπει να βρίσκονται σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές, τα στοιχεία και τις λειτουργίες του συστήματος. Η διάκριση αυτών των τριών στοιχείων είναι σημαντική, καθώς καθορίζει την τοπολογία του έξυπνου δικτύου και των συστατικών του στοιχείων.



Σχήμα 11: Εξέλιξη του ηλεκτρικού δικτύου

6. Έξυπνα Μικροδίκτυα

Το έξυπνο δίκτυο είναι η συλλογή όλων των τεχνολογιών, εννοιών, τοπολογιών και προσεγγίσεων που επιτρέπουν την αντικατάσταση των ιεραρχιών παραγωγής, μεταφοράς και διανομής με ένα ολοκληρωμένο, οργανικά έξυπνο, πλήρως ολοκληρωμένο περιβάλλον όπου οι επιχειρηματικές διαδικασίες, οι στόχοι και οι ανάγκες όλων των ενδιαφερομένων υποστηρίζονται από την αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων, υπηρεσιών και συναλλαγών (Amin & Wollenberg, 2005; Bezas, 2024).

Ως εκ τούτου το έξυπνο δίκτυο ορίζεται ως ένα δίκτυο που φιλοξενεί μια μεγάλη ποικιλία επιλογών παραγωγής, για παράδειγμα κεντρικό, κατανεμημένο, διαλείπον και κινητό. Επιτρέπει στους καταναλωτές να αλληλεπιδρούν με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας για να προσαρμόσουν τη χρήση ενέργειας και να μειώσουν το ενεργειακό τους κόστος (Barouksi, 2023). Ένα έξυπνο δίκτυο είναι επίσης ένα σύστημα αυτοεπισκευαζόμενο. Προβλέπει τις διαφαινόμενες αποτυχίες και λαμβάνει διορθωτικά μέτρα για να αποφύγει ή να μετριάσει τα προβλήματα του συστήματος. Ένα έξυπνο δίκτυο χρησιμοποιεί την πληροφορική για να βελτιστοποιεί συνεχώς τη χρήση των κεφαλαιακών περιουσιακών του στοιχείων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης (Athanasiadis, 2025). Η χρήση της πληροφορικής στο έξυπνο δίκτυο επιτρέπει τη συνεχή βελτιστοποίηση της χρήσης των κεφαλαιακών περιουσιακών στοιχείων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης (Ferrag et al., 2016).

Χαρτογραφώντας τους παραπάνω ορισμούς σε μια πρακτική αρχιτεκτονική, μπορεί κανείς εύκολα να δει ότι το έξυπνο δίκτυο δεν μπορεί και δεν πρέπει να υποκαταστήσει το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά να το συμπληρώσει (Amin & Wollenberg, 2005). Με άλλα λόγια, το έξυπνο δίκτυο θα συνυπάρχει και θα πρέπει να συνυπάρχει με το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας τις δυνατότητες και τις λειτουργίες του μέσω μιας εξελικτικής πορείας. Αυτό απαιτεί μια τοπολογία για το έξυπνο δίκτυο που επιτρέπει την οργανική ανάπτυξη, τη συμπερίληψη προοδευτικών τεχνολογιών και την πλήρη συμβατότητα προς τα πίσω με τα υπάρχοντα κλασικά συστήματα (Bezas, 2024).

Στον πυρήνα του, το έξυπνο δίκτυο είναι μια περιστασιακή ενσωμάτωση συμπληρωματικών στοιχείων, υποσυστημάτων και λειτουργιών υπό τον διάχυτο έλεγχο ενός εξαιρετικά έξυπνου και κατανεμημένου συστήματος εντολών και ελέγχου. Επιπλέον, η οργανική ανάπτυξη και εξέλιξη του έξυπνου δικτύου αναμένεται να προέλθει από την ενσωμάτωση ορισμένων βασικών δομών που ονομάζονται έξυπνα) μικροδίκτυα (Athanasiadis, 2025; Ferrag et al., 2016). Τα μικροδίκτυα ορίζονται

ως διασυνδεδεμένα δίκτυα κατανεμημένων ενεργειακών συστημάτων (φορτία και πόροι) που μπορούν να λειτουργήσουν είτε συνδεδεμένα είτε χωριστά από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

6.1. Τοπολογία μικροδικτύου

Ένα έξυπνο δίκτυο μικροδικτύων, που μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε διασυνδεδεμένη όσο και σε διεσπαρμένη μορφή, συνήθως ενσωματώνει τα ακόλουθα επτά στοιχεία:

1. Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής: Ενσωματώνει σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ικανούς να καλύψουν την τοπική ζήτηση, καθώς και να επανεισάγουν την αχρησιμοποίητη ενέργεια πίσω στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι γνωστοί ως συμπαραγωγοί και συχνά χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τον άνεμο, τον ήλιο και τη βιομάζα (Lasseter, 2011). Ορισμένα μικροδίκτυα είναι εξοπλισμένα με θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας ικανούς να ανακτήσουν την απορριπτόμενη θερμότητα, η οποία είναι ένα εγγενές υποπροϊόν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (ΣΗΘ) και ανακυκλώνουν την απορριπτόμενη θερμότητα με τη μορφή ψύξης ή θέρμανσης σε εγκαταστάσεις που είναι σε άμεση γειτνίαση με τον σταθμό παραγωγής (CIGRÉ, 2018).

2. Διαχείριση φορτίων: Εξυπηρετεί μια ποικιλία φορτίων, συμπεριλαμβανομένων των οικιστικών, γραφείων και βιομηχανικών φορτίων (Hatziargyriou et al., 2007).

3. Αποθήκευση ενέργειας: Χρησιμοποιεί την τοπική και κατανεμημένη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας για να εξομαλύνει τη διαλείπουσα απόδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Parhizi et al., 2015).

4. Έξυπνοι μετρητές και αισθητήρες: Ενσωματώνει έξυπνους μετρητές και αισθητήρες ικανούς να μετρήσουν ένα πλήθος παραμέτρων κατανάλωσης (π.χ. ενεργή ισχύς, άεργος ισχύς, τάση, ρεύμα, ζήτηση κ.ο.κ.) με αποδεκτή ακρίβεια και ανοχή. Οι έξυπνοι μετρητές πρέπει να είναι ανθεκτικοί στην παραβίαση και να μπορούν να συνδέονται και να αποσυνδέονται εύκολα για έλεγχο φορτίου και υποστήριξης (Athanasiadis, 2025).

5. Υποδομή επικοινωνιών: Ενσωματώνει μια υποδομή επικοινωνίας που επιτρέπει στα στοιχεία του συστήματος να ανταλλάσσουν πληροφορίες και εντολές με ασφάλεια και αξιοπιστία (Ferrag et al., 2016).

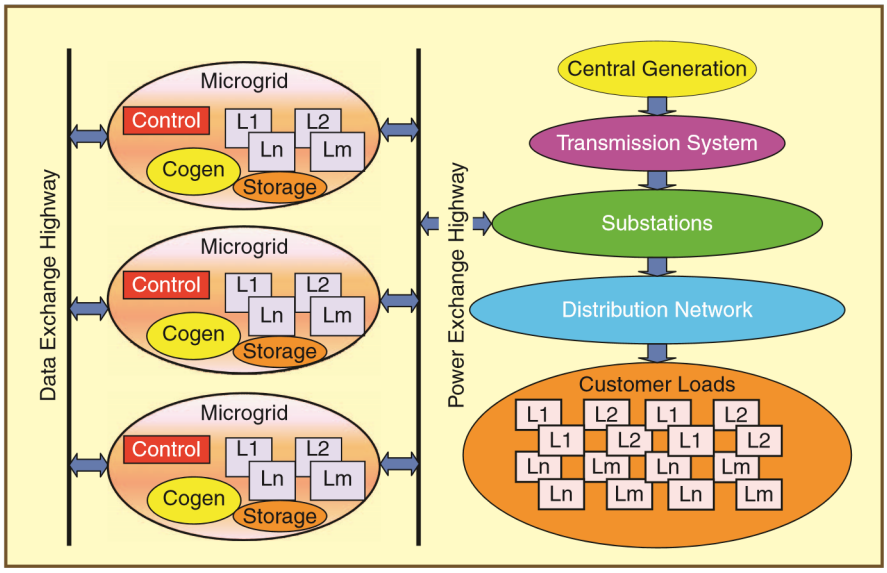
6. Έξυπνοι τερματισμοί και φορτία: Ενσωματώνει έξυπνους τερματισμούς, φορτία και συσκευές ικανές να επικοινωνούν την κατάστασή τους και να δέχονται εντολές για να προσαρμόζουν και να ελέγχουν την απόδοσή τους και το επίπεδο εξυπηρέτησης με βάση τις απαιτήσεις χρήστη ή / και χρησιμότητας (Bezas, 2024).

7. Έξυπνος πυρήνας: Ενσωματώνει έναν έξυπνο πυρήνα που αποτελείται από ολοκληρωμένα στοιχεία υποδομής δικτύωσης, υπολογιστών και επικοινωνιών, που εμφανίζεται στους χρήστες με τη μορφή εφαρμογών διαχείρισης ενέργειας που επιτρέπουν τη διοίκηση και τον έλεγχο σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Αυτά θα πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίζουν όλους τους τερματισμούς, να τους υποβάλλουν ερωτήματα, να ανταλλάσσουν δεδομένα και εντολές μαζί τους και να διαχειρίζονται τα δεδομένα που συλλέγονται για προγραμματισμένη και/ή κατά παραγγελία μεταφορά στις πληροφορίες υψηλότερου επιπέδου που βρίσκονται στο έξυπνο δίκτυο. Lasseter, 2011; Parhizi et al., 2015).

6.2. Τοπολογία έξυπνων δικτύων

Το έξυπνο δίκτυο αναμένεται επομένως να αναδειχθεί ως μια καλά σχεδιασμένη ενσωμάτωση έξυπνων μικροδικτύων plug-and-play που θα διασυνδεθούν μέσω ειδικών καναλιών επικοινωνίας για εντολές, δεδομένα και ανταλλαγή ισχύος (Lasseter, 2011; Hatziargyriou et al., 2007). Η εμφάνιση αυτών των έξυπνων μικροδικτύων και ο βαθμός αλληλεπίδρασης και ενσωμάτωσής τους θα εξαρτηθεί από τις ταχέως κλιμακούμενες δυνατότητες και απαιτήσεις των έξυπνων δικτύων (Parhizi et al., 2015). Τα μικροδίκτυα δεν θα είναι όλα ίδια· ανάλογα με την ποικιλομορφία του φορτίου, το μείγμα των πρωτογενών πηγών ενέργειας, τη γεωγραφία και τις οικονομικές συνθήκες συγκεκριμένων περιοχών, κάθε μικροδίκτυο θα κατασκευαστεί με διαφορετικές δυνατότητες, εγκαταστάσεις και δομές (CIGRÉ, 2018). Οι εταιρείες κοινής ωφέλειας απαιτούν τα υπάρχοντα συστήματα AMI να εξασφαλίζουν εξελικτική πορεία προς το έξυπνο δίκτυο, καθώς το κόστος ανάπτυξης του AMI είναι υψηλό και δεν επιτρέπει πλήρη αναθεώρηση των εγκατεστημένων συστημάτων (Athanasiadis, 2025). Ως εκ τούτου, για το άμεσο μέλλον, το παλιό και το νέο δίκτυο θα λειτουργούν παράλληλα, με τη λειτουργικότητα και το φορτίο να μεταφέρονται σταδιακά από το παλιό σύστημα στο νέο (Lasseter, 2011; Bezas, 2024). Στο όχι πολύ μακρινό μέλλον, το έξυπνο δίκτυο θα αναδειχθεί ως ένα σύστημα έξυπνων μικροδικτύων οργανικής ενσωμάτωσης, με διάχυτη ορατότητα και κατανεμημένες λειτουργίες εντολών και ελέγχου σε όλα τα επίπεδα (Hatziargyriou et al., 2007).

Η τοπολογία του αναδυόμενου δικτύου θα μοιάζει επομένως με μια υβριδική λύση, όπου η βασική νοημοσύνη αναπτύσσεται συναρτήσει της ωριμότητας και της έκτασής της (Parhizi et al., 2015; Ferrag et al., 2016).



Σχήμα 12: Υβριδική τοπολογία έξυπνου δικτύου και διασύνδεση μικροδικτύων με το κεντρικό σύστημα ισχύος (Πηγή: Khatib, 2014).

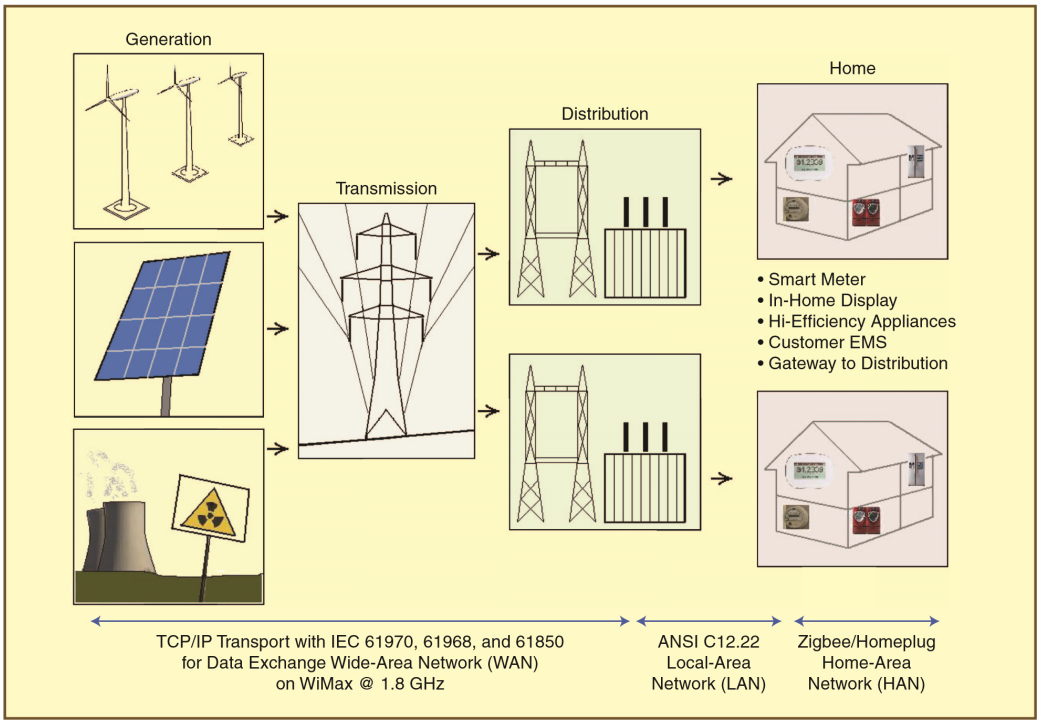
6.3. Πρότυπα έξυπνων δικτύων

Παρά τις διαβεβαιώσεις των παρόχων τεχνολογίας AMI, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αναμένουν ότι η μετάβαση από το AMI στο έξυπνο δίκτυο δεν θα είναι καθόλου ομαλή (Athanasiadis, 2025). Πολλοί πιστεύουν ότι σημαντικά προβλήματα θα εμφανιστούν όταν διαφορετικά συστήματα, λειτουργίες και εξαρτήματα αρχίσουν να ενσωματώνονται ως μέρος ενός κατανεμημένου συστήματος εντολών και ελέγχου (Parhizi et al., 2015). Τα περισσότερα από αυτά τα ζητήματα έχουν τις ρίζες τους στην απουσία καθολικά αποδεκτών διεπαφών, πρωτοκόλλων ανταλλαγής μηνυμάτων και ελέγχου και προτύπων που θα διασφάλιζαν ένα κοινό λεξιλόγιο επικοινωνίας μεταξύ των στοιχείων του συστήματος (Hatziargyriou et al., 2007). Υπάρχουν άλλοι που υποστηρίζουν ότι τα ισχύοντα πρότυπα θα συγκλίνουν και θα διευκολύνουν την ενσωμάτωση plug-and-play διαφόρων στοιχείων του συστήματος έξυπνων δικτύων. Παραδείγματα τέτοιων προτύπων είναι το ANSI C12.22 για έξυπνη μέτρηση και το IEC 61850 για αυτοματοποίηση υποσταθμών (CIGRÉ, 2018).

Επιπλέον, για την ανάπτυξη των απαιτούμενων προτύπων, η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας υιοθετεί σταδιακά διαφορετικές ορολογίες για τον διαχωρισμό των επιπέδων επικοινωνίας και ελέγχου του έξυπνου δικτύου (Bezas, 2024). Παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Οικιακό δίκτυο (HAN): Δίκτυο επικοινωνίας φορτίων, αισθητήρων και συσκευών πέρα από τον έξυπνο μετρητή και εντός των εγκαταστάσεων του πελάτη.
- Τοπικό δίκτυο (LAN): Δίκτυο ολοκληρωμένων έξυπνων μετρητών, στοιχείων δικτύου και πυλών, που συνδέει υποσταθμούς διανομής με τις εγκαταστάσεις ενός πελάτη.
- Δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN): Δίκτυο ανάντη στοιχείων κοινής ωφέλειας, όπως σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, κατανεμημένη αποθήκευση και υποσταθμοί (Ferrag et al., 2016).

Η διεπαφή μεταξύ των κόσμων WAN και LAN αποτελείται από πύλες υποσταθμών, ενώ η διεπαφή μεταξύ LAN και HAN παρέχεται από έξυπνους μετρητές. Η ασφάλεια και η ευπάθεια αυτών των διεπαφών θα αποτελέσουν το επίκεντρο πολλών τεχνολογικών και τυποποιημένων εξελίξεων στο εγγύς μέλλον (Hatziargyriou et al., 2007; CIGRÉ, 2018).



Σχήμα 13: Αναδυόμενα πρότυπα για το έξυπνο δίκτυο.

6.4. Αναδυόμενα πρότυπα έξυπνων δικτύων

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον κλάδο της ηλεκτρικής ενέργειας καταδεικνύουν την ανάγκη να προχωρήσουμε προς μια ευρεία συναίνεση σε ολόκληρο τον κλάδο σχετικά με μια σειρά προτύπων που θα επιτρέπουν τη διατερματική διοίκηση και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφόρων

στοιχείων του έξυπνου δικτύου (NIST, 2009; Palensky & Dietrich, 2011). Οι εστιασμένες προσπάθειες και η ηγεσία από το NIST (Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Ηνωμένων Πολιτειών) αποδίδουν καλά αποτελέσματα. Το πλαίσιο NIST και ο οδικός χάρτης για τα πρότυπα διαλειτουργικότητας έξυπνων δικτύων (έκδοση 1.0, Σεπτέμβριος 2009) προσδιορίζουν τους τομείς προτεραιότητας για τυποποίηση και έναν κατάλογο προτύπων που πρέπει να διορθωθούν, να αναπτυχθούν ή/και να εφαρμοστούν περαιτέρω (NIST, 2009). Παρόμοιες προσπάθειες στην Ευρώπη και αλλού υποδεικνύουν την ανάγκη ανάπτυξης ενός κοινού μοντέλου πληροφοριών (CIM) που θα επιτρέψει την κάθετη και οριζόντια ολοκλήρωση εφαρμογών και λειτουργιών εντός του έξυπνου δικτύου. Μεταξύ της λίστας των προτεινόμενων προτύπων, το IEC 61850 και τα συνδεδεμένα πρότυπά του αποδεικνύονται ως επικρατέστερα για την επικοινωνία δεδομένων WAN, υποστηρίζοντας TCP / IP, μεταξύ άλλων πρωτοκόλλων, μέσω fiber ή μιας μορφής του WiMax στα 1.8 GHz (IEC, 2018). Στη Βόρεια Αμερική, το ANSI C12.22, και τα σχετικά πρότυπά του, είναι το προτιμώμενο πρότυπο LAN, επιτρέποντας μια νέα γενιά έξυπνων μετρητών ικανών να επικοινωνούν με όμοιους κόμβους καθώς και με τις αντίστοιχες πύλες υποσταθμών σε μια ποικιλία ασύρματων τεχνολογιών (IEEE, 2015). Ομοίως, η πρόσφατα εκδοθείσα εντολή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για την ανάπτυξη του ευρωπαϊκού προτύπου AMI, το οποίο αντικαθιστά το παλαιό πρότυπο DLMS/ COSEM, τροφοδοτεί τις προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός ευρωπαϊκού αντίστοιχου προτύπου για το ANSI-C12.22 (CIGRÉ, 2018).

Η κατάσταση με τα HANs είναι λίγο πιο συγκεχυμένη, καθώς δεν έχει προκύψει σαφές επικρατέστερο πρότυπο μεταξύ των προτεινόμενων standards, αν και το ZigBee με το Smart Energy Profile φαίνεται να είναι ένας σαφής πρωτοπόρος. Αυτό μπορεί να οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι από τη μία πλευρά οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στη Βόρεια Αμερική αποφεύγουν να εγκαταστήσουν οτιδήποτε πέρα από τον έξυπνο μετρητή στις εγκαταστάσεις του πελάτη, ενώ από την άλλη πλευρά οι κατασκευαστές οικιακών συσκευών δεν έχουν δει ακόμη την ανάγκη να επιβαρύνουν τα προϊόντα τους με κάτι που θα έθετε σε κίνδυνο την ανταγωνιστική τους θέση σε αυτήν την ευαίσθητη στις τιμές αγορά εμπορευμάτων (Palensky & Dietrich, 2011). Ως εκ τούτου, οι προσδοκίες είναι ότι το βάρος για τη δημιουργία της δυναμικής τυποποίησης στην τεχνολογία HAN θα πέσει σε πρωτοβουλίες από τα ινστιτούτα καταναλωτών, τις τοπικές ή εθνικές νομοθετικές οντότητες ή / και στους ενδιαφερόμενους πολίτες.

Συνοπτικά, το μεγαλύτερο ζήτημα στη διαδικασία μετάβασης στο έξυπνο δίκτυο έγκειται στη σταδιακή ανάπτυξη ενός εξαιρετικά κατανεμημένου και έξυπνου συστήματος διαχείρισης με αρκετή ευελιξία και επεκτασιμότητα όχι μόνο για να διαχειριστεί την ανάπτυξη του συστήματος αλλά και για να είναι ανοιχτό στην υποδοχή συνεχώς μεταβαλλόμενων τεχνολογιών στις επικοινωνίες, την

πληροφορική και τα συστήματα ισχύος. Αυτό που θα εξασφάλιζε την ομαλή μετάβαση από την AMI στο έξυπνο δίκτυο θα ήταν η εμφάνιση εξαρτημάτων του συστήματος plug-and-play με ενσωματωμένη νοημοσύνη που θα μπορούσαν να λειτουργούν με διαφάνεια σε μια ποικιλία σεναρίων ενοποίησης και εμπιστοσύνης του συστήματος (Amin & Wollenberg, 2005). Η ενσωματωμένη νοημοσύνη που περικλείεται σε τέτοια συστατικά αναφέρεται συχνά με τον όρο ευφυής διεπαφή (Gungor et al., 2013).

6.5.Έρευνα, ανάπτυξη και επίδειξη έξυπνων δικτύων

Οι εταιρείες κοινής ωφέλειας έχουν πλήρη επίγνωση των δυσκολιών που συνεπάγεται η μετάβαση των υποδομών, των οργανισμών και των διαδικασιών τους προς ένα αβέβαιο μέλλον. Το γεγονός είναι ότι παρά τις δυνατότητες που υπόσχεται να αποδώσει το έξυπνο δίκτυο, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, ως πάροχοι μιας κρίσιμης υπηρεσίας, συνεχίζουν να θέτουν ως προτεραιότητα τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας των υπηρεσιών τους (Amin & Wollenberg, 2005). Δεδομένου του γεγονότος ότι οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας δεν μπορούν, και ίσως να μην τολμήσουν, να υιοθετήσουν νέες τεχνολογίες χωρίς εξαντλητική επικύρωση και προσδιορισμό, μπορεί κανείς εύκολα να δει ότι μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας σε όλο τον κόσμο είναι η απουσία ικανότητας R&D στον σχεδόν πραγματικό κόσμο για να τους επιτρέψει να αναπτύξουν, να επικυρώσουν και να χαρακτηρίσουν τεχνολογίες, εφαρμογές και λύσεις για τα προγράμματα έξυπνων δικτύων τους (Gungor et al., 2013; Fang et al., 2012).

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι περισσότεροι πάροχοι υπηρεσιών κοινής ωφέλειας δεν είναι η απουσία τεχνολογίας. Αντίθετα, πολλές διαφορετικές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί από τη βιομηχανία (π.χ. πρωτόκολλα επικοινωνίας, υπολογιστικές μηχανές, αισθητήρες, αλγόριθμοι και μοντέλα) για την αντιμετώπιση εφαρμογών κοινής ωφέλειας και την επίλυση πιθανών ζητημάτων εντός του έξυπνου δικτύου (Palensky & Dietrich, 2011). Το βασικό ζήτημα είναι ότι αυτές οι νέες τεχνολογίες δεν έχουν ακόμη ικανοποιήσει το πλαίσιο των επιθυμητών προδιαγραφών, συνθέσεων και αρχιτεκτονικής των παρόχων υπηρεσιών κοινής ωφέλειας. Λόγω της υψηλής ευαισθησίας των υποδομών και της ανάγκης για αξιόπιστη λειτουργία, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας δεν μπορούν να πειραματιστούν με νέες τεχνολογίες χωρίς κατάλληλη προετοιμασία και επικύρωση (Farhangi, 2010). Για το λόγο αυτό, απαιτείται ένα περιβάλλον σχεδόν πραγματικού κόσμου — όπως ένα έξυπνο μικροδίκτυο — που να περιλαμβάνει πραγματικά φορτία, εξοπλισμό διανομής και ποικιλία χαρακτηριστικών κατανάλωσης, προκειμένου να αναπτυχθούν, να δοκιμαστούν και να επικυρωθούν

οι απαιτούμενες λύσεις για τα έξυπνα δίκτυα (Lopes et al., 2006; Amin & Wollenberg, 2005). Η δημιουργία τέτοιων περιβαλλόντων επίδειξης και R&D επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αξιολογήσουν με ασφάλεια και ακρίβεια νέες τεχνολογίες, εξασφαλίζοντας ότι η μελλοντική ανάπτυξη του έξυπνου δικτύου θα είναι αξιόπιστη, ασφαλής και οικονομικά βιώσιμη (Fang et al., 2012).

6.6. Το μέλλον των έξυπνων δικτύων

Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε μια περίοδο ραγδαίων αλλαγών, με το αυξανόμενο κόστος ενέργειας, τη μαζική ηλεκτροδότηση της καθημερινής ζωής και την κλιματική αλλαγή να καθορίζουν την ταχύτητα και την έκταση του μετασχηματισμού (Farhangi, 2010; Gungor et al., 2013).

Ανεξάρτητα από το πόσο γρήγορα οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας υιοθετούν νέες έννοιες, τεχνολογίες και συστήματα έξυπνων δικτύων, υπάρχει ευρεία συναίνεση ότι η μετάβαση είναι αναπόφευκτη. Ο μετασχηματισμός αυτός επηρεάζει όχι μόνο τις επιχειρηματικές διαδικασίες αλλά και την οργανωτική δομή και τις τεχνολογικές υποδομές των παρόχων (Amin & Wollenberg, 2005; Lopes et al., 2006).

Ταυτόχρονα, πολλά ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως αναπτύσσουν τεχνολογίες επόμενης γενιάς για την υποστήριξη του έξυπνου δικτύου (Fang et al., 2012; Palensky & Dietrich, 2011). Κοινές προσπάθειες συνεργασίας μεταξύ παρόχων, εταιρειών διανομής (π.χ. ΔΕΔΔΗΕ), πανεπιστημίων, ευρωπαϊκών οργανισμών και επιχειρηματικών ενώσεων δημιουργούν το απαραίτητο περιβάλλον για τη σταδιακή ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων (Gungor et al., 2013; Farhangi, 2010).

Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα προγράμματα και οι υποδομές επίδειξης, τα οποία επιτρέπουν τη δοκιμή, την επικύρωση και την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και στρατηγικών, όπως η διαχείριση ζήτησης (DSM), τα έξυπνα μικροδίκτυα και οι προηγμένες υποδομές μέτρησης (AMI) (Palensky & Dietrich, 2011; Lopes et al., 2006). Αυτές οι πρωτοβουλίες επιτρέπουν στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να σχεδιάσουν το μέλλον των έξυπνων δικτύων με ασφάλεια, ευελιξία και οικονομική βιωσιμότητα, ενσωματώνοντας σταδιακά τεχνολογίες plug-and-play και έξυπνες διεπαφές για τη βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων (Fang et al., 2012).

CROSSBOW

Το έργο CROSSBOW θα προτείνει την από κοινού χρήση των πόρων, ώστε να προωθηθεί η διασυνοριακή διαχείριση των μεταβλητών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και των μονάδων αποθήκευσης, καθιστώντας δυνατή τη μεγαλύτερη διείσδυσή τους, μειώνοντας τα λειτουργικά έξοδα του δικτύου και βελτιώνοντας τα οικονομικά τους πλεονεκτήματά.

ERIGrid

Το έργο ERIGrid επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός προηγμένου συστήματος επικύρωσης των μεθόδων που σχετίζονται με τα έξυπνα δίκτυα ενέργειας.

GRIDSOL

Το GRIDSOL έχει σαν στόχο του την επίτευξη μιας σύνθεσης σταθμού με υψηλή συμμετοχή ΑΠΕ, με το κατάλληλο σύστημα αποθήκευσης και το κατάλληλο σύστημα διαχείρισης, ο οποίος θα επιφέρει μια τεχνοοικονομικά βέλτιστη και σκόπιμη λύση.

iDistributedPV

Ο κύριος στόχος του iDistributedPV είναι να προτείνει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων για να ενισχυθεί η υψηλή διείσδυση της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής (Φ/Β) παραγωγής (π.χ. σε οικίες/μεγαλύτερα κτήρια/περιοχές πάρκων) με ασφαλή τρόπο και σύμφωνα με τα κριτήρια της αγοράς.

SHAR-Q

Τα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητα συστατικά ενός μελλοντικού έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με σημαντική διείσδυση μη ελεγχόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Δεδομένου ότι το μοναδιαίο κόστος ενέργειας από αποθήκευση είναι πολλαπλάσιο του αντίστοιχου κόστους ενέργειας που καταναλώνεται άμεσα μετά την παραγωγή από παραγωγή των ΑΠΕ, αποκτά ιδιαίτερη σημασία η βελτιστοποίηση της χωρητικότητας αποθήκευσης που εγκαθίσταται στο δίκτυο.

WiseGrid

Στο έργο WisGRID ενσωματώνονται, επιδεικνύονται προηγμένα συστήματα και υπηρεσίες τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ΤΠΕ) σε δίκτυα διανομής ενέργειας ώστε να μετεξελιχθούν σε ασφαλή, βιώσιμα και ευέλικτα έξυπνα δίκτυα και προσδίδοντας περισσότερη δύναμη στον Ευρωπαίο καταναλωτή ενέργειας.

SmarterEMC2

Το έργο SmarterEMC2 υλοποιεί εργαλεία ΤΠΕ που υποστηρίζουν την συμμετοχή των καταναλωτών μέσω των υπηρεσιών ανταπόκρισης στη ζήτηση (Demand Response- DR) και την ενσωμάτωση της διεσπαρμένης παραγωγής και των ΑΠΕ μέσω εικονικών εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής (Virtual Power Plants – VPP).

TILOS

Ο κύριος στόχος του προγράμματος TILOS είναι η ανάπτυξη και λειτουργία ενός πρωτότυπου συστήματος συσσωρευτών στο νησί της Τήλου, το οποίο θα βασίζεται σε συσσωρευτές NaNiCl2 της εταιρείας FIAMM, εφοδιασμένο με σύστημα βέλτιστου έλεγχου για λειτουργία σε πραγματικό περιβάλλον έξυπνου δικτύου με στόχο την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων:

DREAM

Το έργο DREAM θα θέσει τα θεμέλια για μια νέα προσέγγιση ιεραρχικά αποκεντρωμένης διαχείρισης πολύπλοκων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας νέους μηχανισμούς για τη συμμετοχή των καταναλωτών στην οικονομική και οικολογική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και της σταθερής και οικονομικά αποτελεσματικής ένταξης της διεσπαρμένης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

VIMSEN

Οι επιδοτούμενες πολιτικές τιμολόγησης με σταθερή τιμή αποζημίωσης (feed-in tariffs) που έχουν υιοθετηθεί πρόσφατα για την επιτάχυνση των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δε μπορεί να παραμείνουν σαν ένα διατηρήσιμο επιχειρηματικό μοντέλο για το μέλλον του έξυπνου δικτύου ενέργειας. Και αυτό κυρίως γιατί τέτοιες πολιτικές αυξάνουν το κόστος ενέργειας, ειδικά όταν η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται από

ανανεώσιμες πηγές δεν είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή που παράγεται από παραδοσιακές πηγές, όπως αναμένεται να συμβαίνει στο κοντινό μέλλον.

IGREENGrid

Το έργο IGREENGrid επικεντρώνεται στην αύξηση της δυνατότητας διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στα δικτύα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να διακυβεύεται η αξιοπιστία του δικτύου ή να θέτεται σε κίνδυνο η ποιότητα της τροφοδοσίας.

SINGULAR

Βασικός σκοπός του έργου SINGULAR είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων της ενσωμάτωσης μεγάλης κλίμακας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των νησιωτικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, προτείνοντας παράλληλα διάφορα αποτελεσματικά μέτρα, λύσεις και εργαλεία προγραμματισμού για την ανάπτυξη ενός αειφόρου και έξυπνου δικτύου.

SMARTKYE

Το SmartKYE έχει ως βασικό στόχο την ανάπτυξη ενός προηγμένου συστήματος διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση και αποτελεσματικότερη χρήση ενεργειακών πόρων σε κατοικημένες περιοχές.

SUSTAINABLE

Το έργο SUSTAINABLE θα αναπτύξει και θα επιδείξει ένα νέο πρότυπο λειτουργίας, αξιοποιώντας

πληροφορίες από έξυπνους μετρητές και βραχυπρόθεσμες τοπικές προβλέψεις με σκοπό τη διαχείριση των συστημάτων διανομής με ένα πιο αποτελεσματικό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

7. Γιατί τα δημοτικά κτίρια ενδείκνυνται για υλοποίηση έξυπνων δικτύων

Η ευρεία εφαρμογή έξυπνων δικτύων στα δημοτικά κτίρια αποδεικνύεται ιδιαίτερα κατάλληλη λόγω μιας σειράς παραγόντων που δυσχεραίνουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας από μικρότερους τελικούς καταναλωτές ή ιδιωτικές ιδιοκτησίες (Gungor et al., 2013; Farhangi, 2010):

- Η αργή υιοθέτηση των έξυπνων δικτύων από τους υπόλοιπους σημαντικούς παράγοντες της αλυσίδας παραγωγής-κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η απουσία καθιερωμένων προτύπων από τους κύριους συντελεστές του δικτύου και, κυρίως, από τους κατασκευαστές έξυπνων συσκευών και διεπαφών.
- Η απουσία προτύπων επηρεάζει το κόστος κτήσης νέων έξυπνων συσκευών και δυσκολεύει τον υπολογισμό της απόσβεσης της επένδυσης.
- Η περιορισμένη δυνατότητα εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα μεγάλα αστικά κέντρα, ειδικά για μικροϊδιοκτήτες (Palensky & Dietrich, 2011).

Στις αστικές και περι-αστικές περιοχές, η κυρίαρχη ανανεώσιμη πηγή που μπορεί να εγκατασταθεί στα κτίρια είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αντίθετα με τις μικρές ιδιωτικές ιδιοκτησίες, η υλοποίηση έξυπνων δικτύων σε δημόσια κτίρια είναι πιο εφικτή και προσφέρει μεγαλύτερη αξία (Lopes et al., 2006; Amin & Wollenberg, 2005). Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής έξυπνων δικτύων σε δημόσια κτίρια περιλαμβάνουν:

- Διαθεσιμότητα μεγάλων επιφανειών στέγης για φωτοβολταϊκές διατάξεις, ικανές να καλύψουν μέρος των ενεργειακών αναγκών (Farhangi, 2010), όπως είναι τα σχολικά συγκροτήματα, τα αθλητικά στάδια κ.ά.
- Υφιστάμενος στόλος οχημάτων που μπορεί να αντικατασταθεί με ηλεκτρικά αυτοκίνητα, λειτουργώντας ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας και εξομάλυνσης αιχμών ζήτησης (Gungor et al., 2013).
- Κτίρια καθορισμένων δραστηριοτήτων με προβλέψιμη χρήση και επίσης προβλέψιμη κατανάλωση ενέργειας.
- Κεντρική διαχείριση μεγάλου αριθμού κτιρίων, προσφέροντας διαφάνεια και ευκολία στην παρακολούθηση και συντήρηση.
- Οικονομίες κλίμακας μέσω της συγκεντρωτικής διοίκησης και εφαρμογής τεχνολογιών έξυπνων δικτύων (Palensky & Dietrich, 2011).

Συνολικά, τα δημόσια κτίρια παρέχουν ένα ιδανικό περιβάλλον για την πιλοτική εφαρμογή, ανάπτυξη και επίδειξη τεχνολογιών έξυπνων δικτύων, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και τη σταδιακή διείσδυση της τεχνολογίας στο αστικό τοπίο (Fang et al., 2012).

8. Σενάριο δημιουργίας έξυπνου δικτύου στις κτιριακές και άλλες υποδομές του Δήμου Ηρακλείου

Η ανάπτυξη ενός έξυπνου δικτύου στις υποδομές του Δήμου Ηρακλείου επικεντρώνεται σε περιορισμένο αριθμό παραγόντων λόγω των αντικειμενικών περιορισμών και της τρέχουσας δυνατότητας των δεδομένων (Farhangi, 2010; Lopes et al., 2006). Οι τομείς στους οποίους μπορούν να αποδοθούν τα οφέλη του έξυπνου δικτύου περιορίζονται κυρίως σε:

- Έξυπνους μετρητές και συστήματα παρακολούθησης.
- Ομαδοποίηση πολλών καταναλωτών, δηλαδή διαφορετικών κτιρίων.
- Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Μία από τις βασικές σκοπιμότητες δημιουργίας έξυπνου δικτύου είναι η υλοποίηση γεωγραφικά κατανεμημένου συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Amin & Wollenberg, 2005). Στο μικροδίκτυο, το μικρότερο κύτταρο ενός έξυπνου δικτύου, απαιτείται η παρουσία τουλάχιστον ενός καταναλωτή ο οποίος θα κατείχε έστω μία μονάδα παραγωγής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και ενδεχομένως και μία μονάδα αποθήκευσης (Palensky & Dietrich, 2011).

Η παρούσα μελέτη αφορά στην εξέταση ενός έξυπνου μικροδικτύου στο οποίο θα συμμετέχουν τουλάχιστον δυο κτίρια του Δήμου Ηρακλείου. Επιλέχθηκαν τα κτίρια, το Δημαρχείο της Loggia και το Παγκρήτιο Στάδιο, επειδή ενώ γενικά υπάρχει αδυναμία εύρεσης των απαραίτητων δεδομένων, ωστόσο όμως για τις δυο αυτές κτιριακές υποδομές του δήμου υπάρχουν σχετικές μελέτες με αρκετά δεδομένα. Σε αυτά έχουν γίνει ήδη μελέτες οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί από την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων και από την εγκατάσταση συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης και φωτοβολταϊκών συστοιχιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, και στα δυο κτίρια υπάρχουν περιορισμοί στην έκταση κάλυψης των διαθέσιμων επιφανειών με φωτοβολταϊκά, στο μεν ένα της Loggia λόγω της ιστορικής σημασίας του κτιρίου, στο δε άλλο του Παγκρητίου λόγω οικονομικών περιορισμών της προκήρυξης του έργου αναβάθμισης, αλλά και λόγω του νομοθετημένου ορίου των 300kW ανά εγκατάσταση που μπορεί να δεχτεί για το σύστημα net-metering η ΔΕΗ (Fang et al., 2012; Gungor et al., 2013). Εκτός αυτών, σε καμία μελέτη δεν προβλέπονται αποθηκευτικές διατάξεις, στοιχείο απαραίτητο για τη δημιουργία μικροδικτύου.

Τα παραπάνω αντικειμενικά στοιχεία, δηλαδή οι νομοθετικοί περιορισμοί από τη ΔΕΗ του ενεργειακού κυκλώματος και των περιορισμένων οικονομικών, είναι ενδεικτικά για τις δυσκολίες που υπάρχουν για τη δημιουργία του έξυπνου δικτύου.

Παρόλα αυτά και στα πλαίσια της μελέτης μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι στο έξυπνο δίκτυο μπορούν να περιληφθούν δημοτικά κτίρια (σχολικά συγκροτήματα) που έχουν την δυνατότητα να δεχθούν έστω και την περιορισμένη παραγωγή των 300kW, πολλή από την οποία θα είναι πλεονάζουσα των πραγματικών επί μέρους ενεργειακών απαιτήσεων και η οποία θα μπορεί να αποδοθεί στα υπόλοιπα κτίρια. Επειδή, όμως, δεν μπορεί να εννοηθεί μικροδίκτυο χωρίς την ύπαρξη κάποιας μορφής αποθήκευσης ενέργειας, ένα μέρος του στόλου των αυτοκινήτων που ανήκουν στον Δήμο, θα αντικατασταθούν με ηλεκτρικά αυτοκίνητα, η φόρτιση των οποίων θα γίνεται σε χρόνους που θα εξυπηρετούν το διευρυμένο έξυπνο δίκτυο των κτιρίων και οι συσσωρευτές των οποίων θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το δίκτυο για να καλυφθούν έξυπνα οι αιχμές παραγωγής και οι αιχμές απαίτησης του δικτύου στο σύνολό του (Lopes et al., 2006; Amin & Wollenberg, 2005).

Με αυτόν τον τρόπο, πέρα από την εξοικονόμηση που προκύπτει από τις μεμονωμένες παρεμβάσεις στα κτίρια, τα οφέλη από το έξυπνο δίκτυο μπορούν να προκύψουν μέσω της ενσωμάτωσης:

- Έξυπνων μετρητών και ελεγκτών.
- Επικοινωνιακών διατάξεων και πληροφοριακών συστημάτων.
- Λογισμικών διαχείρισης και συντονισμού.
- Ρεαλιστικού στόλου ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως κινητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

Η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά για το Παγκρήτιο στάδιο και η καταναλισκόμενη ενέργεια του σταδίου μπορούν να απεικονιστούν σε ένα γράφημα, ώστε να αποτυπωθεί η δυναμική του μικροδικτύου σε πραγματικές συνθήκες (Farhangi, 2010; Fang et al., 2012).

8.1. Ενεργειακή απόδοση έξυπνου δικτύου για τον Δήμο Ηρακλείου

Η ενεργειακή απόδοση ενός έξυπνου δικτύου (smart grid) στον Δήμο Ηρακλείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του συστήματος να παρακολουθεί, να διαχειρίζεται και να βελτιστοποιεί τη χρήση ενέργειας, τόσο σε επίπεδο κτιριακών υποδομών όσο και σε επίπεδο διασυνδεδεμένων μικροδικτύων (Farhangi, 2010). Στο πλαίσιο λειτουργίας του Δήμου, η ανάπτυξη ενός έξυπνου δικτύου στοχεύει κυρίως στη μείωση των ενεργειακών απωλειών, στην ενίσχυση της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη βελτιωμένη διαχείριση των αιχμών κατανάλωσης.

1. Παρακολούθηση και διαχείριση κατανάλωσης

Η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε δημοτικά κτίρια, όπως το Δημαρχείο της Loggia και το Παγκρήτιο Στάδιο, επιτρέπει τη συνεχή συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως κατανάλωση, τάση, ένταση ρεύματος και φορτίο (Palensky & Dietrich, 2011). Η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων καθιστά δυνατή:

• Τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής χρήσης με βάση τις πραγματικές ανάγκες των κτιρίων.

• Την εφαρμογή δυναμικών τιμολογίων και στρατηγικών προγραμματισμού φορτίου, με στόχο τη μείωση των αιχμών ζήτησης (Amin & Wollenberg, 2005).

• Την ενσωμάτωση προηγμένων συστημάτων πρόβλεψης και αυτορρύθμισης, που συμβάλλουν στον περιορισμό της ενεργειακής σπατάλης και στη μείωση της εξάρτησης από μη ανανεώσιμες πηγές (Fang et al., 2012).

2. Αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η ενεργειακή απόδοση του έξυπνου δικτύου ενισχύεται σημαντικά μέσω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στα δημοτικά κτίρια. Εκτεταμένες επιφάνειες, όπως αυτές σχολικών συγκροτημάτων και αθλητικών εγκαταστάσεων, προσφέρονται για την εγκατάσταση Φ/Β, οδηγώντας σε:

• Μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και περιορισμό των απωλειών μεταφοράς ενέργειας.

• Αξιοποίηση της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας μέσω μικροδικτύων ή συστημάτων αποθήκευσης (Bessa et al., 2013).

• Συμβολή στη μείωση των εκπομπών CO_2 και στην επίτευξη στόχων βιώσιμης ανάπτυξης.

Η συνδυασμένη χρήση φωτοβολταϊκών και συστημάτων αποθήκευσης, είτε σταθερών είτε μέσω ηλεκτρικών οχημάτων του Δήμου, δημιουργεί ένα ευέλικτο ενεργειακό περιβάλλον όπου οι διακυμάνσεις μεταξύ παραγωγής και ζήτησης εξομαλύνονται, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος (Lopes et al., 2006).

3. Έξυπνη διαχείριση φόρτου

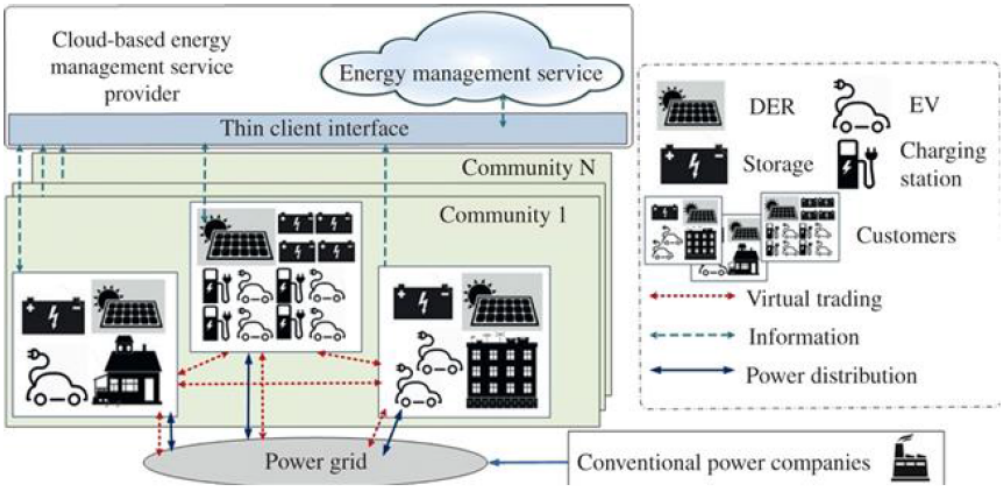
Η εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης φόρτου επιτρέπει στον Δήμο να ελέγχει την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων βάσει:

• Των λειτουργικών προτεραιοτήτων (π.χ. ωράρια σχολείων ή αθλητικών εγκαταστάσεων).

• Των προβλεπόμενων ενεργειακών αναγκών και της διαθεσιμότητας παραγωγής.

• Της δυναμικής κατανομής ενέργειας μεταξύ διαφορετικών υποδομών, με στόχο τη μείωση του κόστους και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης (Amin & Wollenberg, 2005; Farhangi, 2010).

Μέσω αυτών των μηχανισμών, καθίσταται δυνατή η μεταφορά πλεονάζουσας ενέργειας από κτίρια με υψηλή παραγωγή σε άλλα με αυξημένη ζήτηση, αξιοποιώντας παράλληλα τις δυνατότητες αποθήκευσης που παρέχουν τα ηλεκτρικά οχήματα και οι σταθερές μπαταρίες.



Σχήμα 14: Εκτεταμένο πλαίσιο για τη φόρτιση και την εκφόρτιση

4. Προβλεπόμενα οφέλη ενεργειακής απόδοσης

Με βάση τις εκτιμήσεις για βασικές δημοτικές υποδομές, όπως το Δημαρχείο της Loggia και το Παγκρήτιο Στάδιο, η εφαρμογή ενός έξυπνου μικροδικτύου αναμένεται να επιφέρει:

• Μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης κατά 15–25%, μέσω βελτιωμένης παρακολούθησης και διαχείρισης φορτίου (Palensky & Dietrich, 2011).

• Αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά 30–40%, μέσω της αποτελεσματικής ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών και αποθηκευτικών τεχνολογιών.

• Βελτίωση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας του ενεργειακού συστήματος, μειώνοντας την ανάγκη για δαπανηρή κάλυψη αιχμών από το κεντρικό δίκτυο (Lopes et al., 2006).

5. Συμπεράσματα

Η ενεργειακή απόδοση του έξυπνου δικτύου στον Δήμο Ηρακλείου εξαρτάται από τη συνδυασμένη και ολοκληρωμένη αξιοποίηση:

• Έξυπνων μετρητών και αισθητήρων για την παρακολούθηση της κατανάλωσης.

• Φωτοβολταϊκών συστημάτων και τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.

• Στρατηγικών διαχείρισης φορτίου και ευέλικτης κατανομής ενέργειας μεταξύ υποδομών.

• Κινητών και σταθερών μονάδων αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η ορθή εφαρμογή των παραπάνω μέτρων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του Δήμου, μειώνοντας το ενεργειακό κόστος, τις απώλειες και τις εκπομπές CO_2, ενώ παράλληλα δημιουργεί τις προϋποθέσεις για μελλοντική επέκταση και διασύνδεση επιπλέον δημοτικών υποδομών.

9. Συμπεράσματα

Η στρατηγική ανάπτυξης ενός έξυπνου ενεργειακού δικτύου στον Δήμο Ηρακλείου εστιάζει στη συστηματική συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων, την ψηφιοποίηση των υποδομών και τη συνδυασμένη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τεχνολογίες αποθήκευσης. Στο πλαίσιο του έργου «Ελληνικές έξυπνες πόλεις – Επενδύσεις σε υποδομές και συστήματα SSC για ένα βιώσιμο και πράσινο αστικό μέλλον», το οποίο χρηματοδοτείται από το Εθνικό Σχέδιο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» και το πρόγραμμα NextGeneration EU, προβλέπεται η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού οικοσυστήματος για τις δημοτικές υπηρεσίες. Κύριος στόχος είναι η ενίσχυση της βιωσιμότητας, η αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των πολιτών και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Το έργο περιλαμβάνει δώδεκα βασικές δράσεις, μεταξύ των οποίων:

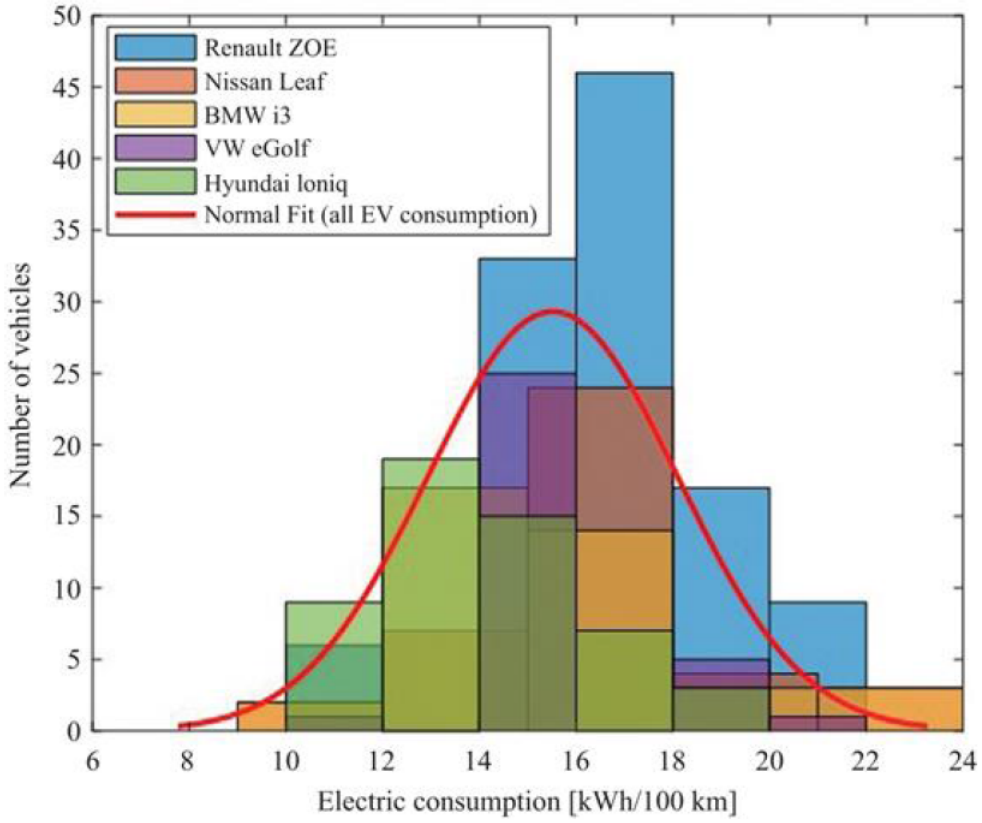
1. Η ανάπτυξη έξυπνων κτιριακών υποδομών και η παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε 30 δημοτικά κτίρια, μέσω αισθητήρων IoT, έξυπνων μετρητών και συστημάτων ανάλυσης δεδομένων.
2. Η προώθηση της βιώσιμης αστικής κινητικότητας, με την εγκατάσταση έξυπνων στάσεων λεωφορείων, αισθητήρων κυκλοφορίας, έξυπνων διαβάσεων πεζών και συστημάτων διαχείρισης στάθμευσης.
3. Η ενίσχυση της ψηφιακής διακυβέρνησης και της κοινωνικής συμμετοχής, μέσω της παροχής 120 ψηφιακών υπηρεσιών προς πολίτες και επιχειρήσεις, της εγκατάστασης πολυλειτουργικών σταθμών επικοινωνίας και της ανάπτυξης υπηρεσιών τηλεϊατρικής για ευάλωτες ομάδες.
4. Η εφαρμογή συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων τύπου PAY-AS-YOU-THROW, με χρήση έξυπνων κάδων που επιτρέπουν την αναγνώριση και ελεγχόμενη πρόσβαση για μεγάλους παραγωγούς αποβλήτων.
5. Η εγκατάσταση δικτύου LoRaWAN για τη διασύνδεση αισθητήρων IoT και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Σε επίπεδο μικροδικτύου, βασικές δημοτικές εγκαταστάσεις, όπως το Δημαρχείο της Loggia και το Παγκρήτιο Στάδιο, προβλέπεται να εξοπλιστούν με:

- Φωτοβολταϊκά συστήματα σε διαθέσιμες επιφάνειες στέγης, σε συνδυασμό με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας.
- Ηλεκτρικά οχήματα του Δήμου, τα οποία θα λειτουργούν ως κινητές μονάδες αποθήκευσης (vehicle-to-grid).

- Έξυπνα συστήματα μέτρησης και λογισμικό διαχείρισης για τη βελτιστοποίηση της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση της πλεονάζουσας ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης φορτίου, θέτοντας τις βάσεις για τη σταδιακή επέκταση του έξυπνου ενεργειακού δικτύου σε ολόκληρο τον αστικό ιστό.



Σχήμα 15: Ηλεκτρική κατανάλωση για διαφορετικά μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων

10.Μελλοντικές βελτιώσεις της έρευνας

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στις δημοτικές υποδομές του Δήμου Ηρακλείου, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελλοντική επέκταση και αναβάθμιση των υφιστάμενων λειτουργιών, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας, της βιωσιμότητας και της αξιοποίησης των διαθέσιμων τεχνολογιών. Η περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί μέσα από μια σειρά στοχευμένων παρεμβάσεων που ενισχύουν τη διασυνδεσιμότητα, την καινοτομία και τη συμμετοχική διακυβέρνηση.

1. Επέκταση μικροδικτύων

Η σταδιακή ενσωμάτωση περισσότερων δημοτικών κτιρίων, σχολικών μονάδων και λοιπών δημόσιων υποδομών στο υφιστάμενο δίκτυο μικροδικτύων αποτελεί βασική προτεραιότητα. Μέσω αυτής της επέκτασης καθίσταται δυνατή η πλήρης αξιοποίηση της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, καθώς και η βελτιστοποίηση της ενεργειακής ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Παράλληλα, ενισχύεται η ενεργειακή αυτονομία των επιμέρους εγκαταστάσεων και δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για τη λειτουργία ενεργειακών κοινοτήτων σε τοπικό επίπεδο.

2. Ανάπτυξη πλατφορμών IoT και open data

Η δημιουργία ολοκληρωμένων πλατφορμών Internet of Things (IoT) και ανοικτών δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργία ενός έξυπνου δικτύου. Μέσω της συνεχούς συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ο Δήμος μπορεί να παρακολουθεί ενεργειακές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Επιπλέον, η διάθεση ανοικτών δεδομένων ενισχύει τη διαφάνεια, προάγει την καινοτομία και δίνει τη δυνατότητα σε τρίτους φορείς και επιχειρήσεις να αναπτύξουν νέες εφαρμογές και υπηρεσίες (Heraklion Smart City, 2025).

3. Συνέργειες με ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια

Η συνεργασία με ακαδημαϊκά ιδρύματα και ερευνητικά κέντρα μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων στον τομέα της ενέργειας. Μέσα από πιλοτικές εφαρμογές, όπως έξυπνοι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, προηγμένα συστήματα διαχείρισης αιχμών ζήτησης και νέες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, ο Δήμος μπορεί να δοκιμάσει και να υιοθετήσει βέλτιστες πρακτικές. Παράλληλα, ενισχύεται η μεταφορά τεχνογνωσίας και η συμμετοχή σε ερευνητικά προγράμματα με ευρωπαϊκή χρηματοδότηση.

4. Σύνδεση με ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες

Η ενεργή συμμετοχή του Δήμου σε ευρωπαϊκά δίκτυα και πρωτοβουλίες, όπως το Net Zero Cities και το Covenant of Mayors, συμβάλλει ουσιαστικά στην ανταλλαγή εμπειριών, τεχνογνωσίας και καλών

πρακτικών. Μέσω αυτών των συνεργασιών, ο Δήμος αποκτά πρόσβαση σε χρηματοδοτικά εργαλεία, τεχνική υποστήριξη και καινοτόμες λύσεις που επιταχύνουν τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο και κλιματικά ουδέτερο αστικό περιβάλλον (EU Covenant of Mayors, 2026).

5. Οπτικοποίηση και αναφορά δεδομένων

Η ανάπτυξη συστημάτων οπτικοποίησης δεδομένων (dashboards) για πολίτες και δημοτικές υπηρεσίες αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ενίσχυση της διαφάνειας και της συμμετοχικής διακυβέρνησης. Μέσω διαδραστικών εφαρμογών, οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, την παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό όχι μόνο ενισχύει την ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών, αλλά προάγει και την ενεργή συμμετοχή τους στη λήψη αποφάσεων (Smart Cities Marketplace, 2025).

Συνολικά, η υλοποίηση των παραπάνω δράσεων αναμένεται να επιτρέψει στον Δήμο Ηρακλείου να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες ενός έξυπνου ενεργειακού δικτύου. Μέσα από την ορθολογική διαχείριση των ενεργειακών πόρων, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την ενίσχυση της καινοτομίας, ο Δήμος μπορεί να εξελιχθεί σε πρότυπο βιώσιμης, ψηφιακής και πράσινης αστικής ανάπτυξης, τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Βιβλιογραφία

Ackermann T, Andersson G, Söder L. Distributed generation: A definition. Electric Power Systems Research. 2001;57(3):195-204.

AHAM (Association of Home Appliance Manufacturers). Definition of Smart Appliances. 2015. Available from: https://www.aham.org

Albadi MH, El-Saadany EF. A summary of demand response in electricity markets. Electric Power Systems Research. 2008;78(11):1989–1996.

Amin M, Wollenberg B. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. IEEE Power and Energy Magazine. 2005;3(5):34–41.

Amin SM. Security challenges for the electric infrastructure. IEEE Computer Applications in Power. 2000;13(4):20–25.

Arteconi A, Hewitt NJ, Polonara F. Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage. Applied Thermal Engineering. 2013;51(1-2):155-165.

Athanasiadis C. Advanced Metering Infrastructure and smart meters enabling smart grid functionality. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Μεταπτυχιακή Διατριβή. 2025.

Ayoade IA, Longe OM. A Comprehensive Review on Smart Electromobility Charging Infrastructure. World Electric Vehicle Journal. 2024;15(7):286. doi:10.3390/wevj15070286.

Barouksi S. Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο (Smart Grid). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Μεταπτυχιακή Διατριβή. 2023.

Beaudin M, Zareipour H. Home energy management systems: A review of modelling and complexity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;45:318-335.

Bezas K, Tsiridis M, Filippidou F. A review to smart grids. The Indonesian Journal of Computer Science. 2024;13(1).

Bulhões T, Hà MH, Martinelli R, Vidal T. The Vehicle Routing Problem with Service Level Constraints. arXiv [Internet]. 2017 Jun 9 [cited 2026 Feb 26]; Preprint. Available from: https://arxiv.org/abs/1706.03097

Chadha S. A review on Smart Charging impacts of Electric Vehicles on Grid. Materials Today: Proceedings. 2022.

CIGRÉ Study Committee C6. Microgrids and Active Distribution Systems. Technical Brochure 2018.

da Costa VBF, et al. Electricity Markets in the Context of Distributed Energy Resources and Demand Response Programs: Main Developments and Challenges. Energies. 2022;15(20):7784.

Denholm P, Ela E, Kirby B, Milligan M. The role of energy storage with renewable electricity generation. National Renewable Energy Laboratory Report. 2010.

Eid C, Guillén JR, Marín PF, Hakvoort RA. The economic effect of electricity net-metering with solar PV: Consequences for network cost recovery, cross subsidies and policy objectives. Energy Policy. 2014;75:244-254.

EU Covenant of Mayors (2026). From Idea to Action: Tiered tailored support for climate and energy planning.

European Commission (2025). Smart cities – European Commission; New challenges and integrated digital solutions for sustainable urban transformation.

European Commission (2026). Energy and Smart Cities – EU policy for clean energy transition.

European Commission. Greek Smart Cities – Heraklion [Internet]. European Commission; [cited 2026 Feb 26]. Available from: https://commission.europa.eu/projects/greek-smart-cities-heraklion_en

European Commission. Recovery and Resilience Facility [Internet]. European Commission; 2025 [cited 2026 Feb 26]. Available from: https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_en

Fang X, Misra S, Xue G, Yang D. Smart grid – The new and improved power grid: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2012;14(4):944–980.

Farhangi H. The path of the smart grid. IEEE Power and Energy Magazine. 2010;8(1):18–28.

Federal Energy Regulatory Commission (FERC). Definition of Demand Response. In: Demand *Response* [Internet]. 2009 [cited 2026 Feb 26]. Available from: https://ferc.gov/demand-response.

Ferrag MA, Maglaras LA, Janicke H, Jiang J. A survey on privacy-preserving schemes for smart grid communications. arXiv. 2016.

Fong MWL. Technology Leapfrogging for Developing Countries. IGI Global; 2009. Available from: https://journalistsresource.org/wp-content/uploads/2013/04/Technology-Leapfrogging-for-Developing-Countries.pdf

Gerschenkron A. Economic Backwardness in Historical Perspective: A Book of Essays. Cambridge, MA: Harvard University Press; 1962.

Gungor VC, Sahin D, Kocak T, Ergut S, Buccella C, Cecati C, et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013;7(4):529–539.

Gungor VC, Sahin D, Kocak T, et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013;7(4):529–539.

Habibu MA, Sivakumar S, Kanagachidambaresan GR, et al. An effective IoT-based demand response for energy-efficient smart homes. Energy Informatics. 2025;8:125. (link.springer.com)

Hatziargyriou N, Asano H, Iravani R, Marnay C. Microgrids. An overview of ongoing research, development, and demonstration projects. IEEE Power & Energy Magazine. 2007;5(4):78–94.

IEC. IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations. International Electrotechnical Commission, 2018.

IEEE. IEEE Std C12.22 – Protocol Specification for Interfacing with Smart Meters. IEEE, 2015.

International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2014: Analysis and Outlook. Paris: IEA; 2014.

International Energy Agency (IEA). Renewables 2022: Analysis and Forecast to 2027. Paris: IEA; 2022.

Iqbal S, Sarfraz M, Ayyub M, et al. A Comprehensive Review on Residential Demand Side Management Strategies in Smart Grid Environment. Sustainability. 2021;13(13):7170. doi:10.3390/su13137170.

Kok K, et al. Distributed Energy Resources and Demand Side Management in Smart Grids. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011;15(9):4716–4727.

Kundur P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill; 1994.

Lampropoulos A, et al. A systematic review of demand-side management strategies in power systems of developed and developing countries. Energies. 2023;15(21):7858.

Lasseter R. Microgrids. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2011;1–5.

Li R, Dane G, Finck C, Zeiler W. Demand side management of heat pump systems in residential buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;71:342-358.

Lopes JA, Moreira CL, Madureira AG. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Transactions on Power Systems. 2006;21(2):916–924.

operation. IEEE Transactions on Power Systems. 2006;21(2):916–924.

Lund H, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;45:785-807.

Masters G. Demand Side Management and Demand Response. New York: Wiley; 2004.

NIST. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0. National Institute of Standards and Technology, 2009.

Nutkani I. Impact of EV charging on electrical distribution network: A focused review. IET Research. 2024.

Openarchives.gr. Smart grid systems and their characteristics. Openarchives Smart grid overview. [n.d.].

Palensky P, Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2011;7(3):381–388.

Parhizi S, Lotfi H, Khodaei A, Bahramirad S. State of the Art in Research on Microgrids: A Review. IEEE Access. 2015;3:890–925.

Ponds KT, et al. Aggregator of Demand Response for Renewable Integration and Customer Engagement: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. Energies. 2018;11(9):2391.

REN21. Renewables 2023 Global Status Report. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century; 2023.

Reynders G, Diriken J, Saelens D. Generic characterization method for energy flexibility: Applied to structural thermal storage in residential buildings. Applied Energy. 2017;198:192-202.

Role of Plug-in Electric Vehicles in Grid Management Services. Ark Dev, Kumar V, Prakash V, eds. CRC Press; 2026.

Said S, Schott B, El Gohary H, et al. Recent advancement in demand side energy management system for optimal energy utilization. Energy Reports. 2024. (sciencedirect.com)

Samadi P, Mohsenian-Rad H, Wong VWS, Schober R. Demand-side management for smart grid: opportunities and challenges. In: Smart Grid Communications and Networking. Cambridge: Cambridge University Press; 2013.

Siano P. Demand response and smart grids—A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;30:461-478.

Smart Cities Marketplace (2025). Investing in a Sustainable and Green Urban Future. European Commission Platform.

Smart Cities Marketplace Projects (2025). Overview of Supported Projects.

Smart City Heraklion. Heraklion Smart City – Our Vision [Internet]. Heraklion Smart City; [cited 2026 Feb 26]. Available from: https://smartcity.heraklion.gr/en/our-vision/

Sorrell S. Energy efficiency, rebound effects and the cost of carbon abatement. Energy Policy. 2007;35(1):321-328.

Stoft S. Power System Economics: Designing Markets for Electricity. New York: Wiley-IEEE Press; 2002.

Tantau A, et al. Acceptance of Demand Response and Aggregators as a Solution to Optimize Consumer Participation. Energies. 2021;14(12):3441.

Thilakarathne NN, Kagita MK, Lanka S, Ahmad H. Smart Grid: A Survey of Architectural Elements, Machine Learning and Deep Learning Applications and Future Directions. arXiv. 2020 Oct 16. arXiv:2010.08094.

Williams B, Bishop D, Gallardo P, Chase JG. Demand Side Management in Industrial, Commercial, and Residential Sectors: A Review of Constraints and Considerations. Energies. 2023;16(13):5155. doi:10.3390/en16135155.

Yu Z, Yang C, Wang Q. The impact of large-scale EV charging on distribution systems: A comprehensive review. arXiv 2025.

Zakeri B, Syri S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;42:569-596.

Zheng Y, Stanton J, Ramnarine-Rieks A, Dedrick J. Proceeding with caution: Drivers and obstacles to electric utility adoption of smart grids in the United States. Energy Research & Social Science. 2022;93:102839. doi:10.1016/j.erss.2022.102839.

Δήμος Ηρακλείου (2024). Heraklion Smart City – Έργο Ελληνικές Έξυπνες Πόλεις. Ηράκλειο: Δήμος Ηρακλείου.

Δήμος Ηρακλείου. ΔΗΜΟΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ_ Ελληνικές έξυπνες πόλεις – Επενδύσεις σε υποδομές και συστήματα SSC για ένα βιώσιμο και πράσινο αστικό μέλλον [Internet]. Heraklion Smart City; [cited 2026 Feb 26]. Available from: https://smartcity.heraklion.gr/el/project/heraklion-smartcities/