



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ:
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ
ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

*ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΝΔΡΕΟΥ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΠΘ*

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2025

Όταν γράφεται η ιστορία της ζωής σου
μην αφήνεις άλλος να κρατάει την πένα!

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, για την αμέριστη στήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την εκπόνηση της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας, τον επιβλέπων καθηγητή και μέντορά μου, Ανδρέου Γιώργο.

Τα ονόματα πολλά των καθηγητών άλλα και του προσωπικού του ΑΠΘ που θα ήθελα προσωπικά να ευχαριστήσω μέσα από αυτό το ταξίδι των σπουδών μου. Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να κάνω στην Κα Κατερίνα Παπακώτα για την συμβουλευτική υποστήριξή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω γνωστούς, φίλους, κολλητούς, μα πάνω από όλα την οικογένειά μου που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια με κάθε δυνατό τρόπο και με βοήθησαν να μην τα παρατήσω.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την έννοια της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας (Demand-Side Management - DSM) σε ένα ευρύτερα θεωρητικό πλαίσιο αναδिकνύοντας την σημασία της ως βασικό μηχανισμό ενίσχυσης της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού συστήματος στη σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση. Η ραγδαία μεταβολή των προτύπων κατανάλωσης καθώς και η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστά αναγκαία την διατύπωση στρατηγικών που βελτιστοποιούν την σχέση ζήτησης και παραγωγής με σκοπό την μείωση του κόστους, την αποσυμφόρηση του δικτύου καθώς και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Αρχικά παρουσιάζεται ένα γενικό θεωρητικό πλαίσιο της Διαχείρισης της Ζήτησης, αποτελούμενο από βασικούς ορισμούς καθώς επίσης αναλύεται η ιστορική εξέλιξη της έννοιας. Στη συνέχεια αναλύονται εφαρμογές σε βιομηχανικό και οικιακό τομέα με ιδιαίτερη έμφαση στα χαρακτηριστικά των φορτίων και τους τεχνικούς περιορισμούς καθώς επίσης και το γενικότερο τεχνολογικό υπόβαθρο που καθιστά δυνατή την εφαρμογή στρατηγικών Διαχείρισης Ζήτησης. Παράλληλα, γίνεται ανάλυση των τεχνολογικών, ρυθμιστικών πλαισίων καθώς και πολιτικών εργαλείων που συμβάλουν στην υιοθέτηση στρατηγικών Διαχείρισης Ζήτησης σε διεθνές επίπεδο.

Τέλος, γίνεται μια συγκριτική αποτίμηση των οφελών, των προκλήσεων καθώς επίσης και των τεχνολογικών περιορισμών, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι κυριότερες μελλοντικές τάσεις. Η παρούσα μελέτη καταδεικνύει την σημασία της σωστής εφαρμογής στρατηγικών Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας με σκοπό την βελτίωση λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος και την προώθηση ενός οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμου ενεργειακού μοντέλου.

Abstract

This thesis examines the concept of Demand-Side Management (DSM) in a broader theoretical framework, highlighting its importance as a key mechanism for enhancing the flexibility and reliability of the electrical system in the modern energy transition. The rapid transformation of consumption patterns as well as the increasing penetration of renewable energy sources, makes it necessary to develop strategies that optimize the demand-generation relationship in order to reduce costs, decongest the network and improve energy efficiency.

Initially, a general theoretical framework of Demand-Side Management is presented, consisting of basic definitions, as well as the historical development of the concept is analyzed. Applications in the industrial and residential sectors are then analyzed with particular emphasis on load characteristics and technical constraints, as well as the general technological background that makes it possible to implement Demand-Side Management strategies. At the same time, an analysis is made of the technological, regulatory frameworks as well as political tools that contribute to the adoption of Demand-Side Management strategies at an international level.

Finally, a comparative assessment of the benefits, challenges as well as technological limitations is made, while also presenting the main future trends. This study demonstrates the importance of effectively implementing Demand-Side Management strategies in order to improve the operation of the electricity system and promote an economically and environmentally sustainable energy model.

Ακρωνύμια

DSM – Demand-Side Management
DR – Demand Response
FERC – Federal Energy Regulatory Commission
GHG – Greenhouse Gases
IoT – Internet of Things
ΑΠΕ – Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition
HEMS – Home Energy Management System
MILP – Mixed-Integer Linear Programming
VSD – Variable Speed Drive
TCLs – Thermostatically controlled loads
HVAC – Heating, Ventilation and Air-Conditioning
EWHs – Electric water Heaters
HO – Ηλεκτρικά Οχήματα
EV – Electric Vehicle
V2G – Vehicle-to-grid
V2H – Vehicle-to-home
DER – Distributed Energy Resources
BESS – Battery Energy Storage System
ICT – Information and Communication Technology
AMI – Advanced Metering Infrastructure
IEMS – Industrial Energy Management System
RTE – Réseau de Transport d'Électricité
NEBEF – Notification d'Échanges de Blocs d'Effacement
ToU – Time of Use
RTP – Real Time Pricing
CPP – Critical Peak Pricing
PAR – Peak-Average Ratio
AI – Artificial Intelligence
ESS – Energy Storage Systems
FCR – Frequency Containment Reserve
TSO – Transmission System Operator
MES – Multi-Energy System
MILP – Mixes-Integer Linear Programming
CHP – Combined Heat & Power
IT – Information Technology
VFD – Variable Frequency Drive
BMS – Building Management System
APS – Arizona Public Service
ToD – Time Of Day

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Ακρωνύμια.....	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	7
1. Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	8
1.1. Η σημασία της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας (DSM) στη σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση.....	8
1.2. Στόχος & συνεισφορά της εργασίας.....	8
1.3. Μεθοδολογία και δομή.....	9
2. Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Πλαίσιο της Διαχείρισης Ζήτησης (DSM).....	10
2.1. Ορισμός και βασικές αρχές του DSM.....	10
2.2. Ιστορική εξέλιξη και ανάπτυξη του DSM.....	13
2.3. Οφέλη και προκλήσεις εφαρμογής.....	14
3. Κεφάλαιο 3 - Εφαρμογές DSM ανά Τομέα Κατανάλωσης.....	16
3.1. Εισαγωγή στις τομεακές εφαρμογές.....	16
3.2. DSM στον βιομηχανικό τομέα.....	17
3.3. DSM στον οικιακό τομέα.....	19
3.4. Πρακτικές εφαρμογές.....	21
4. Κεφάλαιο 4 - Τεχνολογικό Πλαίσιο και Υποδομές.....	23
4.1. Τεχνολογικό πλαίσιο.....	23
4.2. Εφαρμογές DSM ανά τον κόσμο.....	23
4.3. Ρυθμιστικά & Πολιτικά Κίνητρα.....	25
5. Κεφάλαιο 5 - Αποτίμηση και Προοπτικές DSM.....	26
5.1. Αξιολόγηση οφελών, προκλήσεων και τεχνολογικών περιορισμών.....	26
5.2. Βιομηχανικά πιλοτικά προγράμματα και εφαρμογές.....	27
5.3. Οικιακά πιλοτικά προγράμματα και εφαρμογές.....	29
5.4. Μελλοντικές τάσεις.....	30
6. Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα.....	31
6.1. Συνοπτική παρουσίαση ευρημάτων.....	31
6.2. Αξιολόγηση της σημασίας της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας στη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση.....	31
6.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	32
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	33

1. Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1. Η σημασία της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας (DSM) στη σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, σε συνδυασμό με την ανάγκη συμπόρευσης της τεχνολογικής εξέλιξης με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, δημιουργούν την ανάγκη για ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης ενέργειας ή αλλιώς Demand-Side Managements (DSM).

Οι ενεργειακές ανάγκες κάθε χώρας αυξάνονται σύμφωνα με την ανάπτυξη καθώς επίσης και σύμφωνα με τις εξελισσόμενες καταναλωτικές της απαιτήσεις. Πέρα από την αντιμετώπιση των προκλήσεων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι κυβερνήσεις, οι πάροχοι κοινής ωφέλειας και οι καταναλωτές πρέπει επίσης να εξετάσουν πώς μπορεί να διανεμηθεί και να καταναλωθεί καλύτερα η ενέργεια, ιδίως κατά τις ώρες αιχμής. Έτσι έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για πιο ευέλικτα και αποδοτικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ύστερα και από την σημαντική διεύρυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο, ως ένας νέος τρόπος παραγωγής.

Γ' αυτό η Διαχείριση της Ζήτησης Ενέργειας (DSM) αποτελεί ένα τομέα διαρκώς εξελισσόμενο που σκοπό έχει να συμβάλει στην εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης καθώς και στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης. Αποτελεί ουσιαστικό μέσο για τη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας, δηλαδή την επίτευξη ευελιξίας, ενεργειακής αποδοτικότητας καθώς και σταθερότητας σε ένα γενικό πλαίσιο πράσινης μετάβασης και μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα.

1.2. Στόχος & συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια παρουσίαση, ανάλυση και συγκριτική αποτίμηση τεχνικών Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας τόσο στον οικιακό όσο και στον βιομηχανικό τομέα. Η υιοθέτηση νέων τακτικών όπως η δυναμική τιμολόγηση, η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και η εξέλιξη των έξυπνων τεχνολογιών είναι μόνο μερικοί από τους τομείς που ασχολείται ο τομέας της Διαχείρισης της Ζήτησης. Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, ιδίως κατά τις περιόδους αιχμής, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Ειδικότερα, επιδιώκεται η διερεύνηση των μεθόδων και των στρατηγικών που συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η αποτελεσματική εκτέλεση αυτών των μέτρων ενισχύει τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος, προάγει τη σταθερότητα του δικτύου και ενθαρρύνει την ευρύτερη υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στόχος της εργασίας είναι η η διαμόρφωση ενός ενιαίου πλαισίου Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας, το οποίο θα συνδυάζει τις ανάγκες και δυνατότητες τόσο του οικιακού όσο και του βιομηχανικού τομέα. Επίσης, στόχο αποτελεί η διερεύνηση της συσχέτισης οικιακού και βιομηχανικού τομέα στα πλαίσια διαχείρισης ενέργειας άλλα και συγκριτική αποτίμηση ρυθμιστικού πλαισίου που αφορά τους δύο αυτούς τομείς.

1.3. Μεθοδολογία και δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση (systematic literature review) και ποιοτική ανάλυση επιστημονικών άρθρων με στόχο τη διερεύνηση της έννοιας της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας (DSM), των τεχνολογικών εφαρμογών της και των πολιτικών που τη διαμορφώνουν. Ακολουθεί εκτεταμένη καταγραφή και αξιολόγηση των σημαντικότερων ερευνητικών και πρακτικών προσεγγίσεων που αφορούν τη Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας (DSM) σε οικιακό και βιομηχανικό επίπεδο.

Η διαδικασία μελέτης οργανώθηκε σε τρία βασικά στάδια:

- (α) εντοπισμός των σχετικών πηγών μέσω επιστημονικών βάσεων δεδομένων και καταλόγων βιβλιογραφίας,
- (β) θεματική κατηγοριοποίηση των εργασιών ανάλογα με το περιεχόμενά τους (τεχνολογικές εφαρμογές, πολιτικές, βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές) και
- (γ) κριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους με στόχο τη διαμόρφωση ενιαίου πλαισίου κατανόησης του DSM.

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε γενικές έννοιες καθώς και τα κίνητρα ενασχόλησης με το παρόν θέμα.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικοί ορισμοί, οι αρχές λειτουργίας της Διαχείρισης Ζήτησης και η ιστορική της εξέλιξη.
- Στο τρίτο κεφάλαιο διαχωρίζονται πρακτικές εφαρμογών Διαχείρισης ανά τομέα κατανάλωσης.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το τεχνολογικό και ρυθμιστικό πλαίσιο, περιγράφοντας τόσο τις υποδομές όσο και τις πολιτικές που καθορίζουν την εφαρμογή DSM.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο ακολουθεί η σύνοψη των οφελών, των προκλήσεων καθώς και των περιορισμών, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται προοπτικές μελλοντικής εξέλιξης.

2. Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Πλαίσιο της Διαχείρισης Ζήτησης (DSM)

2.1. Ορισμός και βασικές αρχές του DSM

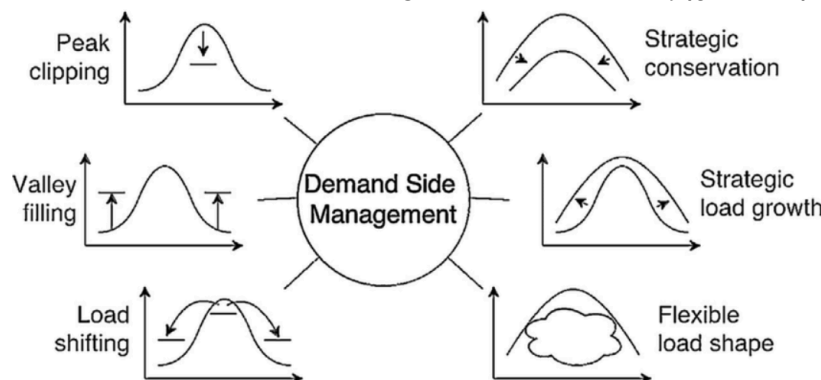
Αναφέρεται στις στρατηγικές και τα προγράμματα που διαχειρίζονται τα πρότυπα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των τελικών χρηστών για την υποστήριξη του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Με την άνοδο των αποκεντρωμένων δικτύων το DSM έχει γίνει πιο σημαντικό από ποτέ. Η μακρά λίστα των ενδιαφερόμενων τομέων περιλαμβάνει μικρά νοικοκυριά μέχρι και μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Σε αυτά προστίθενται οι καταναλωτές, οι επιχειρήσεις, οι κοινότητες καθώς και οι ρυθμιστικές αρχές. Ο στόχος της Διαχείρισης Ζήτησης (DSM) είναι η μείωση της συνολικής ενεργειακής ζήτησης των εταιρειών κοινής ωφέλειας και της ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής. Η επίτευξη αυτού του στόχου βελτιώνει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου, μειώνει το ενεργειακό κόστος και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η Διαχείριση Ζήτησης (DSM) περιλαμβάνει μια σειρά στρατηγικών που έχουν σχεδιαστεί για τη διαχείριση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μακροπρόθεσμα. Περιλαμβάνει προγράμματα που έχουν σχεδιαστεί για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης, όπως κίνητρα για τους καταναλωτές να στραφούν σε πιο αποδοτικές συσκευές και προγράμματα που ενθαρρύνουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ορίζεται λοιπόν, ως το σύνολο των ενεργειών, τεχνικών και πολιτικών που στοχεύουν στη ρύθμιση-τροποποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους τελικούς χρήστες με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της ευελιξίας του ηλεκτρικού συστήματος.

Η έννοια της Διαχείρισης Ζήτησης διαμορφώθηκε αρχικά από τον Gellings (1985) [1], ο οποίος παρουσίασε το DSM ως ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο στρατηγικών για την ενεργητική διαμόρφωση της καμπύλης φορτίου. Στην προσέγγισή του, το DSM αντιμετωπίζεται ως διαδικασία ισοδύναμης σημασίας με τον προγραμματισμό της παραγωγής, δίνοντας έμφαση στη μείωση των αιχμών και στη βελτίωση του load factor.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Gellings [1] υπάρχουν οι εξής στρατηγικές:

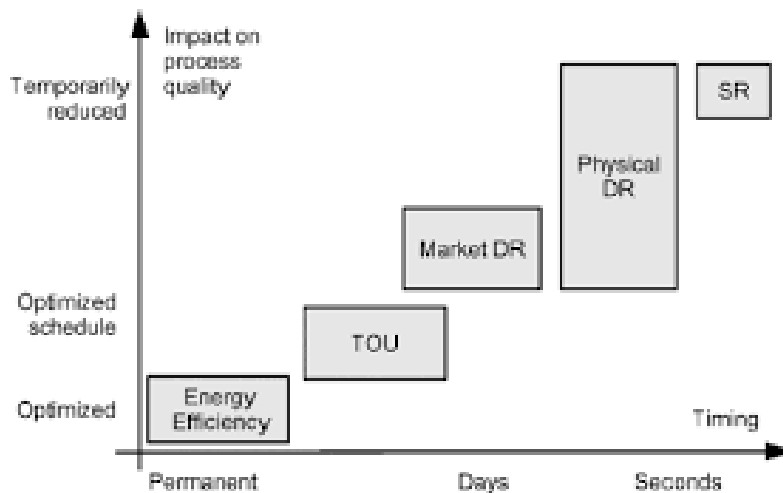


- **Peak Clipping:** ενσωματώνει μία από τις κλασικές μορφές διαχείρισης φορτίου. Η περικοπή αιχμής θεωρείται γενικά ως η μείωση του φορτίου αιχμής με τη χρήση άμεσου ελέγχου φορτίου. Ο άμεσος έλεγχος φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του λειτουργικού κόστους και της εξάρτησης από κρίσιμα καύσιμα μέσω οικονομικής κατανομής.
- **Load Shifting:** Περιλαμβάνει τη μετατόπιση φορτίου από περιόδους αιχμής σε περιόδους εκτός αιχμής. Η μετατόπιση φορτίου από συσκευές αποθήκευσης περιλαμβάνει την αντικατάσταση συμβατικών συσκευών που εξυπηρετούνται από ηλεκτρική ενέργεια.
- **Valley Filling:** Περιλαμβάνει την κατασκευή φορτίων εκτός αιχμής. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιθυμητό για εκείνες τις περιόδους του έτους όπου το μακροπρόθεσμο οριακό κόστος είναι μικρότερο από τη μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσθήκη σωστά τιμολογημένου φορτίου εκτός αιχμής υπό αυτές τις συνθήκες μειώνει το μέσο κόστος για τους πελάτες.
- **Load Building:** Αναφέρεται στις στρατηγικές που στοχεύουν στην αύξηση της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συγκεκριμένες ώρες ή περιόδους της αγοράς. Αυτή η στρατηγική χρησιμοποιείται όταν το σύστημα έχει επαρκή παραγωγική ικανότητα και επιδιώκει καλύτερη οικονομική αξιοποίηση των υποδομών.
- **Load Shaping:** Αναφέρεται στη συνολική διαμόρφωση της καμπύλης φορτίου με στόχο την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ζήτησης, μειώνοντας την ανάγκη για ακριβές μονάδες αιχμής και επιτρέποντας πιο αποδοτική αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών

Η βασική αρχή του DSM είναι η ενεργή συμμετοχή του καταναλωτή στη διαχείριση της κατανάλωσης, μέσα από μηχανισμούς παρακολούθησης και προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας. Ο καταναλωτής αποκτά ενεργό ρόλο στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας αφού με έμμεσο άλλα και άμεσο τρόπο επηρεάζει τις διαδικασίες ζήτησης και προσφοράς [2].

Ανάλογα με την κλίμακα στην οποία εφαρμόζεται το DSM, μπορεί να ταξινομηθεί ως εξής:

- Απόκριση Ζήτησης -Demand Response
- Ενεργειακή αποδοτικότητα - Energy Efficiency
- Τιμολόγια Χρόνου Χρήσης - Time of Use



Σχήμα 2.1: Κατηγορίες Διαχείρισης Ζήτησης

Απόκριση Ζήτησης - Demand Response

Η απόκριση ζήτησης ή αλλιώς Demand Response (DR) αποτελείται από ενέργειες που εκτελούνται από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, τους συλλέκτες ενέργειας ή τους διαχειριστές του δικτύου με σκοπό την αλλαγή του προφίλ κατανάλωσης ενέργειας. Η αλλαγή αυτή έχει στόχο την διασφάλιση της αξιοπιστίας της παρεχόμενης ενέργειας, ειδικά σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Περιλαμβάνει ένα σύνολο μέτρων που επηρεάζουν την αγορά ενέργειας, είτε μέσω της τιμολόγησης είτε μέσω κινήτρων.

Ο ορισμός της απόκρισης ζήτησης της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Ρυθμιστικής Ενέργειας (Federal Energy Regulatory Commission - FERC)[3] την περιγράφει ως αλλαγές στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από τους τελικούς καταναλωτές σε σχέση με τα κανονικά πρότυπα κατανάλωσής τους, οι οποίες οφείλονται είτε σε αλλαγές στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας με την πάροδο του χρόνου είτε σε πληρωμές κινήτρων.

Μερικά από τα οφέλη εφαρμογής της είναι:

- (i) η μείωση του κόστους παραγωγής, εφόσον με την αλλαγή στα προφίλ ζήτησης μειώνεται η κατανάλωση σε ώρες αιχμής
- (ii) καλύτερη ενεργειακή απόδοση και συνεπώς μεταγύλετη αξιοπιστία και ευελικία του συστήματος καθώς και
- (iii) βελτιστοποίηση των πόρων παραγωγής, δηλαδή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG). [4]

Ο μηχανισμός DR υλοποιείται μέσω “έξυπνων” μετρητών, που επιτρέπουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας και των τελικών χρηστών. Η ανάλυση του φορτίου καθώς και η ενημέρωση του χρήστη σε πραγματικό χρόνο για το συνολικό φορτίο με σκοπό τη διακοπή κάποιας συσκευής αποτελεί επίσης πολύ σημαντικό παράγοντα στην ευρύτερη τεχνολογική ανάπτυξη της απόκρισης της ζήτησης.

Η διεθνής βιβλιογραφία αντιμετωπίζει το DSM ως “ομπρέλα” που ενσωματώνει τόσο τεχνολογικές βελτιώσεις όσο και δυναμικούς μηχανισμούς μεταβλητής κατανάλωσης [5].

Ενεργειακή Αποδοτικότητα - Energy Efficiency

Περιλαμβάνει ένα σύνολο βραχυπρόθεσμων άλλα και μακροπρόθεσμων ενεργειών που αποσκοπούν στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Παραδείγματος χάρη, η αντικατάσταση παλιών συσκευών με νέες πιο αποδοτικές καθώς και πιο οικονομικές. Επιπρόσθετα ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αλλαγή των συνηθειών των καταναλωτών με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Βέλτιστη λύση είναι η καταναλωτές να προβούν σε όλες τις απαραίτητες επενδύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας πριν προβούν σε δραστηριότητες απόκρισης ζήτησης. Επιπρόσθετα, στο σύνολο αυτών των ενεργειών εντάσσεται και η βελτίωση των συνθηκών που σχετίζονται με την κατανάλωση και η αντιστάθμιση της άεργους ισχύος όπου αυτό είναι εφικτό. [6]

Τιμολόγια Χρόνου Χρήσης - Time Of Use

Η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί συνάρτηση του μέσου κόστους παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων περιόδων. Τις περιόδους όπου η ζήτηση ισχύος είναι υψηλή, υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της χρήσης της ενέργειας συγκριτικά με τις περιόδους χαμηλότερης ζήτησης.

Η τιμολόγηση μπορεί να διαφοροποιείται ανά εικοσιτετράωρο άλλα και ανα εποχή. Παραδείγματος χάρη, αυτή η πρακτική είναι αρκετά διαδεδομένη σε ευρωπαϊκά κράτη όπου η θέρμανση των πολιτών πραγματοποιείται με ηλεκτρική ενέργεια. Τα προγράμματα κοστολόγησης σύμφωνα με το χρόνο χρήσης αποτελούν από τις πιο διαδεδομένες πρακτικές απόκρισης ζήτησης και έχουν τη δυνατότητα να εμαδρυστούν είτε για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους είτε καθ'όλη τη διάρκεια του έτους. [7]

2.2. Ιστορική εξέλιξη και ανάπτυξη του DSM

Η έννοια της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας είναι ένας διαχρονικός προβληματισμός στον χώρο της σχεδίασης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ενισχύεται από ποικίλους παράγοντες που συνεχώς διαταράσσουν τις ισορροπίες. Παραδείγματος χάρη ένα τυχαίο συμβάν όπως η διακοπή λειτουργίας κάποιας πηγής τροφοδοσίας μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες ως προς τους καταναλωτές που εξαρτώνται αποκλειστικά από τους κύριους παρόχους ενέργειας, ενώ πολλές φορές σημαίνει και οικονομική ζημίωση.

Σαν έννοια η διαχείριση ζήτησης ενέργειας, εμφανίστηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια της ενεργειακής κρίσης τη δεκαετία του 1970 η οποία οδήγησε σε αυξανόμενο ενδιαφέρον για ενεργειακή αποδοτικότητα και εξοικονόμηση πόρων. Αναπτύχθηκαν

προγράμματα υποβοήθειας των καταναλωτών με σκοπό να διαχειρίζονται και να μειώνουν την κατανάλωση, όπως για παράδειγμα επιδοτήσεις για αγορά, ενεργειακά αποδοτικές συσκευές, προγράμματα φωτισμού χαμηλής κατανάλωσης και κίνητρα για τη μετατόπιση της χρήσης ενέργειας εκτός ωρών αιχμής [8].

Το DSM εισάγει μια νέα φιλοσοφία: *η ζήτηση μπορεί να είναι διαχειρίσιμη μεταβλητή, όχι απλώς αποτέλεσμα της προσφοράς*. Η εφαρμογή των προγραμμάτων DSM ωστόσο δεν ήταν μια εύκολη διαδικασία. Πόλλες ήταν οι εταιρείες κοινής ωφέλειας οι οποίες αντιτάχθηκαν στις πολιτικές DSM, καθώς η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε απειλή για τα οικονομικά τους συμφέροντα και την πολιτική τους επιρροή. Μακροπρόθεσμα όμως οι εταιρείες αντιλήφθηκαν ότι τα προγράμματα αυτά, μπορούσαν να μειώσουν το λειτουργικό τους κόστος καθυστερώντας την ανάγκη για νέες επενδύσεις από την πλευρά της παραγωγής.

Κατά τη δεκαετία του 1980 υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη των προγραμμάτων αυτών καθώς οι ρυθμιστικές αρχές προσέφεραν επιπλέον κίνητρα στις εταιρείες για την υιοθέτηση ολοκληρωμένων μηχανισμών διαχείρισης πόρων. Το έτος 1993 το DSM έφτασε στο απόγειό του, με δαπάνες ύψους 2.7 δισ. Δολαρίων- περίπου 1% των συνολικών εσόδων των αμερικανικών εταιρειών ηλεκτρισμού. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 περιοχές όπως η Νέα Αγγλία και η Καλιφόρνια υπήρξε συντονισμένη προσπάθεια για ανάπτυξη μηχανισμών που θα ωφελούσε όλες τις εμπλεκόμενες πλευρές.

Από το 2010 και εξής, η ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων (Smart Grids) και των τεχνολογιών IoT επαναπροσδιόρισε τον ρόλο του DSM καθώς και οι πολιτικές ενεργειακής μετάβασης στην Ευρώπη, όπως το Green Deal και το Fit-for-55, ανέδειξαν το DSM σε βασικό εργαλείο αποανθρακοποίησης και ευελιξίας του δικτύου. [9] Τα τελευταία χρόνια, με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης το DSM εξελίσσεται προς ολοκληρωμένα μοντέλα συμμετοχής χρηστών (user-centric DSM) και ενεργειακών κοινοτήτων (prosumers) [10].

2.3. Οφέλη και προκλήσεις εφαρμογής

Η Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας συμβάλει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου, στη μείωση των αιχμών φορτίου και στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος. Επιπλέον, οδηγεί σε μείωση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σε αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Συμβάλει στην καθυστέρηση κατασκευής νέων μονάδων παραγωγής προσδιορίζοντας απλά τα φορτία σε κρίσιμες περιόδους [11]. Επίσης η εφαρμογή της Διαχείρισης της Ζήτησης βοηθά στην αποσυμφόρηση αστικών υποσταθμών διανομής, παραδείγματος χάρη τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω εκτεταμένης χρήσης κλιματιστικών.

Πληθώρα είναι τα οφέλη μιας σωστά δομημένης στρατηγικής DSM. Παρακάτω παρουσιάζονται μόνο μερικά από αυτά:

- Μείωση αιχμών ζήτησης και λειτουργικού κόστους:
 1. Μικρότερη πίεση στο σύστημα μεταφοράς και διανομής
 2. Αποφυγή υπερδιαστασιολογημένων υποδομών
 3. Περιορισμό του συνολικού κόστους ενέργειας. [12]
- Βελτίωση αξιοπιστίας και ευστάθειας δικτύου
- Ενίσχυση ενσωμάτωσης ΑΠΕ και αποκεντρωμένων πόρων
- Οικονομικά οφέλη για καταναλωτές και επιχειρήσεις
 1. Χαμηλό κόστος ενέργειας
 2. Βελτίωση περιβαλλοντικής απόδοσης
 3. Αύξηση ανταγωνιστικότητας. [10]
- Περιβαλλοντικά οφέλη

Εκτός όμως από τα πολύ σημαντικά οφέλη, η πραγματική υλοποίηση των στρατηγικών DSM αντιμετωπίζει αρκετά τεχνικά, οικονομικά, κοινωνικά και ρυθμιστικά εμπόδια.

Σε πολλές χώρες, η ελλιπής υποδομή ή τα αυξημένα κόστη εγκατάστασης προηγμένων συστημάτων μέτρησης και ελέγχου, αποτελούν σημαντικό φραγμό. [13],[14]. Καθώς επίσης και η έλλειψη ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου ή η περιορισμένη πρόσβαση των καταναλωτών σε αγορές ενέργειας δυσχεραίνουν την ευρεία εφαρμογή του DSM [9]. Η συμμετοχή των καταναλωτών εξαρτάται από παράγοντες όπως η περιορισμένη κατανόηση των προγραμμάτων ή ο φόβος για απώλεια άνεσης άλλα και ιδιωτικότητας δεδομένων καθώς επίσης και η ελάχιστη οικονομική ανταμοιβή [15], [16].

Οι ανησυχίες σχετικά με την ευελιξία, τη μεταβλητότητα, τη μη προβλεψιμότητα των ανανεώσιμων πηγών και των επιπτώσεων τους στη διατήρηση ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, μπορούν να μετριαστούν με την εξάπλωση των προγραμμάτων Διαχείρισης της Ζήτησης. Συμπερασματικά η εφαρμογή της συμβάλλει στην αποφυγή επενδύσεων στην κατασκευή νέων μονάδων παραγωγής καταλαμβάνοντας μεγάλες εκτάσεις γης, ενώ παράλληλα μειώνονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι [11].

3. Κεφάλαιο 3 - Εφαρμογές DSM ανά Τομέα Κατανάλωσης

3.1. Εισαγωγή στις τομεακές εφαρμογές

Σε όλους τους τομείς η εφαρμογή της Διαχείρισης Ζήτησης μπορεί να υποκειται σε τεχνο οικονομικούς περιορισμούς [17], αυστηρά καθορισμένους από τις ανθρώπινες ανάγκες. Παραδείγματος χάρη σε ορισμένα κρίσιμα φορτία, όπως ο ιατρικός εξοπλισμός, δεν μπορούν να μετατοπιστούν χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή. Επομένως η κατανόηση των τεχνικών και οικονομικών περιορισμών σε κάθε τομέα είναι απαραίτητη για την επιτυχή υλοποίηση του DSM και μπορεί να συμβάλει με πολιτικές και τεχνικές παρεμβάσεις για την αντιμετώπιση των σχετικών εμποδίων.

Η ανθρώπινη συμπεριφορά αποτελεί επιπρόσθετα, περιοριστικό παράγοντα κατά την εφαρμογή του DSM [15]. Για παράδειγμα, η φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου εξαρτάται από την οδηγική συμπεριφορά. Ωστόσο, οι άνθρωποι δεν συμπεριφέρονται πάντα σύμφωνα με όσα προβλέπει ένα οικονομικά ορθολογικό πρόγραμμα DSM. Παραδείγματος χάρη, οι μεταβολές στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζουν λιγότερο την κατανάλωση των νοικοκυριών υψηλού εισοδήματος σε σχέση με εκείνα χαμηλότερου [18].

Η κατανάλωση ενέργειας είναι αποτέλεσμα μια σύνθετης διαδικασίας που περιλαμβάνει ψυχολογικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες [19], με αποτέλεσμα μη γραμμική ελαστικότητα τιμών. Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της DSM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανόηση των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας ανά τομέα, το δυναμικό ευελιξίας και τα κίνητρα των ενδιαφερόμενων μερών [20].

Η εφαρμογή των τεχνικών DSM πρέπει να προσαρμόζεται στα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε τομέα κατανάλωσης.

Προφίλ Φορτίου

Διαφορετικοί τομείς παρουσιάζουν διακριτά χρονικά πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις συνήθως παρουσιάζουν πιο προβλέψιμα και συνεχή προφίλ φορτίου που καθορίζονται από τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής, ενώ η οικιακή κατανάλωση παρουσιάζει έντονες ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις που επηρεάζονται από τη συμπεριφορά των ενοίκων και τις κλιματικές συνθήκες [21].

Ευελιξία

Η τεχνική δυνατότητα τροποποίησης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει σημαντικά μεταξύ των τομέων. Οι βιομηχανικές διεργασίες συχνά διαθέτουν σημαντική ευελιξία φορτίου μέσω του προγραμματισμού παραγωγής, της αποθήκευσης θερμότητας στις διαδικασίες παραγωγής και των διακοπτόμενων φορτίων, αν και οι λειτουργικοί περιορισμοί ενδέχεται να περιορίζουν την πρακτική ευελιξία [22]. Η οικιακή ευελιξία

προέρχεται κυρίως από θερμοστατικά ελεγχόμενα φορτία (θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός), θέρμανση νερού και, ολοένα και περισσότερο, από ηλεκτρικά οχήματα και έξυπνες συσκευές [12].

Οικονομικά κίνητρα

Οι βιομηχανικοί καταναλωτές αντιμετωπίζουν υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και χρεώσεις ζήτησης, γεγονός που τους καθιστά πιο ευαίσθητους σε χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές και προγράμματα που βασίζονται σε κίνητρα [23]. Οι οικιακοί καταναλωτές συνήθως έχουν χαμηλότερα ατομικά επίπεδα κατανάλωσης και ενδέχεται να επηρεάζονται περισσότερο από περιβαλλοντικές ανησυχίες, παράγοντες ευκολίας και αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου παρά από καθαρά οικονομικά σήματα [24].

Έλεγχος και επικοινωνία

Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις διαθέτουν γενικά εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, υποδομή SCADA και ειδικό προσωπικό διαχείρισης ενέργειας, επιτρέποντας την ταχεία εφαρμογή σύνθετων στρατηγικών DSM [25]. Η οικιακή DSM βασίζεται ολοένα και περισσότερο σε έξυπνους μετρητές, οικιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας (HEMS) και συσκευές Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), αν και η ανάπτυξη παραμένει ετερογενής μεταξύ των περιοχών [26].

3.2. DSM στον βιομηχανικό τομέα

Ο βιομηχανικός τομέας παρουσιάζει το μεγαλύτερο δυναμικό εφαρμογής Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 30-40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας [27]. Καλείται να εξισορροπεί προσεκτικά τη μείωση του ενεργειακού κόστους με τη συνέχεια της παραγωγής, τη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων και τις απαιτήσεις λειτουργικής ασφάλειας [28]. Επιτρέπει την προσαρμογή της ενεργειακής ζήτησης σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους και στη σταθεροποίηση του δικτύου. Η συμμετοχή μεγάλων μονάδων μπορεί να έχουν ουσιαστικό αντίκτυπο στην εξισορρόπηση φορτίου και στην αποφυγή αιχμών κατανάλωσης [10], [29]. Σε βαριές βιομηχανίες όπως η παραγωγή βασικών μετάλλων, η χημική βιομηχανία, η βιομηχανία τσιμέντου, η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί σημαντικό ποσοστό του συνολικού λειτουργικού κόστους, γεγονός που καθιστά υψίστης σημασίας την ορθολογική διαχείριση της [10].

Οι στρατηγικές Διαχείρισης Ζήτησης στη βιομηχανία έχουν ως στόχο την μετατόπιση του φορτίου σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, στη μείωση της κατανάλωσης σε ώρες αιχμής αλλά και τη βέλτιστη λειτουργία με τη χρήση έξυπνου προγραμματισμού [30]. Έτσι, με την ορθή εφαρμογή τέτοιων μέτρων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα συμβάλει και στη σταθεροποίηση του δικτύου, περιορίζοντας διακυμάνσεις του φορτίου [31]. Η χρήση ευφυών συστημάτων προγραμματισμού φορτίου αποτελεί μια από τις πλέον αποτελεσματικές πρακτικές αφού επιτρέπουν την βέλτιστη χρονοδρομολόγηση της κατανάλωσης ανάλογα με τις τιμές ενέργειας και τις απαιτήσεις παραγωγής [8].

Βελτιστοποίηση Προγραμματισμού Παραγωγής

Οι ευέλικτες διαδικασίες παραγωγής μπορούν να μετατοπίσουν την παραγωγή σε ώρες εκτός αιχμής, όταν οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερες [32]. Οι προσεγγίσεις μαθηματικής βελτιστοποίησης, όπως παραδείγματος χάρη, του μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) και του δυναμικού προγραμματισμού, χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό βέλτιστων προγραμμάτων παραγωγής που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος, ενώ παράλληλα ικανοποιούν τους στόχους παραγωγής [33].

Ευελιξία ανά διεργασία

Οι βιομηχανίες με σημαντικά θερμικά φορτία (π.χ., υαλουργία, κεραμικά, επεξεργασία τροφίμων) μπορούν να εκμεταλλευτούν τη θερμική αδράνεια και την ικανότητα αποθήκευσης. Οι ηλεκτρικοί κλίβανοι, οι κλίβανοι και οι διεργασίες θερμικής επεξεργασίας μπορούν να λειτουργούν σε περιόδους χαμηλών τιμών, με θερμική ενέργεια αποθηκευμένη στη μάζα του προϊόντος, σε πυρίμαχα υλικά ή σε ειδικά συστήματα θερμικής αποθήκευσης [34]. Επιπρόσθετα, τα συστήματα άντλησης, συμπίεσης και χειρισμού υλικών προσφέρουν ευελιξία μέσω:

- (α) Ελέγχου κίνησης μεταβλητής ταχύτητας (VSD) για διαμόρφωση φορτίου
- (β) Χρήσης αποθήκευσης
- (γ) Ακολουθίας διεργασιών και βελτιστοποίησης παρτίδων
- (δ) Στρατηγικές παράκαμψης και ανακυκλοφορίας [35]

Τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, που υπάρχουν σε περίπου 70% των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, αντιπροσωπεύουν ιδιαίτερα ελκυστικούς πόρους DSM λόγω της χωρητικότητας αποθήκευσης σε δεξαμενές υποδοχής και δίκτυα διανομής [36].

Ωστόσο, η εφαρμογή DSM στον βιομηχανικό τομέα συναντά αρκετούς τεχνικούς περιορισμούς. Πολλές είναι οι βιομηχανίες των οποίων οι διεργασίες απαιτούν σταθερή παροχή ισχύος με σκοπό την διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος ή την ασφάλεια του εξοπλισμού. Σε διεργασίες με υψηλό κόστος εκκίνησης ή όπου ο εξοπλισμός λειτουργεί σε συνεχή παραγωγική ροή, η μεταβολή της κατανάλωσης μπορεί να είναι περιορισμένη [37]. Επιπρόσθετα η διακοπή ή η καθυστέρηση της παραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε οικονομική ζημία ή απώλεια παραγωγικότητας [29].

Σημαντικό ρόλο κατέχουν οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες επιτρέπουν τη χρονική μετατόπιση φορτίου χωρίς διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας. Μέσω της αποθήκευσης, οι βιομηχανίες μπορούν να λειτουργούν πιο ευέλικτα, απορροφώντας ενέργεια όταν το κόστος είναι χαμηλό και επαναδιοχετεύοντάς την κατά τις περιόδους αιχμής [37].

Η επιτυχής εφαρμογή των στρατηγικών DSM δεν εξαρτάται μόνο από τεχνολογικούς και οικονομικούς παράγοντες αλλά και από ανθρώπινες αποφάσεις. Η προθυμία αλλαγής παραγωγικών προτύπων επηρεάζεται από τη διοικητική κουλτούρα και την αντίληψη του ρίσκου μέσα στην επιχείρηση [10].

3.3. DSM στον οικιακό τομέα

Ακόμη ένας τομέας όπου η Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ο οικιακός τομέας ο οποίος αντιπροσωπεύει περίπου το 20-30% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στις ανεπτυγμένες οικονομίες, με σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ των περιοχών ανάλογα με το κλίμα, τα χαρακτηριστικά του κτιριακού αποθέματος και τα επίπεδα ηλεκτροδότησης [38]. Σε αντίθεση με τους βιομηχανικούς καταναλωτές, η οικιακή DSM περιλαμβάνει τη διαχείριση εκατομμυρίων μικρών, καταναλωμένων φορτίων με εξαιρετικά μεταβλητά πρότυπα κατανάλωσης που καθορίζονται από τη συμπεριφορά των χρηστών, τις καιρικές συνθήκες και τους παράγοντες του τρόπου ζωής. Ενώ τα μεμονωμένα οικιακά φορτία είναι μικρά, το συλλογικό τους δυναμικό για απόκριση στη ζήτηση είναι σημαντικό, ιδίως καθώς οι τεχνολογίες έξυπνου σπιτιού και οι προηγμένες υποδομές μέτρησης γίνονται ολοένα και πιο διαδεδομένες [39].

Η αυξανόμενη διείσδυση ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης καθώς και η ραγδαία εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης ενισχύουν τη σημασία μιας πιο ορθολογικής διαχείρισης της ζήτησης στην οικιακή κατανάλωση [40]. Οι στρατηγικές διαχείρισης στον οικιακό τομέα επικεντρώνονται κυρίως στην μετατόπιση του φορτίου σε ώρες χαμηλής ζήτησης, στην αυτόματη χρονοδρομολόγηση οικιακών συσκευών καθώς επίσης και στην προσαρμογή της λειτουργίας συστημάτων HVAC για μείωση των αιχμών κατανάλωσης [41]. Η συστηματική χρήση έξυπνων μετρητών, αισθητήρων και συστημάτων IoT επιτρέπει την παρακολούθηση και κατα συνέπεια, τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας το συνολικό κόστος ενέργειας χωρίς απαραίτητα την άμεση συμμετοχή του καταναλωτή [42].

Θερμοστατικά Ελεγχόμενα Φορτία (TCLs)

Τα συστήματα HVAC και οι θερμοσίφωνες αντιπροσωπεύουν τους σημαντικότερους οικιακούς πόρους DSM λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και της εγγενούς θερμικής τους χωρητικότητας. Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται σε μοντέλα μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία HVAC λαμβάνοντας υπόψη τις μετεωρολογικές προβλέψεις, τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και τις προτιμήσεις άνεσης των ενοίκων [43].

Ηλεκτρική Θέρμανση Νερού

Οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες (EWHs) προσφέρουν σημαντικό δυναμικό DSM μέσω μετατόπισης φορτίου, διαμόρφωσης θερμοκρασίας καθώς και άμεσου ελέγχου φορτίου [44]. Τέτοιου είδους στρατηγικές ελέγχου μπορούν να μάθουν τα πρότυπα κατανάλωσης των νοικοκυριών και να βελτιστοποιήσουν τα προγράμματα θέρμανσης ανάλογα [45].

Συσκευές με δυνατότητα μετατόπισης

Ορισμένες οικιακές συσκευές προσφέρουν δυνατότητα μετατόπισης φορτίου χωρίς να διακυβεύεται η παροχή υπηρεσιών. Τα πλυντήρια ρούχων παραδείγματος χάρι. Η αποδοχή του προγραμματισμού συσκευών από τους καταναλωτές εξαρτάται από την ευκολία, τις παραμέτρους θορύβου (λειτουργία τη νύχτα) και τα αντιληπτά οφέλη. Μελέτες δείχνουν ότι το 30-50% των φορτίων συσκευών με υγρή φόρτιση μπορεί να μετατοπιστεί σε περιόδους εκτός αιχμής με κατάλληλα κίνητρα και αυτοματοποίηση [46].

Ηλεκτρικά Οχήματα (HO)

Τα ηλεκτρικά οχήματα αντιπροσωπεύουν έναν αναδυόμενο και ολοένα και πιο σημαντικό οικιακό πόρο DSM. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ελεγχόμενη φόρτιση. Η φόρτιση EV μπορεί να βελτιστοποιηθεί μέσω καθυστερημένης φόρτισης, δηλαδή, αναβολή της έναρξης φόρτισης σε περιόδους εκτός αιχμής. Έξυπνη φόρτιση καθώς και με τη σύνδεση οχήματος προς το δίκτυο (V2G) [47].

Κατανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι (DER)

Τα οικιακά DER ενισχύουν τις δυνατότητες DSM μέσω τοπικής παραγωγής και αποθήκευσης με την τοποθέτηση φωτοβολταϊκά σε στέγες [48] καθώς και με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίες (BESS) [49].

Οι αποφάσεις του χρήστη δεν καθορίζονται αποκλειστικά από οικονομικά κίνητρα άλλα από συνήθειες, ανάγκες άνεσης και ευκολίας καθώς και από κοινωνικούς παράγοντες ή προσωπικές προτιμήσεις, γεγονός που επηρεάζει την απόκριση σε προγράμματα χρονικής τιμολόγησης [18]. Διαπιστώνεται ότι τα νοικοκυριά υψηλότερου εισοδήματος είναι λιγότερο ευαίσθητα σε μεταβολές τιμών καθώς η κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει μικρότερο μέρος των δαπανών τους [9]. Η χρήση μοντέλων πρόβλεψης επιτρέπει τη διαχείριση της οικιακής ζήτησης με τέτοιο τρόπο που εξισορροπεί οικονομική αποδοτικότητα και επίπεδο άνεσης, επιτυγχάνοντας έτσι, μείωση κόστους χωρίς να περιορίζεται σημαντικά η ποιότητα ζωής [50]. Σε νοικοκυριά με φωτοβολταϊκά και συστήματα αποθήκευσης, η επιτυχής εφαρμογή DSM μπορεί να αυξήσει την ιδιοκατανάλωση και να μειώσει σημαντικά την εξάρτηση από το δίκτυο [51].

Συμπερασματικά η εξισορρόπηση άνεσης και εξοικονόμησης είναι μία πολύπλοκη διαδικασία την οποία οι σύγχρονες προσεγγίσεις DSM επιδιώκουν να πετύχουν με την αξιοποίηση έξυπνων και σταδιακών παρεμβάσεων που ελαχιστοποιούν τη συνειδητή εμπλοκή του χρήστη [17].

Χαρακτηριστικά Οικιακής Κατανάλωσης [52], [53]

Κατηγορία Φορτίου	Ποσοστό Κατανάλωσης	Ιδιότητες / Σχόλια
Space Heating & Cooling (HVAC)	40–60%	Ισχυρή εξάρτηση από καιρικές συνθήκες, υψηλό δυναμικό ελέγχου
Water Heating	15–25%	Μεγάλο θερμικό απόθεμα → δυνατότητες shifting
Refrigeration / Freezers	5–10%	Σταθερό βασικό φορτίο με θερμική αδράνεια
Lighting	10–15%	Μείωση με LED, περιορισμένο DSM δυναμικό
Cooking Appliances	5–10%	Συγκέντρωση σε ώρες προετοιμασίας γευμάτων
Electronics & Miscellaneous	15–25%	Αυξανόμενη κατηγορία λόγω συσκευών & ICT

3.4. Πρακτικές εφαρμογές

Τήξη Αλουμινίου για Υπηρεσίες Δικτύου

Η παραγωγή αλουμινίου μέσω ηλεκτρόλυσης αντιπροσωπεύει μία από τις πιο επιτυχημένες βιομηχανικές εφαρμογές DSM λόγω της εγγενούς ευελιξίας της διαδικασίας και της υψηλής έντασης ηλεκτρικής ενέργειας. Το χυτήριο υδροηλεκτρικού αλουμινίου στη Νορβηγία συμμετέχει σε αγορές ρύθμισης συχνότητας από το 2010, παρέχοντας υπηρεσίες ρύθμισης τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω στο σκανδιναβικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση ρυθμίζει την κατανάλωση ενέργειας εντός εύρους $\pm 5\%$ της ονομαστικής χωρητικότητας ρυθμίζοντας το ρεύμα που παρέχεται στα στοιχεία ηλεκτρόλυσης, ανταποκρινόμενη στις αποκλίσεις συχνότητας μέσα σε δευτερόλεπτα [54]. Κρίσιμη για αυτήν την επιτυχία ήταν η ανάπτυξη εξελιγμένων αλγορίθμων ελέγχου που κατανέμουν τις προσαρμογές φορτίου σε εκατοντάδες στοιχεία ηλεκτρόλυσης για να αποφευχθούν οι τοπικές θερμικές διαταραχές που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ποιότητα του προϊόντος ή να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό.

Προγραμματισμός Παραγωγής Αυτοκινητοβιομηχανίας

Ένα εργοστάσιο συναρμολόγησης αυτοκινήτων στη νότια Γερμανία εφάρμοσε ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βελτιστοποιεί τον προγραμματισμό παραγωγής με βάση τις τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας την επόμενη ημέρα. Η εγκατάσταση ενσωμάτωσε το σύστημα εκτέλεσης παραγωγής με τις προβλέψεις τιμών ενέργειας για να μετατοπίσει τις ενεργοβόρες λειτουργίες σε περιόδους χαμηλών τιμών, διατηρώντας παράλληλα τους στόχους παραγωγής [55]. Το βαφείο, το οποίο αντιπροσωπεύει περίπου το 40% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης, έγινε το κύριο επίκεντρο της βελτιστοποίησης.

Προσαρμόζοντας τα χρονοδιαγράμματα λειτουργίας του θαλάμου βαφής και χρησιμοποιώντας θερμική αποθήκευση σε φούρνους σκλήρυνσης, το εργοστάσιο πέτυχε μείωση 12% στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να διακυβεύεται ο όγκος ή η ποιότητα της παραγωγής. Οι εργασίες συγκόλλησης στο συνεργείο αμαξωμάτων και τα συστήματα HVAC παρείχαν πρόσθετη ευελιξία μέσω έξυπνων αλγορίθμων προγραμματισμού. Η υλοποίηση απαιτούσε σημαντικές οργανωτικές αλλαγές, συμπεριλαμβανομένου του συντονισμού μεταξύ των τμημάτων διαχείρισης ενέργειας, σχεδιασμού παραγωγής και διασφάλισης ποιότητας. Η τριετής περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης στο σύστημα ελέγχου απέδειξε οικονομική βιωσιμότητα, ενώ το περιβαλλοντικό όφελος από τη μείωση των εκπομπών άνθρακα ευθυγραμμίστηκε με τους εταιρικούς στόχους βιωσιμότητας.

Data center

Τα κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας έχουν αναδειχθεί ως σημαντικοί συμμετέχοντες στο DSM λόγω της σημαντικής και σχετικά ευέλικτης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα κέντρο δεδομένων υπερκλίμακας που λειτουργεί από μια μεγάλη εταιρεία τεχνολογίας στον Βορειοδυτικό Ειρηνικό εφάρμοσε μια ολοκληρωμένη στρατηγική απόκρισης ζήτησης αξιοποιώντας πολλαπλούς μηχανισμούς ευελιξίας [56]. Οι υπολογιστικές εργασίες με ευέλικτες απαιτήσεις χρονισμού τίθενται σε ουρά και εκτελούνται κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλών τιμών, ενώ τα χρονικά κρίσιμα φόρτα εργασίας έχουν προτεραιότητα ανεξάρτητα από την τιμή.

Επιπλέον, το σύστημα ψύξης παρέχει δυνατότητα ταχείας απόκρισης μέσω ελέγχου ανεμιστήρα μεταβλητής ταχύτητας και αποθήκευσης θερμότητας σε συστήματα κρύου νερού. Κατά τη διάρκεια συμβάντων αιχμής τιμολόγησης, η εγκατάσταση μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως και 15% για διάρκεια 2-4 ωρών αυξάνοντας προσωρινά τις θερμοκρασίες λειτουργίας του διακομιστή εντός αποδεκτών εύρων. Τα οικονομικά οφέλη περιλαμβάνουν τόσο μειωμένο κόστος ενέργειας όσο και έσοδα από την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών, συνολικού ύψους περίπου 3 εκατομμυρίων δολαρίων ετησίως για μια εγκατάσταση 50 MW.

Ερευνητικό Ινστιτούτο Pecan Street

Η ερευνητική πρωτοβουλία Pecan Street στο Ώστιν του Τέξας λειτουργεί τη μεγαλύτερη βάση δεδομένων στον κόσμο για την κατανάλωση ενέργειας των πελατών, με παρακολούθηση δευτερολέπτου προς δευτερόλεπτο της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου και νερού σε πάνω από 1.000 σπίτια εξοπλισμένα με ηλιακούς συλλέκτες, μπαταρίες αποθήκευσης και ηλεκτρικά οχήματα. Η έρευνα που χρησιμοποιεί αυτό το σύνολο δεδομένων έχει δημιουργήσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες του οικιακού DSM και τη συμπεριφορά των καταναλωτών [57]. Η ανάλυση των προτύπων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποκάλυψε ότι χωρίς διαχειριζόμενη φόρτιση, τα ηλεκτρικά οχήματα συνήθως φορτίζουν αμέσως μόλις φτάσουν στο σπίτι νωρίς το βράδυ, συμπίπτοντας με και επιδεινώνοντας την αιχμή του συστήματος.

4. Κεφάλαιο 4 - Τεχνολογικό Πλαίσιο και Υποδομές

4.1. Τεχνολογικό πλαίσιο

Μια από τις πιο διαδεδομένες και η πιο ελπιδοφόρα λύση για την αντιμετώπιση της πρόκλησης διαχείρισης των αιχμών ζήτησης είναι τα έξυπνα δίκτυα (Smart Grids - SG), στα οποία αναπτύσσεται μια έξυπνη υποδομή βασισμένη σε εργαλεία Τεχνολογίας Πληροφοριών και Επικοινωνιών (Information and Communication Technology - ICT) παράλληλα πάντα με το δίκτυο διανομής, διαχειρίζοντας έτσι όλες τις μεταβλητές λήψης αποφάσεων ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί την προσπάθεια που απαιτείται από τους τελικούς χρήστες [58]. Η ύπαρξη ενός τέτοιου ολοκληρωμένου τεχνολογικού πλαισίου με σκοπό την αδιάλειπτη παρακολούθηση φορτίου και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο καθώς και τη δυνατότητα αυτόνομου ελέγχου συσκευών επιτυγχάνεται με την χρήση έξυπνων μετρητών (smart meters), οι οποίοι στόχο έχουν την συλλογή δεδομένων κατανάλωσης με υψηλή απόκριση και μετάδοση αυτών των δεδομένων μέσα Προηγμένων συστημάτων Μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure - AMI) προς τους παρόχους καθώς και τους χρήστες [17], [58].

Επιπρόσθετα με την χρήση αισθητήρων και ασύρματων δικτύων IoT δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου συσκευών και διεργασιών σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ευελιξία διαχείρισης φορτίου [59]. Τα Οικιακά/Βιομηχανικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας - Home/Industrial Energy Management Systems (HEMS/IEMS), έχουν ως στόχο, με τη χρήση αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως το κόστος, τις προσωπικές προτιμήσεις του εκάστοτε χρήστη καθώς και πιθανές πηγές τοπικής παραγωγής ή αποθήκευσης [60].

Τέλος, η αξιοποίηση υποδομών IoT καθώς και cloud συστημάτων, διασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα ενώ επιπρόσθετα η κυβερνοασφάλεια αποτελεί ακόμη ένα κρίσιμο παράγοντα για την προστασία δεδομένων και την αποφυγή κακόβουλων παρεμβάσεων [14], [59].

4.2. Εφαρμογές DSM ανά τον κόσμο

Κάθε ενεργειακό σύστημα απαιτεί και τις κατάλληλες εφαρμογές στρατηγικών Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας όπου φυσικό είναι σε διεθνές επίπεδο να παρατηρούνται αρκετές διαφοροποιήσεις εκτός βέβαια και από σημαντικές ομοιότητες, οι οποίες αντανakλούν τις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε συστήματος καθώς επίσης και το ρυθμιστικό πλαίσιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Ηνωμένο Βασίλειο καθώς και η Γερμανία

όπου αποτελούν ανεπτυγμένες αγορές και το DSM αποτέλεσε από νωρίς βασικό εργαλείο βελτίωσης της αποδοτικότητας του δικτύου.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι πολιτικές εστιάζουν στη δυναμική τιμολόγηση και στη συμμετοχή των καταναλωτών μέσω “έξυπνων μετρητών” και πιλοτικών προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης που στοχεύουν στη μείωση των φορτίων αιχμής ενώ παράλληλα ενισχύουν την ενεργειακή ευελιξία [9].

Μία από τις μεγαλύτερες βιομηχανικές δυνάμεις στην Ευρώπη, η Γερμανία, αξιοποίησε σε μεγάλο βαθμό τα προγράμματα DSM στον τομέα της βαριάς βιομηχανίας, όπου παρέχουν υψηλό δυναμικό ευελιξίας. Με τη ενεργή συμμετοχή στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών, οι βιομηχανίες μπορούν να μειώνουν προσωρινά την κατανάλωση ή να μεταθέτουν τη λειτουργία συγκεκριμένων διεργασιών, υποστηρίζοντας έτσι τη σταθερότητα του δικτύου [10]. Αντίστοιχες εφαρμογές παρατηρούνται και στη Σκανδιναβία, όπου η διαχείριση θερμικών φορτίων μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης (district heating) επιτρέπει την ομαλή ενσωμάτωση των ΑΠΕ [29].

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η πολιτική για τη διαχείριση ζήτησης στην Ισπανία, όπου επικεντρώνεται σε μηχανισμούς διακοψιμότητας (interruptibility schemes), οι οποίοι προσφέρουν οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές για να μειώνουν προσωρινά τη ζήτηση τους σε περιόδους υψηλού φορτίου. Η ενεργειακή ευελιξία στην Ισπανία άλλα και στον τομέα της διαχείρισης ζήτησης ενέργειας υψίστης σημασίας παραγοντες μετά τα φαινόμενα αστάθειας και το blackout της 28ης Απριλίου 2025 στην Ιβηρική χερσόνησο.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής ήδη από τη δεκαετία του 1980 η εφαρμογή DSM ήταν ευρέως διαδεδομένη με τη δημιουργία προγραμμάτων demand response που επέτρεπαν στους καταναλωτές να προσαρμόζουν τη χρήση τους βάσει οικονομικών κινήτρων ή σημάτων του δικτύου [1]. Πλέον, οι πάροχοι ενέργειας χρησιμοποιούν εξελιγμένες πλατφόρμες παρακολούθησης επιτυγχάνοντας ενεργή συμμετοχή τόσο οικιακών όσο και εμπορικών καταναλωτών.

Εκτός από τις ευρωπαϊκές και αμερικανικές προσεγγίσεις, αξίζει να σημειωθεί και η περίπτωση της Κίνας, όπου η υλοποίηση του DSM πραγματοποιείται κυρίως μέσω κρατικών προγραμμάτων εξοικονόμησης ενέργειας και διαχείρισης φορτίου. Δίνεται έμφαση στη βιομηχανική ευελιξία, στη χρήση εξελιγμένων συστημάτων παρακολούθησης και στη σταδιακή ενσωμάτωση μηχανισμών απόκρισης ζήτησης στις τοπικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό δείχνει πώς η συνδυασμένη δράση κρατικού σχεδιασμού και τεχνολογικής καινοτομίας μπορεί να επιτύχει ουσιαστικά αποτελέσματα σε μεγάλη κλίμακα [19], [60].

Η Ινδία αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις στον εφοδιασμό με ηλεκτρική ενέργεια, με συχνές διακοπές φορτίου σε πολλές περιοχές λόγω ανεπαρκούς παραγωγικής ικανότητας και περιορισμών μεταφοράς. Περιορισμοί στην αγροτική προσφορά ανά ώρα έχουν εφαρμοστεί σε ορισμένες πολιτείες, αν και οι προκλήσεις επιβολής και οι ανησυχίες για την ισότητα έχουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα [61].

Ξεχωριστή αναφορά δίνεται στη Γαλλία, όπου η εφαρμογή πολιτικών DSM εστιάζει στη βελτιστοποίηση της ζήτησης σε συνθήκες υψηλής εξάρτησης από την πυρηνική

ενέργεια. Η διαχείριση των αιχμών ζήτησης καθίσταται εξαιρετικά κρίσιμος παράγοντας. Ο εθνικός διαχειριστής (RTE) έχει απαντήσει μηχανισμούς demand response που επιτρέπουν στους καταναλωτές, οικιακούς και βιομηχανικούς, να συμμετέχουν σε αγορές εξισορρόπησης μέσω του προγράμματος NEBEF (Notification d'Échanges de Blocs d'Effacement). Παράλληλα, τα προγράμματα της EDF ενθαρρύνουν την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών (Linky) και τη χρήση ευέλικτων τιμολογίων, όπως τα Tempo και Effacement Jour de Pointe, που παρέχουν ισχυρά κίνητρα για μείωση φορτίου κατά τις ώρες αιχμής [40],[62],[63].

Στην Ελλάδα η εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης ενέργειας βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης με επίκεντρο πολιτικές αυτοπαραγωγής, το net-metering καθώς και την ενίσχυση του ρόλου των prosumers. Γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης μηχανισμών απόκρισης ζήτησης καθώς και εξέλιξη ενεργειακών κοινοτήτων με απώτερο στόχο την διαμόρφωση κατάλληλων προϋποθέσεων ενεργούς συμμετοχής των μικρών καταναλωτών στην συνολική ευελιξία του συστήματος [64].

Οι διεθνείς πρακτικές δείχνουν ότι η Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας δεν αποτελεί ενιαία τεχνολογία, άλλα ένα σύνολο εργαλείων και πολιτικών που προσαρμόζονται στις ανάγκες κάθε ενεργειακής αγοράς. Παρά τις διαφοροποιήσεις κάθε συστήματος, ο κοινός στόχος παραμένει η ενεργειακή αποδοτικότητα, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ καθώς και η ενίσχυση της συμμετοχής του καταναλωτή στη λειτουργία του ενεργειακού συστήματος.

4.3. Ρυθμιστικά & Πολιτικά Κίνητρα

Η επιτυχής εφαρμογή προγραμμάτων Διαχείρισης Ζήτησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμιστικό - πολιτικό πλαίσιο κάθε χώρας καθώς φυσικά επηρεάζεται άμεσα από την γεωγραφική θέση της η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το ποσοστό ευαισθητοποίησης των καταναλωτών και τις συνθήξεις τους. Οι πολιτικές ρυθμίσεις αποτελούν τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στις τεχνολογικές δυνατότητες και στην ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η οδηγία 2019/944/ΕΕ καθιερώνει τη συμμετοχή των καταναλωτών στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, προβλέποντας μηχανισμούς απόκρισης ζήτησης, δυναμικής τιμολόγησης και αγορών ευελιξίας που επιτρέπουν σε καταναλωτές και aggregators να προσφέρουν υπηρεσίες στο δίκτυο [40],[9].

Βασικό μηχανισμό ενεργοποίησης και ενθάρρυνσης των χρηστών αποτελούν επίσης οι πολιτικές δυναμικής τιμολόγησης αφού επιτρέπουν τη μετατόπιση της κατανάλωσης από ώρες αιχμής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Μοντέλα όπως το ToU (Time of Use), το RTP (Real Time Pricing), καθώς επίσης και CPP (Critical Peak Pricing) εφαρμόζονται ήδη σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες, συμβάλλοντας έτσι στην εξομάλυνση του φορτίου και στη μείωση του λειτουργικού κόστους των δικτύων [9], [65]. Η επιτυχία πολιτικών τέτοιου είδους, επιτρέπουν την άμεση ενημέρωση του καταναλωτή και τη διαμόρφωση νέων προτύπων κατανάλωσης [5], [58]. Μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η αποτελεσματικότητα αυτών των μέτρων αυξάνεται σημαντικά όταν συνοδεύονται από διαφανείς ενημερωτικούς μηχανισμούς και κατάλληλες τεχνολογικές υποδομές [66].

Ψηφιακές υποδομές που επιτρέπουν την εφαρμογή μέτρων DSM αποτελούν όπως προειπώθηκε η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, προηγμένα δίκτυα επικοινωνίας (AME/ICT), κεντρικά συστήματα διαχείρισης δεδομένων καθώς και τα πρότυπα ασφαλείας πληροφοριών. Τα παραπάνω αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο [5], [59], [67]. Οι ρυθμιστικές αρχές ορίζουν τις τεχνικές προδιαγραφές, τις απαιτήσεις διαλειτουργικότητας καθώς και τα πρωτόκολλα ανταλλαγής δεδομένων με σκοπό την διασφάλιση της αξιοπιστίας και της προστασίας προσωπικών δεδομένων.

Επιδότησεις για οικιακά συστήματα αυτοματισμού, προγράμματα αναβάθμισης ενεργοβόρων συσκευών και ενισχύσεις για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα χρηματοδοτικών κινήτρων που αποσκοπούν στη διευκόλυνση της υιοθέτησης “έξυπνων” τεχνολογιών. Τέτοια κίνητρα αποτελούν καταλύτες για την ευρεία εφαρμογή DSM σε νοικοκυριά και μικρομεσαίες επιχειρήσεις [68],[19].

5. Κεφάλαιο 5 - Αποτίμηση και Προοπτικές DSM

5.1. Αξιολόγηση οφελών, προκλήσεων και τεχνολογικών περιορισμών

Η Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας (DSM) έχει εξελιχθεί σε έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης, προσφέροντας οικονομικά, τεχνικά και περιβαλλοντικά μέτρα για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στον οικιακό τομέα, η εφαρμογή DSM οδηγεί σε μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας για τους μέσω δυναμικών τιμολογίων, προώθηση της αυτοκατανάλωσης και βελτιστοποίησης της χρήσης έξυπνων συσκευών [19], [68]. Στη βιομηχανία, τα οφέλη σχετίζονται κυρίως με την εξομάλυνση της ζήτησης, τη μείωση του Peak-Average Ratio (PAR) και την καλύτερη αξιοποίηση των παραγωγικών διεργασιών, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση λειτουργικού κόστους και στη συμμετοχή σε αγορές ευελιξίας [10], [29].

Η μείωση της μέγιστης ζήτησης μειώνει τη λειτουργία των μονάδων αιχμής ορυκτών καυσίμων που συνήθως εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εκπομπών και χαμηλή απόδοση. Η μετατόπιση φορτίου από περιόδους αιχμής σε περιόδους εκτός αιχμής μπορεί να αυξήσει την αξιοποίηση της παραγωγής βασικού φορτίου χαμηλότερων εκπομπών και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να περιοριστεί κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης. Μελέτες εκτιμούν ότι τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 0,3-0,8 kg ανά κιλοβατώρα μέγιστης μείωσης, με υψηλότερες τιμές σε συστήματα με παραγωγή ενέργειας έντασης άνθρακα [69].

Οι κατανεμημένοι πόροι απόκρισης ζήτησης ενισχύουν την ανθεκτικότητα σε τοπικές διαταραχές μειώνοντας την εξάρτηση από την κεντρική παραγωγή και τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Τα μικροδίκτυα που ενσωματώνουν τοπική παραγωγή, αποθήκευση και απόκριση ζήτησης μπορούν να διατηρήσουν την υπηρεσία κατά τη διάρκεια διακοπών του δικτύου, παρέχοντας οφέλη ανθεκτικότητας ιδιαίτερα πολύτιμα για κρίσιμες εγκαταστάσεις [70].

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα όμως, η εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης ενέργειας αντιμετωπίζει πολλαπλές προκλήσεις. Η ενεργός συμμετοχή των καταναλωτών παραμένει περιορισμένη λόγω ελλιπούς ενημέρωσης, χαμηλού επιπέδου τεχνολογικής εξοικείωσης και ανησυχιών για την άνεση ή την ιδιωτικότητα δεδομένων [15], [60]. Επιπρόσθετα, στον βιομηχανικό τομέα, υφίστανται εμπόδια όπως ο υψηλός βαθμός αδιάλειπτης λειτουργίας ή η ακαμψία παραγωγικών μονάδων που δυσχεραίνουν την ευέλικτη μετατόπιση φορτίου [37].

Εμφανής είναι η τεχνολογική εξέλιξη υποδομών smart metering, αισθητήρων και αυτοματισμών, όμως εξακολουθούν να υπάρχουν ζητήματα διαλειτουργικότητας, αξιοπιστίας δεδομένων και ανάγκης για υψηλότερο επίπεδο κυβερνοασφάλειας [5], [67]. Οι αλγοριθμικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στη βελτιστοποίηση DSM, συχνά απαιτούν μεγάλα υπολογιστικά φορτία ή κάνουν υποθέσεις που δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως τη μεταβλητότητα πραγματικών προφίλ φορτίου [65], [71].

Η απουσία ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου σε πολλές χώρες, οι περιορισμοί συμμετοχής aggregators καθώς και η αργή, πολλές φορές, προσαρμογή των αγορών ενέργειας, περιορίζουν τη διείσδυση προηγμένων σχημάτων DSM [9], [40]. Η αποτελεσματικότητα των κινήτρων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το επίπεδο ωριμότητας της αγοράς και την ύπαρξη ψηφιακών υποδομών.

5.2. Βιομηχανικά πιλοτικά προγράμματα και εφαρμογές

Στον βιομηχανικό τομέα, τα πιλοτικά προγράμματα DSM/DR εστιάζουν κυρίως σε ενεργοβόρες διεργασίες, με στόχο τόσο την εξισορρόπηση του συστήματος όσο και τη μείωση του ενεργειακού κόστους.

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

- προσαρμογή φορτίου σε βαριά βιομηχανία (αλουμίνιο, χαρτοβιομηχανία, τσιμέντο)
- βέλτιστη χρονοδρομολόγηση παραγωγής με βάση τις τιμές αγοράς
- συμμετοχή σε αγορές επικουρικών υπηρεσιών (ρύθμιση συχνότητας, ρυθμιστική ισχύς)
- συνδυασμός DSM με CHP μονάδες και θερμική αποθήκευση

	Τοποθεσία	Τομέας	Τύπος DSM/DR	Τεχνολογίες	Αποτελέσματα
1	Νορβηγία	Χυτήριο αλουμινίου	Εφεδρεία Συγκράτησης Συχνότητας (FCR)	Αυτοματοποιημένος έλεγχος κυψελών ηλεκτρόλυσης· Επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο με TSO	Διαμόρφωση φορτίου $\pm 5\%$ εντός δευτερολέπτων Σταθερή παροχή FCR Οικονομικά οφέλη
2	Γερμανία	Εργοστάσιο συναρμολόγησης αυτοκινήτων	Βασιζόμενο στην τιμή	Ενσωμάτωση του MES με τις τιμές επόμενης ημέρας Αποθήκευση θερμότητας	Μείωση κόστους ενέργειας $\sim 12\%$ Απόσβεση ~ 3 ετών
3	Φινλανδία	Εργοστάσιο χαρτοπολτού και χαρτιού	Ενσωματωμένο στην αγορά	Βελτιστοποίηση MILP μηχανών λείανσης, χαρτιού Ευελιξία CHP	Σημαντικό οικονομικό δυναμικό Ικανότητα παροχής ενέργειας εξισορρόπησης, καλύπτοντας παράλληλα τους περιορισμούς.
4	ΗΠΑ	Κέντρο δεδομένων υπερκλίμακας	Υβριδικό	Προγραμματισμός εργασιών IT Θερμική αποθήκευση Ανεμιστήρες VFD	$\sim 15\%$ μείωση αιχμής σε στιγμές υψηλού κόστους Ετήσια εξοικονόμηση πολλών εκατομμυρίων
5	Διεθνώς	Χαλυβουργεία και επεξεργασία μετάλλων	Μετατόπιση φορτίου	Βελτιστοποίηση φούρνων Ανάκτηση θερμότητας Προγραμματισμός	Μείωση αιχμής 5–20% Βελτιωμένη ποιότητα ισχύος Μειωμένα λειτουργικά έξοδα
6	ΗΠΑ & ΕΕ	Μεγάλες εγκαταστάσεις (αλυσίδες λιανικής, logistics)	HVAC	Αυτοματοποιημένος έλεγχος BMS Δίκτυα αισθητήρων Προφίλ HVAC που βασίζονται σε TOU	Μείωση φορτίου έως και 20% κατά τη διάρκεια διαδικασιών DR Υψηλή αξιοπιστία
7	Διυλιστήρια	Μεγάλα βιομηχανικά μικροδίκτυα	CHP βελτιστοποίηση / ευελιξία ζήτησης	Μοντέλα σύζευξης θερμότητας-ισχύος	Βελτιωμένη απόδοση CHP Μειωμένες εισαγωγές από το δίκτυο Δυνατότητα μετατόπισης 5–10% ευέλικτων φορτίων

Χαρακτηρίζονται από μεγάλα φορτία, υψηλές απαιτήσεις σε αξιοπιστία & ποιότητα προϊόντος και στενή διασύνδεση με τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα παραδείγματα τήξης αλουμινίου, χαρτοβιομηχανίας και κέντρων δεδομένων δείχνουν ότι ακόμη και περιορισμένες μεταβολές φορτίου ($\pm 5\text{--}15\%$) μπορούν να έχουν σημαντικό οικονομικό όφελος, όταν συνδυάζονται με κατάλληλους μηχανισμούς αγοράς και προηγμένα συστήματα ελέγχου.

5.3. Οικιακά πιλοτικά προγράμματα και εφαρμογές

Στον οικιακό τομέα, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η Διαχείριση Ζήτησης και η Απόκριση Ζήτησης στηρίζεται περισσότερο σε:

- δυναμική τιμολόγηση και προγράμματα Time-of-Use (ToU)
- οικιακούς αυτοματισμούς, HEMS και IoT πλατφόρμες
- συνδυασμό με φωτοβολταϊκά στέγης και οικιακή αποθήκευση
- συμπεριφορικές παρεμβάσεις & feedback προς τον καταναλωτή

	Τοποθεσία	Τομέας / Πιλοτικό	Τύπος DSM/DR	Τεχνολογίες	Αποτελέσματα
1	Ηνωμένο Βασίλειο	Πρόγραμμα “Economy 7” (TOU)	DR βασισμένο στην τιμή (Time-of-Use)	Διπλά τιμολόγια Έξυπνοι μετρητές με ημέρα/νύχτα ζώνες	Σημαντική μετατόπιση φορτίου σε ώρες χαμηλής τιμής Μακροχρόνια επιτυχία
2	Αυστραλία	“Flex Power Play” οικιακή αυτοματοποίηση με Φ/Β & μπαταρίες	Τεχνολογικό DSM για αυτοκατανάλωση	Πλατφόρμα smart home HEMS Εφαρμογή χρήστη	Αύξηση αυτοκατανάλωσης Μείωση εισαγωγών από το δίκτυο Καλύτερος έλεγχος φορτίων
3	ΗΠΑ (Arizona)	Πρόγραμμα APS	Αντίστροφο DR (“pay-to-consume”)	Έξυπνοι μετρητές Κίνητρα σε ώρες surplus	Μείωση curtailment ΑΠΕ Εξομάλυνση καμπύλης ζήτησης Καινοτόμος πρακτική DR
4	ΗΠΑ (Austin, Texas)	“Pecan Street Project” Living Lab	Συνδυαστικό DR (συμπεριφορικό + τεχνολογικό)	AMI υψηλής ανάλυσης Παρακολούθηση ανά συσκευή Δεδομένα EV	Ανάδειξη προβλημάτων αιχμής από ανεξέλεγκτη φόρτιση EV Μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης μέσω διαχείρισης φόρτισης
5	Καναδάς	Πείραμα “Smart Thermostat DR”	Αυτοματοποιημένο DSM σε HVAC	Έξυπνος θερμοστάτης Ασύρματοι αισθητήρες Πολλαπλά τιμολόγια	3.5–5.8 MWh εξοικονόμηση σε 90 ημέρες ~34% βελτίωση ενεργειακής απόδοσης HVAC
6	Ινδία	Οικιακό ToD πιλοτικό	DR βασισμένο στην τιμή (Time-of-Day)	AMI Ενημέρωση χρηστών Ενεργειακό feedback	Σημαντική μείωση κατανάλωσης στις ώρες αιχμής Ενίσχυση ευαισθητοποίησης χρηστών
7	Ευρώπη	Neighborhood-level DSM	Τοπική βελτιστοποίηση κατοικιών	IoT αισθητήρες HEMS Έλεγχος φορτίων σε block κατοικιών	Μείωση peak demand σε επίπεδο γειτονιάς Βελτιστοποίηση λειτουργίας EV & Φ/Β

Ο πυρήνας των πιλοτικών προγραμμάτων Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας είναι η προσαρμογή της συμπεριφοράς του χρήστη (μέσω τιμολόγησης, feedback, εφαρμογών) σε συνδυασμό με αυτοματισμούς (HEMS, έξυπνοι θερμοστάτες, έξυπνες πρίζες). Τα παραδείγματα Flex Power Play, Economy 7 και το πρόγραμμα της Arizona Public Service αναδεικνύουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις: αύξηση αυτοκατανάλωσης, κλασική ToU τιμολόγηση και “αντίστροφη” απόκριση ζήτησης για απορρόφηση πλεονάζουσας παραγωγής ΑΠΕ. Το Pecan Street και οι πειραματικές εφαρμογές έξυπνων θερμοστατών, από την άλλη πλευρά, δείχνουν ότι η λεπτομερής γνώση των προτύπων κατανάλωσης και η στοχευμένη αυτοματοποίηση μπορούν να οδηγήσουν σε ουσιαστικές μειώσεις κόστους και αιχμών, χωρίς σημαντική θυσία άνεσης.

5.4. Μελλοντικές τάσεις

Η ανάγκη για διαρκώς εξελισσόμενα ενεργειακά συστήματα και η αυξανόμενη διείδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθιστούν την Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας κρίσιμο μηχανισμό για τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα των μελλοντικών ηλεκτρικών δικτύων. Οι τάσεις που διαμορφώνονται διεθνώς υποδεικνύουν ότι η DSM θα μεταβεί από παραδοσιακές, στατικές μορφές διαχείρισης σε πιο ευέλικτα, αυτοματοποιημένα μοντέλα.

Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις αφορά την ενσωμάτωση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) στα συστήματα πρόβλεψης φορτίου και βελτιστοποίησης, επιτρέποντας έτσι, ακριβέστερη αναγνώριση προτύπων κατανάλωσης και δυναμικό έλεγχο συσκευών σε πραγματικό χρόνο [65], [71]. Τα μοντέλα ενισχύουν την αυτονομία συστημάτων όπως τα HEMS και επιτρέπουν την πλήρη αυτοματοποίηση της απόκρισης ζήτησης. Επίσης, τα συστήματα DSM αναμένεται να συνδεθούν στενότερα με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS), επιτρέποντάς ευέλικτη αξιοποίηση ενέργειας από ΑΠΕ και ενίσχυση της αποδοτικότητας των μικροδικτύων. Η σύζευξη αυτών των τεχνολογιών προβλέπεται να αποτελέσει κλειδί για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας και την εξισορρόπηση του δικτύου [10], [37].

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου για βιομηχανική πρώτη ύλη και αποθήκευση ενέργειας αντιπροσωπεύει μια ιδιαίτερα σημαντική ευκαιρία, καθώς οι ηλεκτρολύτες μπορούν να διαμορφώσουν τη λειτουργία σε ευρύ φάσμα για να απορροφήσουν την πλεονάζουσα παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να μειώσουν την κατανάλωση κατά τη διάρκεια περιόδων έλλειψης [72].

Ο εκτεταμένη επέκταση της κατανεμημένης παραγωγής, της αποθήκευσης και των ευέλικτων φορτίων μετατρέπει τους καταναλωτές σε παραγωγούς-καταναλωτές που καταναλώνουν και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (prosumers). Οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε στέγες συνεχίζουν να επεκτείνονται, με την οικιακή και εμπορική χωρητικότητα να προβλέπεται να φτάσει τα 500-700 GW παγκοσμίως έως το 2030. Η ανάπτυξη της αποθήκευσης μπαταριών επιταχύνεται ακόμη πιο γρήγορα, λόγω της μείωσης του κόστους και της αυξανόμενης αξίας από πολλαπλές υπηρεσίες, όπως η βελτιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης, η εφεδρική ισχύς και οι υπηρεσίες δικτύου [73].

6. Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα

6.1. Συνοπτική παρουσίαση ευρημάτων

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας αναδεικνύοντάς την ως ένα από τα βασικότερα εργαλεία στη σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση ενώ ταυτόχρονα συμβάλει στην ομαλή λειτουργία των σύγχρονων ηλεκτρικών συστημάτων. Αναδεικνύει την εξέλιξη της Διαχείρισης Ζήτησης από μία απλή στρατηγική εξοικονόμησης, σε ένα ολοκληρωμένο σύνολο στρατηγικών διαχείρισης φορτίου, ικανό να συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του κόστους παραγωγής και στη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου.

Η ανάλυση στους δύο κυρίαρχους τομείς ανέδειξε την διαφορετικότητα όσον αφορά τις ανάγκες αλλά και τις δυνατότητες κάθε κατηγορίας. Ο βιομηχανικός τομέας παρουσιάζει υψηλό δυναμικό ευελιξίας και ιδιαίτερα σημαντικές δυνατότητες εξισορρόπησης της ζήτησης, ενώ από την άλλη πλευρά ο οικιακός τομέας παρουσιάζει μεγάλο αθροιστικό δυναμικό, το οποίο βρίσκεται σε στάδιο ενίσχυσης μετά και την ραγδαία εξάπλωση των έξυπνων μετρητών, των αυτοματισμών και των συστημάτων παρακολούθησης. Το τεχνολογικό πλαίσιο της Διαχείρισης Ζήτησης με τα έξυπνα δίκτυα, τις υποδομές AMI καθώς επίσης τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αναδεικνύεται ως βασικός πυλώνας στο ευρύτερο πλαίσιο εφαρμογής πρακτικών διαχείρισης.

Τέλος, η αξιολόγηση των προοπτικών της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας επιβεβαιώνει την αλληλένδετη σχέση τεχνολογικών, ρυθμιστικών και κοινωνικών παρεμβάσεων με σκοπό την επιτυχή εφαρμογή των στρατηγικών DSM.

6.2. Αξιολόγηση της σημασίας της Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας στη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση

Στόχος των σύγχρονων ενεργειακών πολιτικών αποτελεί η ανάπτυξη ενός βιώσιμου και ευέλικτου ενεργειακού συστήματος και στο πλαίσιο αυτό η Διαχείριση της Ζήτησης αποτελεί βασικό παράγοντα επίτευξης του. Περιορίζοντας το κόστος λειτουργίας και ταυτόχρονα την ανάγκη για νέες επενδύσεις σε επιπρόσθετη παραγόμενη ισχύ, διευκολύνοντας την ένταξη νέων μονάδων ΑΠΕ, δίνοντας κίνητρα για καλύτερη και πιο αποδοτική διαχείριση φορτίου καθώς επίσης, συμβάλλοντας στη μείωση του αποτυπώματος του άνθρακα. Αποτελεί ουσιαστικά τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στη παραγωγή και στις ανάγκες της ζήτησης, παρέχοντας τον απαιτούμενο βαθμό ελέγχου σε ένα ολοένα πιο αποκεντρωμένο ενεργειακό περιβάλλον. Καθημερινά λοιπόν καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε κρίσιμα ζητήματα όπως η ανάπτυξη και η διάδοση τεχνολογιών όπως τα ευφυή μετρητικά συστήματα, η αποθήκευση ενέργειας καθώς και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τα οποία καθιστούν την Διαχείριση της Ζήτησης Ενέργειας και την ορθή εφαρμογή στρατηγικών της, ένα μηχανισμό που αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία.

6.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Παρά την εκτεταμένη πρόοδο των τεχνολογιών και των μηχανισμών Διαχείρισης της Ζήτησης Ενέργειας, η οποία αναδεικνύεται εκτενώς στην παρούσα διπλωματική εργασία, εντοπίζονται σημαντικά πεδία που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Παρακάτω αναλύονται τομείς στους οποίους θα μπορούσε να επικεντρωθεί η μελλοντική έρευνα:

1. Αναλυτική αξιολόγηση πιλοτικών έργων Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας σε ευρωπαϊκό και ελληνικό πλαίσιο με έμφαση στη λειτουργικότητα των έξυπνων μετρητών, στη δυναμική τιμολόγηση καθώς και στη συμμετοχή των καταναλωτών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
2. Αξιολόγηση και διερεύνηση της διαλειτουργικότητας τεχνολογικών υποδομών DSM, όπως AMI, συστήματα αυτοματισμού, HEMS/IEMS και δίκτυο επικοινωνίας, με στόχο την ανάπτυξη κοινών προτύπων.
3. Μελέτη της συμπεριφοράς των καταναλωτών και των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση της ορθής εφαρμογής στρατηγικών DSM. Ανάλυση των κοινωνικών, τεχνολογικών και οικονομικών κριτηρίων με στόχο τη διαμόρφωση αποτελεσματικότερων μοντέλων συμμετοχής.
4. Ανάπτυξη αξιόπιστων μεθοδολογιών αξιολόγησης οικονομικού ισοζυγίου σε εργασιογές DSM σε διαφορετικούς τομείς κατανάλωσης λαμβάνοντας υπόψη τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές παραμέτρους.
5. Περαιτέρω εμβάθυνση στη σχέση Διαχείρισης - Αποθήκευσης ενέργειας. Αξιολόγηση της πραγματικής ικανότητας των συστημάτων αποθήκευσης να ενισχύουν τη συμμετοχή των καταναλωτών και να βελτιώσουν την αξιοπιστία του δικτύου.
6. Ανάλυση και αξιολόγηση των επιπτώσεων της αυανόμενης ηλεκτροκίνησης στη διαμόρφωση των προφίλ ζήτησης και διερεύνηση του ρόλου εφαρμογών V2G/V2H ως μελλοντικών εργαλείων ευελιξίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. W. Gellings, "The concept of demand-side management for electric utilities," *Proc. IEEE*, vol. 73, no. 10, pp. 1468–1470, 1985, doi: 10.1109/PROC.1985.13318.
- [2] K. Wohlfarth, E. Worrell, and W. Eichhammer, "Energy efficiency and demand response – two sides of the same coin?," *Energy Policy*, vol. 137, p. 111070, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111070.
- [3] "Demand Response | Federal Energy Regulatory Commission." Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.ferc.gov/power-sales-and-markets/demand-response>
- [4] C. W. Gellings, "The concept of demand-side management for electric utilities," *Proc. IEEE*, vol. 73, no. 10, pp. 1468–1470, 1985, doi: 10.1109/PROC.1985.13318.
- [5] A. Barbato and A. Capone, "Optimization Models and Methods for Demand-Side Management of Residential Users: A Survey," *Energies*, vol. 7, no. 9, pp. 5787–5824, Sept. 2014, doi: 10.3390/en7095787.
- [6] C. Goldman, "Coordination of Energy Efficiency and Demand Response".
- [7] J. S. Vardakas, N. Zorba, and C. V. Verikoukis, "Performance evaluation of power demand scheduling scenarios in a smart grid environment," *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 164–178, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.060.
- [8] A. Aoun, M. Ghandour, A. Ilinca, and H. Ibrahim, "13 - Demand-side management," in *Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids*, E. Kabalci, Ed., Academic Press, 2021, pp. 463–490. doi: 10.1016/B978-0-12-821724-5.00001-5.
- [9] P. Warren, "A review of demand-side management policy in the UK," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 941–951, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.009.
- [10] H. Golmohamadi, "Demand-side management in industrial sector: A review of heavy industries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 156, p. 111963, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111963.
- [11] N. Lior, "Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to the future," *Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 3976–3994, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.03.034.
- [12] G. Strbac, "Demand side management: Benefits and challenges," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4419–4426, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.030.
- [13] A. L. Palma, A. Flamini, A. Galasso, R. Nissim, L. L. Notte, and B. Di Pietra, "ADLAS: An Integrated Hardware/Software Platform for the Implementation of Demand Side Management Logics in Thermal Energy Communities," in *2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, July 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169149.
- [14] D. Said, "A Survey on Information Communication Technologies in Modern Demand-Side Management for Smart Grids: Challenges, Solutions, and Opportunities," *IEEE Eng. Manag. Rev.*, vol. 51, no. 1, pp. 76–107, 2023, doi: 10.1109/EMR.2022.3186154.
- [15] S. Gyamfi, S. Krumdieck, and T. Urme, "Residential peak electricity demand response—Highlights of some behavioural issues," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 71–77, Sept. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.04.006.
- [16] F. McLoughlin, A. Duffy, and M. Conlon, "Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study," *Energy Build.*, vol. 48, pp. 240–248, May 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.037.
- [17] A. Barbato and A. Capone, "Optimization Models and Methods for Demand-Side Management of Residential Users: A Survey," *Energies*, vol. 7, no. 9, pp. 5787–5824, Sept. 2014, doi: 10.3390/en7095787.
- [18] M. Ghorbaniparvar, X. Li, and N. Zhou, "Demand side management with a human behavior model for energy cost optimization in smart grids," in *2015 IEEE Global*

- Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Dec. 2015, pp. 503–507. doi: 10.1109/GlobalSIP.2015.7418246.
- [19] Z. Guo, K. Zhou, C. Zhang, X. Lu, W. Chen, and S. Yang, “Residential electricity consumption behavior: Influencing factors, related theories and intervention strategies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 399–412, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.046.
- [20] L. Gelazanskas and K. A. A. Gamage, “Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 11, pp. 22–30, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.scs.2013.11.001.
- [21] P. Palensky and D. Dietrich, “Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, Aug. 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2158841.
- [22] M. H. Shoreh, P. Siano, M. Shafie-khah, V. Loia, and J. P. S. Catalão, “A survey of industrial applications of Demand Response,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 141, pp. 31–49, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.07.008.
- [23] H. A. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. R. Yousefi, “Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 243–250, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.05.041.
- [24] A. Faruqui and S. Sergici, “Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments,” *J. Regul. Econ.*, vol. 38, no. 2, pp. 193–225, Oct. 2010, doi: 10.1007/s11149-010-9127-y.
- [25] P. Siano, “Demand response and smart grids—A survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.022.
- [26] B. Zhou *et al.*, “Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 30–40, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.047.
- [27] “IEA – International Energy Agency,” IEA. Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org>
- [28] M. Paulus and F. Borggrefe, “The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 432–441, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.03.017.
- [29] K. Helin, A. Käki, B. Zakeri, R. Lahdelma, and S. Syri, “Economic potential of industrial demand side management in pulp and paper industry,” *Energy*, vol. 141, pp. 1681–1694, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.11.075.
- [30] O. A. Oluokun, O. Akinsooto, O. B. Ogundipe, and S. Ikemba, “Optimizing Demand Side Management (DSM) in Industrial Sectors: A Policy-Driven Approach,” *Int. J. Multidiscip. Res. Growth Eval.*, vol. 5, no. 1, pp. 1009–1021, 2024, doi: 10.54660/IJMRGE.2024.5.1.1009-1021.
- [31] Q. Zhang and I. E. Grossmann, “Enterprise-wide optimization for industrial demand side management: Fundamentals, advances, and perspectives,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 116, pp. 114–131, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.cherd.2016.10.006.
- [32] S. Mitra, I. E. Grossmann, J. M. Pinto, and N. Arora, “Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 38, pp. 171–184, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.09.019.
- [33] P. M. Castro, I. Harjunkoski, and I. E. Grossmann, “New Continuous-Time Scheduling Formulation for Continuous Plants under Variable Electricity Cost,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 14, pp. 6701–6714, July 2009, doi: 10.1021/ie900073k.
- [34] L. Merkert, A. A. Haime, and S. Hohmann, “Optimal Scheduling of Combined Heat and Power Generation Units Using the Thermal Inertia of the Connected District Heating Grid as Energy Storage,” *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 266, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12020266.
- [35] W. Wang, B. Yuan, Q. Sun, and R. Wennersten, “Application of energy storage in integrated energy systems — A solution to fluctuation and uncertainty of renewable

- energy,” *J. Energy Storage*, vol. 52, p. 104812, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104812.
- [36] R. Saidur, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “A review on compressed-air energy use and energy savings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 1135–1153, May 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.013.
- [37] J. Elio, P. Phelan, R. Villalobos, and R. J. Milcarek, “A review of energy storage technologies for demand-side management in industrial facilities,” *J. Clean. Prod.*, vol. 307, p. 127322, July 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127322.
- [38] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [39] B. Parrish, P. Heptonstall, R. Gross, and B. K. Sovacool, “A systematic review of motivations, enablers and barriers for consumer engagement with residential demand response,” *Energy Policy*, vol. 138, p. 111221, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111221.
- [40] B. Williams, D. Bishop, P. Gallardo, and J. G. Chase, “Demand Side Management in Industrial, Commercial, and Residential Sectors: A Review of Constraints and Considerations,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5155, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16135155.
- [41] A. Keshtkar, S. Arzanpour, and F. Keshtkar, “Adaptive residential demand-side management using rule-based techniques in smart grid environments,” *Energy Build.*, vol. 133, pp. 281–294, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.09.070.
- [42] B. N. Alhasnawi *et al.*, “A new Internet of Things based optimization scheme of residential demand side management system,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 16, no. 10, pp. 1992–2006, July 2022, doi: 10.1049/rpg2.12466.
- [43] F. Oldewurtel *et al.*, “Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control,” *Energy Build.*, vol. 45, pp. 15–27, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.022.
- [44] M. H. Nehrir, B. J. LaMeres, and V. Gerez, “A customer-interactive electric water heater demand-side management strategy using fuzzy logic,” in *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)*, New York, NY, USA: IEEE, 1999, pp. 433–436 vol.1. doi: 10.1109/PESW.1999.747494.
- [45] P. S. Dolan, M. H. Nehrir, and V. Gerez, “Development of a Monte Carlo based aggregate model for residential electric water heater loads,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 29–35, Jan. 1996, doi: 10.1016/0378-7796(95)01011-4.
- [46] S. Gottwalt, W. Ketter, C. Block, J. Collins, and C. Weinhardt, “Demand side management—A simulation of household behavior under variable prices,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 12, pp. 8163–8174, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.10.016.
- [47] W. Kempton and J. Tomić, “Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy,” *J. Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 280–294, June 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022.
- [48] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review,” *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 80–94, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [49] J. Hoppmann, J. Volland, T. S. Schmidt, and V. H. Hoffmann, “The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1101–1118, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.068.
- [50] B. P. Esther and K. S. Kumar, “A survey on residential Demand Side Management architecture, approaches, optimization models and methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 342–351, June 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.282.
- [51] D. Setlhaolo and X. Xia, “Combined residential demand side management strategies with coordination and economic analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 79, pp. 150–160, July 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.016.

- [52] R. Stamminger, "Synergy potential of smart domestic appliances in renewable energy systems," Mar. 2009, Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21169482>
- [53] L. G. Swan and V. I. Ugursal, "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1819–1835, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.09.033.
- [54] H. Hadera, I. Harjunkski, G. Sand, I. E. Grossmann, and S. Engell, "Optimization of steel production scheduling with complex time-sensitive electricity cost," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 76, pp. 117–136, May 2015, doi: 10.1016/j.compchemeng.2015.02.004.
- [55] M. Graßl and G. Reinhart, "Evaluating Measures for Adapting the Energy Demand of a Production System to Volatile Energy Prices," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 129–134, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.081.
- [56] A. Wierman, Z. Liu, I. Liu, and H. Mohsenian-Rad, "Opportunities and challenges for data center demand response," in *International Green Computing Conference*, Nov. 2014, pp. 1–10. doi: 10.1109/IGCC.2014.7039172.
- [57] "Dataport," Pecan Street Inc. Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.pecanstreet.org/dataport/>
- [58] A. Barbato, A. Capone, L. Chen, F. Martignon, and S. Paris, "A distributed demand-side management framework for the smart grid," *Comput. Commun.*, vol. 57, pp. 13–24, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.comcom.2014.11.001.
- [59] N. Bressan, L. Bazzaco, N. Bui, P. Casari, L. Vangelista, and M. Zorzi, "The Deployment of a Smart Monitoring System Using Wireless Sensor and Actuator Networks," in *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, Gaithersburg, MD, USA: IEEE, Oct. 2010, pp. 49–54. doi: 10.1109/SMARTGRID.2010.5622015.
- [60] Y. Guo, M. Pan, and Y. Fang, "Optimal Power Management of Residential Customers in the Smart Grid," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 23, no. 9, pp. 1593–1606, Sept. 2012, doi: 10.1109/TPDS.2012.25.
- [61] F. A. Wolak, "The Role of Efficient Pricing in Enabling a Low-Carbon Electricity Sector," *Econ. Energy Environ. Policy*, vol. 8, no. 2, pp. 29–52, 2019.
- [62] RTE, "NEFEB Annual Report 2023: Market Results and Flexibility Mechanisms." [Online]. Available: <https://www.rte-france.com/en/home>
- [63] "Find out about the Linky Meter - EDF Residential." Accessed: Nov. 13, 2025. [Online]. Available: <https://particulier.edf.fr/en/home/contract-and-consumption/meter/linky-meter.html>
- [64] "ANTIMETΩΠΙΣΗ DEMAND RESPONSE MANAGEMENT ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ PROSUMERS."
- [65] E. Sarker *et al.*, "Progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches," *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 36–64, Jan. 2021, doi: 10.1002/er.5631.
- [66] M. S. Bakare, A. Abdulkarim, M. Zeeshan, and A. N. Shuaibu, "A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction," *Energy Inform.*, vol. 6, no. 1, p. 4, Mar. 2023, doi: 10.1186/s42162-023-00262-7.
- [67] X. Jiang, S. Dawson-Haggerty, P. Dutta, and D. Culler, "Design and implementation of a high-fidelity AC metering network".
- [68] S. Panda *et al.*, "Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 3727–3766, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.300.
- [69] S. Kiliccote, D. Olsen, M. D. Sohn, and M. A. Piette, "Characterization of Demand Response in the Commercial, Industrial, and Residential Sectors in the United States," in *Advances in Energy Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2019, pp. 425–443. doi: 10.1002/9781119508311.ch25.
- [70] A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 402–411, July 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.040.

- [71] N. Rezaei, A. Ahmadi, and M. Deihimi, "A Comprehensive Review of Demand-Side Management Based on Analysis of Productivity: Techniques and Applications," *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7614, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15207614.
- [72] M. Götz *et al.*, "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
- [73] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, and I. Staffell, "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies," *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81–100, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.joule.2018.12.008.