



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Βέλτιστη κατανομή λειτουργίας ενεργειακά
κοστοβόρων συσκευών οικιακού καταναλωτή υπό
συνθήκες αβεβαιότητας»*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Δημήτριου Γιαννακάκου

Επιβλέπων

Αντώνιος Παπαβασιλείου, Επίκουρος καθηγητής, ΗΜΜΥ

Αθήνα, Ιούνιος 2023

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία συνεγράφη υπό την επίβλεψη του κ. Παπαβασιλείου Αντώνιου, υπό την πλήρη καθοδήγηση των επιστημονικών συνεργατών κ. Χατζηγιάνη Δημήτριου και κ. Παπακωνσταντίνου Αθανάσιου, τους οποίους και ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξαν. Επιπλέον, ευχαριστώ τους γονείς μου, Χρήστο και Μαρία, καθώς και την αδελφή μου, Ευαγγελία, για τη στήριξη που μου έχουν παρέχει έως σήμερα. Τέλος, δηλώνω την ευγνωμοσύνη μου προς όλους τους φίλους και συγγενείς που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σύνοψη	1
Περίληψη	1
Abstract	3
Summary	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	5
Διαγράμματα	5
Πίνακες	6
Σχήματα.....	7
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	10
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΕΛΙΚΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	10
1.1 Εκσυγχρονισμός μοντέλου λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	10
1.2 Τύποι ηλεκτρικών καταναλωτών	14
1.3 Διαχείριση ζήτησης (DSM) – Απόκριση ζήτησης (DR).....	15
1.4 Κατηγοριοποίηση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης	17
1.4.1 Incentive-Based προγράμματα	18
1.4.1.1 Κλασικά προγράμματα (classical programs).....	18
1.4.1.2 Προγράμματα βασιζόμενα στην αγορά (market-based programs).....	19
1.4.2 Priced-Based προγράμματα.....	20
1.5 Πλεονεκτήματα ευέλικτης ζήτησης (απόκρισης ζήτησης).....	22
1.5.1 Λειτουργικά / οικολογικά πλεονεκτήματα	22
1.5.2 Πλεονεκτήματα σε επίπεδο αγορών ενέργειας / οικονομικά πλεονεκτήματα	25
1.6 Απόκριση ζήτησης οικιακού τομέα.....	27
1.6.1 Κατηγοριοποίηση οικιακών ηλεκτρικών συσκευών.....	30
1.7 Αυτοματοποιημένη απόκριση ζήτησης (Automated demand response)	33
1.7.1 Υποδομές αυτοματοποιημένης απόκρισης ζήτησης	33
1.7.1.1 Τεχνολογικές υποδομές.....	33
1.7.1.1.1 Υποδομές μέτρησης και ελέγχου	34
1.7.1.1.2 Υποδομές επικοινωνίας.....	35
1.7.1.2 Οικιακό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (HEMS)	36
1.8 Προοπτικές / τρέχουσες εξελίξεις απόκρισης ζήτησης.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	41
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	41
2.1 Βελτιστοποίηση διαχείρισης οικιακής ζήτησης	41
2.2 Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης ελαχιστοποίησης κόστους του καταναλωτή.....	42
2.3 Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης βελτιστοποίησης στοιχείων που δεν αφορούν τον καταναλωτή.....	43

2.4 Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης βελτιστοποίησης οικολογικών αποτελεσμάτων	47
2.5 Μελέτες βέλτιστης διαχείρισης οικιακής ζήτησης στοχαστικού προγραμματισμού	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	50
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ/ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	50
3.1 Ντετερμινιστικό μοντέλο (ex-post deterministic model)	50
3.1.1 Πειραματικά δεδομένα.....	50
3.1.1.1 Δεδομένα κατανάλωσης.....	50
3.1.1.2 Δεδομένα παραγωγής ΑΠΕ, υδροηλεκτρικής παραγωγής και φορτίου συστήματος	51
3.1.2 Μεθοδολογία.....	51
3.2 Στοχαστικό μοντέλο (ex-ante stochastic model)	64
3.2.1 Κατασκευή σεναρίων.....	64
3.2.2 Κατασκευή μαθηματικού μοντέλου.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	72
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72
4.1 Ντετερμινιστικό μοντέλο.....	72
4.1.1 Εξοικονόμηση	72
4.1.2 Εκπομπές CO ₂	86
4.2 Στοχαστικό μοντέλο	91
4.2.1 Εξοικονόμηση	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98
ΠΗΓΕΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	104
Διαγράμματα	104
Πίνακες	105
Σχήματα.....	105

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	«Βέλτιστη κατανομή λειτουργίας ενεργειακά κοστοβόρων συσκευών οικιακού καταναλωτή υπό συνθήκες αβεβαιότητας»
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Δημήτριος Γιαννακάκος
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Αντώνιος Παπαβασιλείου, Επίκουρος καθηγητής, ΗΜΜΥ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2022-2023

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού/προγραμματιστικού μοντέλου εύρεσης της βέλτιστης κατανομής λειτουργίας των πιο κοστοβόρων/ενεργοβόρων ηλεκτρικών συσκευών ενός τυπικού οικιακού καταναλωτή μέσα στην ημέρα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών του εξόδων. Η επιδίωξη της βέλτιστης κατανομής λειτουργίας οδηγεί στη διαμόρφωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και η αβεβαιότητα στην τιμή διαφόρων μεταβλητών του προβλήματος, σε συνδυασμό με τις μεθόδους που θα επιστρατευθούν για την επίλυσή του, το εντάσσουν εντός των πλαισίων του στοχαστικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχαστικού προγραμματισμού 2 σταδίων που αναπτύσσεται, επιλύεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python με τη χρήση του optimization solver Gurobi.

Η εργασία διαχωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται θεωρητικά στοιχεία σχετικά με το ρόλο της ευέλικτης ζήτησης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, αναλύεται το φαινόμενο της απόκρισης ζήτησης (DR), οι τρόποι και οι προϋποθέσεις που απαιτούνται για την υλοποίησή του και τα διάφορα πλεονεκτήματα που μπορεί να αποφέρει, καθώς το μοντέλο που αναπτύσσεται βρίσκει εφαρμογή εντός των λειτουργικών πλαισίων του συγκεκριμένου φαινομένου. Καθόλο το κεφάλαιο παρατίθενται ειδικές αναφορές σχετικά με το ρόλο του οικιακού τομέα στην εφαρμογή του φαινομένου. Το δεύτερο κεφάλαιο εμπεριέχει μία βιβλιογραφική αναφορά σε επιστημονικές μελέτες που αναπτύσσουν αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία αφορούν τη διαχείριση της ηλεκτρικής κατανάλωσης οικιακών καταναλωτών, με αναφορές στις διάφορες μαθηματικές μεθόδους που χρησιμοποιούν και τα στοιχεία που επιδιώκουν να βελτιστοποιήσουν. Οι κατηγορίες των μελετών που παρατίθενται αφορούν την ελαχιστοποίηση του κόστους του καταναλωτή, τη βελτιστοποίηση οικολογικών στοιχείων και μελέτες στοχαστικού προγραμματισμού. Το τρίτο κεφάλαιο αφορά το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας με αναφορές στα δεδομένα και τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκαν. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο διαχωρίζεται σε δύο κύρια μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά την ντετερμινιστική εκδοχή του μοντέλου, με τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων να είναι γνωστές. Το δεύτερο μέρος αφορά τη στοχαστική εκδοχή, ενσωματώνοντας την αβεβαιότητα συγκεκριμένων μεταβλητών του προβλήματος. Τέλος, το τέταρτο κεφάλαιο παραθέτει τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των μοντέλων όσον αφορά την εξοικονόμηση χρημάτων για τον καταναλωτή και τη μείωση σε εκπομπές CO₂.

Περίληψη

Παραδοσιακά οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αναβοσβήνουν τις ενεργειακά κοστοβόρες συσκευές τους οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας αυτοί επιθυμούν, βάσει των αναγκών τους, καθώς δε βλέπουν στο λογαριασμό τους κάποια διαφοροποίηση στην τελική αξία του ρεύματος που καταναλώνουν. Τα τελευταία χρόνια όμως, παρατηρείται η τάση, οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας να εξερευνούν λύσεις απόκρισης ζήτησης (demand response) προκειμένου να δώσουν τα κατάλληλα κίνητρα στους καταναλωτές, να καταναλώνουν περισσότερο/λίγότερο βάσει διαφόρων παραμέτρων της αγοράς, όπως είναι οι τιμές εκκαθάρισης της αγοράς (dynamic tariffs), η διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο σύστημα κ.α. Για το λόγο αυτό, οι καταναλωτές θα πρέπει να μπορούν να αναγνωρίζουν είτε μόνοι τους είτε μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών τις βέλτιστες χρονικές στιγμές που θα πρέπει να ενεργοποιήσουν/απενεργοποιήσουν τις ενεργειακά κοστοβόρες συσκευές τους, προκειμένου να αποκομίσουν το μέγιστο δυνατό όφελος από τους παρόχους τους.

Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία θα δίνουν τη δυνατότητα στον εκάστοτε καταναλωτή να αναγνωρίζει τις προαναφερθείσες χρονικές στιγμές, βάσει τόσο των σχετικών με τις τιμές εκκαθάρισης σημάτων (price signals) που προκύπτουν από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και βιώσιμων σημάτων (sustainable signals) που υποδηλώνουν την παραγωγή φθηνής και οικολογικής ενέργειας από ΑΠΕ. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα αναπτυχθεί ένα μοντέλο βέλτιστης κατανομής

λειτουργίας των ενεργειακά κοστοβόρων συσκευών ενός οικιακού καταναλωτή, στηριζόμενο στη μεθοδολογία του στοχαστικού προγραμματισμού. Τα στοχαστικά δεδομένα εισόδου θα είναι οι τιμές εκκαθάρισης της αγοράς, το ποσοστό εγχυόμενης ενέργειας στο σύστημα από ΑΠΕ και η ανελαστική οικιακή κατανάλωση, ενώ οι μεταβλητές απόφασης θα προσδιορίζουν την ενεργοποίηση/σβέση των διαφόρων ενεργειακά κοστοβόρων συσκευών του οικιακού καταναλωτή, λαμβάνοντας υπόψιν τις προτιμήσεις του.

Σε πρώτη φάση αναπτύσσεται μία ντετερμινιστική εκδοχή του μοντέλου που βελτιστοποιεί την κατανομή λειτουργίας των ενεργοβόρων συσκευών βάσει των δεδομένων κατανάλωσης που είναι διαθέσιμα (ex-post deterministic model), με τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος να είναι γνωστές. Έπειτα, παρατίθεται η στοχαστική εκδοχή του, με την ενσωμάτωση των αβεβαιοτήτων των παραμέτρων που προαναφέρονται (ex-ante stochastic model). Η οικονομική διαφοροποίηση, για κάθε διαφορετική κατανομή λειτουργίας των ενεργοβόρων συσκευών, προκύπτει από την τιμολόγηση του καταναλωτή υπό μία υβριδική ταρίφα ToU τεσσάρων μπλοκ που κατασκευάζουμε για τις ανάγκες του μοντέλου και των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από το ποσοστό κάλυψης του φορτίου του συστήματος από παραγωγή ανανεώσιμων πηγών και υδροηλεκτρική παραγωγή.

Λέξεις κλειδιά: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, Ευέλικτη ζήτηση, Απόκριση ζήτησης, Μεταβαλλόμενη τιμολόγηση, Οικονομικά πλεονεκτήματα, Δείσδυση ΑΠΕ, Στοχαστικός προγραμματισμός.

POST-GRADUATE THESIS: *«Optimal operation scheduling of energy consuming household appliances under uncertainty»*

STUDENT: *Dimitrios Giannakakos*

SUPERVISOR: *Antonios Papavasileiou, Assistant professor, ECE*

ACADEMIC YEAR: *2022-2023*

Abstract

The purpose of this thesis is to develop a mathematical/programming model for finding the optimal operation scheduling of the costliest / most energy consuming electrical appliances of a typical residential consumer during a day, in order to minimize his energy costs. The pursuit of the optimal operation scheduling leads to the formulation of an optimization problem and the uncertainty in the value of various variables of the problem, combined with the methods that will be employed to solve it, place it within the framework of stochastic programming. The two-stage stochastic programming optimization problem that is developed, is solved in Python programming language with the use of Gurobi optimization solver.

The work is divided into four chapters. In the first chapter, theoretical evidence is presented regarding the role of flexible demand in electricity systems. In particular, the phenomenon of demand response (DR) is analyzed, the ways and conditions required for its implementation and the various advantages it can bring, as the model developed finds application within the operational frameworks of this particular phenomenon. Throughout the chapter specific references are made regarding the role of the residential sector in implementing the phenomenon. The second chapter contains a literature review of scientific studies that develop corresponding optimization problems, which concern the management of residential consumers' electricity consumption, with references to the various mathematical methods they use and the elements they seek to optimize. The categories of studies listed concern consumer cost minimization, ecological optimization, and stochastic optimization studies. The third chapter concerns the model developed in the context of this work with references to the data and the methodology used. This specific chapter is divided into two main parts. The first part concerns the deterministic version of the model, with the value of the various parameters being known. The second part concerns the stochastic version, incorporating the uncertainty of specific variables of the problem. Finally, the fourth chapter lists the results and conclusions derived from the application of the models in terms of saving money for the consumer and reducing CO2 emissions.

Summary

Traditionally, electricity consumers turn on/off their energy-consuming appliances at any time of the day they wish, based on their needs, as they do not see any difference in the final value of the electricity they consume on their electricity bill. In recent years, however, there has been a trend for electricity retailers to explore demand response solutions in order to provide appropriate incentives to consumers to consume more/less based on various market parameters, such as market clearing prices (dynamic tariffs), the penetration of Renewable Energy Sources (RES) into the system etc. For this reason, consumers should be able to recognize either by themselves or through automated processes the optimal times when they should turn on/off their energy-consuming appliances in order to get the best possible benefit from their retailers.

For this reason, it is considered necessary to develop appropriate mathematical models, which will enable each consumer to recognize the above-mentioned moments, based on both the price signals arising from the electricity market, as well as sustainable signals indicating the production of cheap and ecological energy from RES. In the context of this thesis, a model of optimal operation scheduling of the energy-consuming devices of a residential consumer will be developed, based on the stochastic programming methodology. The stochastic input data will be the market clearing prices, the percentage of energy injected into the system from RES and the inflexible residential consumption, while the decision variables will determine the on/off switching of the various energy-consuming appliances of the residential consumer, taking into account his preferences.

In the first phase, a deterministic version of the model is developed that optimizes the scheduling of the energy consuming appliances' operation based on the available data (ex-post deterministic model), with the values of the various parameters of the problem being known. Then, the stochastic version is listed by incorporating the uncertainties of the aforementioned parameters (ex-ante stochastic model). Economic differentiation, for every different operation scheduling of the energy consuming appliances, is achieved by pricing the consumer under a hybrid ToU tariff consisting of four

blocks which are constructed for the needs of the model and whose prices depend on the percentage of system load covered from renewable generation and hydroelectric generation.

Key words: Electricity demand, Flexible demand, Demand response, Variable pricing, Economic advantages, RES penetration, Stochastic programming.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διαγράμματα

Κεφάλαιο 1

<i>Διάγραμμα 1. 1</i>	Ποσοστό παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από ΑΠΕ.....	12
<i>Διάγραμμα 1. 2</i>	Παγκόσμια εγκατάσταση παραγωγής Φ/Β πάνελ σε οροφές σπιτιών.....	12
<i>Διάγραμμα 1. 3</i>	Παγκόσμια εγκατάσταση ψηφιακά αυτοματοποιημένων συσκευών	13
<i>Διάγραμμα 1. 4</i>	Επενδύσεις σε ψηφιακές υποδομές και λογισμικά στο χώρο των ηλεκτρικών συστημάτων	13
<i>Διάγραμμα 1. 5</i>	Παγκόσμια κατανομή ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά τομέα κατανάλωσης.....	15
<i>Διάγραμμα 1. 6</i>	Σχηματική περιγραφή των μεθόδων διαχείρισης ζήτησης peak shaving/valley filling/load shifting	26
<i>Διάγραμμα 1. 7</i>	Μείωση αιχμής κατανάλωσης συναρτήσει του λόγου τιμής ηλεκτρικού ρεύματος σε περίοδο αιχμής προς τιμή εκτός αιχμής, με και χωρίς χρήση έξυπνης τεχνολογίας (Time of Use τιμολόγηση).....	29
<i>Διάγραμμα 1. 8</i>	Μείωση αιχμής κατανάλωσης συναρτήσει του λόγου τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος σε περίοδο αιχμής προς τιμή εκτός αιχμής, με και χωρίς χρήση έξυπνης τεχνολογίας (Δυναμική τιμολόγηση).....	30
<i>Διάγραμμα 1. 9</i>	Παγκόσμια διαθεσιμότητα απόκρισης ζήτησης σε GW και ως ποσοστό της μέσης ετήσιας ζήτησης κατά τις περιόδους μέγιστης ανάγκης ευελιξίας του συστήματος (2030 για net zero emissions scenario).....	40
<i>Διάγραμμα 1. 10</i>	Διαθεσιμότητα απόκρισης ζήτησης σε TWh και ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης (2040 για Sustainable Development Scenario)	40

Κεφάλαιο 3

<i>Διάγραμμα 3. 1</i>	Τμήμα διαγράμματος συνολικής κατανάλωσης (kWh) - χρόνου (minute).....	52
<i>Διάγραμμα 3. 2</i>	Προφίλ κατανάλωσης τυπικού πλυντηρίου ρούχων (κύκλος με θερμοκρασία νερού 30 °C).....	54

Κεφάλαιο 4

<i>Διάγραμμα 4. 1</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (3/9/2022)	72
<i>Διάγραμμα 4. 2</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (4/9/2022)	73
<i>Διάγραμμα 4. 3</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (5/9/2022)	75
<i>Διάγραμμα 4. 4</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (6/9/2022)	76
<i>Διάγραμμα 4. 5</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (7/9/2022)	77
<i>Διάγραμμα 4. 6</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (8/9/2022)	79
<i>Διάγραμμα 4. 7</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (9/9/2022)	80
<i>Διάγραμμα 4. 8</i>	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (10/9/2022)	82

Διάγραμμα 4. 9	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (11/9/2022).....	83
Διάγραμμα 4. 10	Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (12/9/2022).....	84
Διάγραμμα 4. 11	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (3/9/2022).....	87
Διάγραμμα 4. 12	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (4/9/2022).....	87
Διάγραμμα 4. 13	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (5/9/2022).....	87
Διάγραμμα 4. 14	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (6/9/2022).....	88
Διάγραμμα 4. 15	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (7/9/2022).....	88
Διάγραμμα 4. 16	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (8/9/2022).....	88
Διάγραμμα 4. 17	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (9/9/2022).....	89
Διάγραμμα 4. 18	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (10/9/2022).....	89
Διάγραμμα 4. 19	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (11/9/2022).....	89
Διάγραμμα 4. 20	Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (12/9/2022).....	90
Διάγραμμα 4. 21	Συνολικές εκπομπές gr CO2 ανά ημέρα με και χωρίς load shifting.....	90

Πίνακες

Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1. 1	Βασικότεροι τύποι χρονικά μεταβαλλόμενης τιμολόγησης.....	21
Πίνακας 1. 2	Κατηγοριοποίηση τυπικών οικιακών ηλεκτρικών συσκευών βάσει των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους.....	32
Πίνακας 1. 3	Τεχνολογίες επικοινωνιών στη διαχείριση ζήτησης.....	36

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2. 1	Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης βελτιστοποίησης στοιχείων που δεν αφορούν αποκλειστικά τους καταναλωτές.....	47
---------------------	---	----

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3. 1	Πίνακας μορφής δεδομένων κατανάλωσης.....	50
Πίνακας 3. 2	Πίνακας μορφής δεδομένων logbook.....	50
Πίνακας 3. 3	Χρονοδιάγραμμα δημοσίευσης-εκτέλεσης Ενοποιημένων Προγραμματισμών Συστήματος (ISP).....	51
Πίνακας 3. 4	Πίνακας φορτίων καταναλωτή διαχωρισμένα σε ενεργοβόρα και μη-ενεργοβόρα ..	53
Πίνακας 3. 5	Διαδικασία load disaggregation κατά τη διαδικασία του μαγειρέματος.....	55
Πίνακας 3. 6	Διαδικασία load disaggregation για πλυντήριο πιάτων και πλυντήριο ρούχων.....	56
Πίνακας 3. 7	Χαρακτηριστικά υβριδικής ToU ταρίφας.....	57
Πίνακας 3. 8	Αποτελέσματα κατασκευής υβριδικής ToU ταρίφας (3/9/2022 - 7/9/2022).....	58
Πίνακας 3. 9	Αποτελέσματα κατασκευής υβριδικής ToU ταρίφας (8/9/2022 - 12/9/2022).....	59
Πίνακας 3. 10	Πίνακας σεναρίων τιμών εκκαθάρισης αγοράς (MCP).....	65
Πίνακας 3. 11	Πίνακας σεναρίων ανελαστικής κατανάλωσης.....	66
Πίνακας 3. 12	Πίνακας σεναρίων παραγωγής ΑΠΕ.....	67

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4. 1	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (3/9/2022).....	73
Πίνακας 4. 2	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (4/9/2022).....	74
Πίνακας 4. 3	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (5/9/2022).....	75

Πίνακας 4. 4	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (6/9/2022)	77
Πίνακας 4. 5	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (7/9/2022)	78
Πίνακας 4. 6	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (8/9/2022)	79
Πίνακας 4. 7	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (9/9/2022)	81
Πίνακας 4. 8	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (10/9/2022)	82
Πίνακας 4. 9	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (11/9/2022)	83
Πίνακας 4. 10	Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (12/9/2022)	85
Πίνακας 4. 11	Εκπομπές CO ₂ ανά ημέρα με και χωρίς load shifting	90
Πίνακας 4. 12	Πίνακας συντελεστών εκπομπής grCO ₂ /kWh για το δεκαήμερο μελέτης	91
Πίνακας 4. 13	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 3/9/2022... 92	
Πίνακας 4. 14	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 4/9/2022... 92	
Πίνακας 4. 15	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 5/9/2022... 93	
Πίνακας 4. 16	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 6/9/2022... 94	
Πίνακας 4. 17	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 7/9/2022... 94	
Πίνακας 4. 18	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 8/9/2022... 95	
Πίνακας 4. 19	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 9/9/2022... 95	
Πίνακας 4. 20	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 10/9/2022. 96	
Πίνακας 4. 21	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 11/9/2022. 96	
Πίνακας 4. 22	Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 12/9/2022. 97	

Σχήματα

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1. 1	DSM σε περιβάλλον smart grid	17
Σχήμα 1. 2	Κατηγοριοποίηση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης	21
Σχήμα 1. 3	Πλεονεκτήματα απόκρισης ζήτησης	26
Σχήμα 1. 4	Απλοποιημένη σχηματική περιγραφή της επίδρασης της απόκρισης ζήτησης στην τιμή της αγοράς	27
Σχήμα 1. 5	Αρχιτεκτονική AMI.....	36
Σχήμα 1. 6	Αρχιτεκτονική HEMS	37

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2. 1	Μαθηματικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης διαχείρισης οικιακής ζήτησης	41
-------------------	---	----

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3. 1	Δέντρο σεναρίων προβλήματος.....	71
-------------------	----------------------------------	----

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	PV	Photovoltaic
IoT	Internet of Things	DRP	Demand response provider
DR	Demand response	HPP	Hybrid Power Plant
DLC	Direct Load Control	CAES	Compressed Air Energy Storage
HEMS	Home Energy Management System	LSE	Load Serving Entity
ADR	Automated Demand Response	MCP	Market Clearing Price
AMI	Advanced Metering Infrastructure	ISP	Integrated Scheduling Process
EMS	Energy Management System	EMS	Energy Management System
HAN	Home Area Network		
WAN	Wide Area Network		
IBP	Incentive Based Programs		
PBP	Price Based Programs		
ToU	Time of Use		
CPP	Critical Peak Pricing		
EDP	Extreme Day Pricing		
RTP	Real Time Pricing		
MDMS	Meter Data Management Systems		
EIS	Energy Information Systems		
FERC	Federal Energy Regulatory Commission		
IEA	International Energy Agency		
EPRI	Electric Power Research Institute		
ΦοΣΕ	Φορέας Σωρευτικής Εκπροσώπησης		
MILP	Mixed Integer Linear Programming		
EV	Electric Vehicle		
PAR	Peak to Average Ratio		
TCL	Thermostatically Controlled Load		
CHP	Combined Heat Power		
VPP	Virtual Power Plant		
ESS	Energy Storage System		
EH	Energy Hub		
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΕΛΙΚΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εκσυγχρονισμός μοντέλου λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Το μοντέλο λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εξελίσσεται. Οι περιβαλλοντικοί στόχοι που έχουν τεθεί από τη παγκόσμια κοινότητα, σε συνδυασμό με την επιδίωξη της μέγιστης ενεργειακής αποδοτικότητας και της ελαχιστοποίησης των λειτουργικών εξόδων των συστημάτων, έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην αναζήτηση τακτικών, οι οποίες ως μέρος ενός εκσυγχρονισμένου μοντέλου λειτουργίας, θα συμβάλλουν στην επίτευξη των παραπάνω στόχων. Μία από αυτές τις τακτικές η οποία εξετάζεται έντονα τα τελευταία χρόνια, λόγω των σημαντικών αποτελεσμάτων που μπορεί να αποφέρει και της ανάπτυξης που έχει επέλθει στα πεδία μέτρησης/αποθήκευσης/διαχείρισης των δεδομένων κατανάλωσης και γενικότερα της εξέλιξης των ψηφιακών τεχνολογιών μέτρησης/ελέγχου και επικοινωνίας, είναι η «ενεργοποίηση» της πλευράς της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η εύρεση τρόπων μέσω των οποίων θα καταφέρει να καταστεί ευέλικτη και να αποτελέσει ενεργό συμμετέχων στη διαμόρφωση της λειτουργίας των συστημάτων.

Διαχρονικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηριζόταν στη λειτουργία λίγων και κεντρικών μονάδων παραγωγής, οι οποίες επιδίωκαν την ικανοποίηση ανελαστικής ζήτησης. Χαρακτηριστικά στην Ελλάδα, το μοντέλο λειτουργίας, στο ηπειρωτικό κομμάτι, στηριζόταν σε μεγάλες μονάδες παραγωγής εγκατεστημένες κυρίως στο βόρειο τμήμα της χώρας, λόγω γεωγραφικής διαθεσιμότητας των φυσικών πόρων (λιγνίτης), που ικανοποιούσαν το υπόλοιπο μέρος μέσω του συστήματος μεταφοράς και του δικτύου διανομής. Πριν την απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, παρόμοια μοντέλα μονοπωλιακού χαρακτήρα, επέτρεπαν μία αρκετά απλοποιημένη δομή λειτουργίας και λογική κοστολόγησης των καταναλωτών. Σε οικονομικό επίπεδο, τα λειτουργικά κόστη του συστήματος «μοιράζονταν» στους τελικούς καταναλωτές ανάλογα και μόνο με την ποσότητα ενέργειας που κατανάλωσαν και όσον αφορά τη λειτουργία του συστήματος, η ενέργεια μεταφερόταν μονοκατευθυντικά μέχρι τη ζήτηση όπου και καταναλωνόταν [1]. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων και την συνεχή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, το συγκεκριμένο μοντέλο φανέρωσε αρκετές αδυναμίες, τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο.

Στην προσπάθεια μετάβασης σε οικονομικότερα και οικολογικότερα μοντέλα λειτουργίας, οδηγούμαστε σταδιακά:

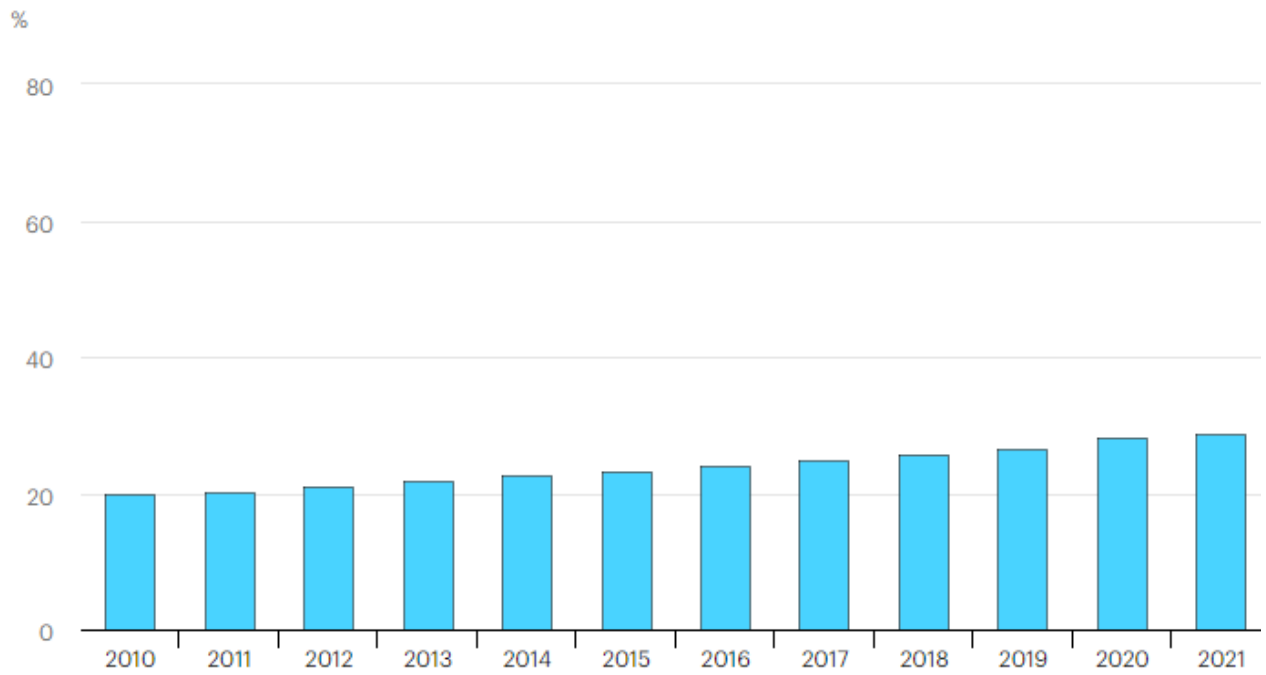
- i. Στην αύξηση της διείσδυσης ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα [Διάγραμμα 1.1] (Decarbonation).
- ii. Στην αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της εγκατάστασης μικρότερων σε ισχύ και περισσότερων σε πλήθος μονάδων παραγωγής, οι οποίες εγκαθίστανται κοντά στην κατανάλωση (π.χ. ηλιακά πάνελ στις οροφές σπιτιών [Διάγραμμα 1.2]) (Decentralization).
- iii. Στη ψηφιοποίηση των στοιχείων των συστημάτων και στην αυτοματοποίηση της λειτουργίας τους. Χαρακτηριστική είναι η αύξηση που παρουσιάζουν τα τελευταία χρόνια οι εγκαταστάσεις ψηφιακά αυτοματοποιημένων συσκευών [Διάγραμμα 1.3] και γενικότερα οι

επενδύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ψηφιακές υποδομές και λογισμικά στο χώρο του ηλεκτρισμού [Διάγραμμα 1.4], ιδιαίτερα στους «έξυπνους» μετρητές (smart meters), οι οποίοι αποτελούν απαραίτητο στοιχείο, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, για τον εκσυγχρονισμένο ρόλο της ζήτησης στη λειτουργία του συστήματος (Digitalization).

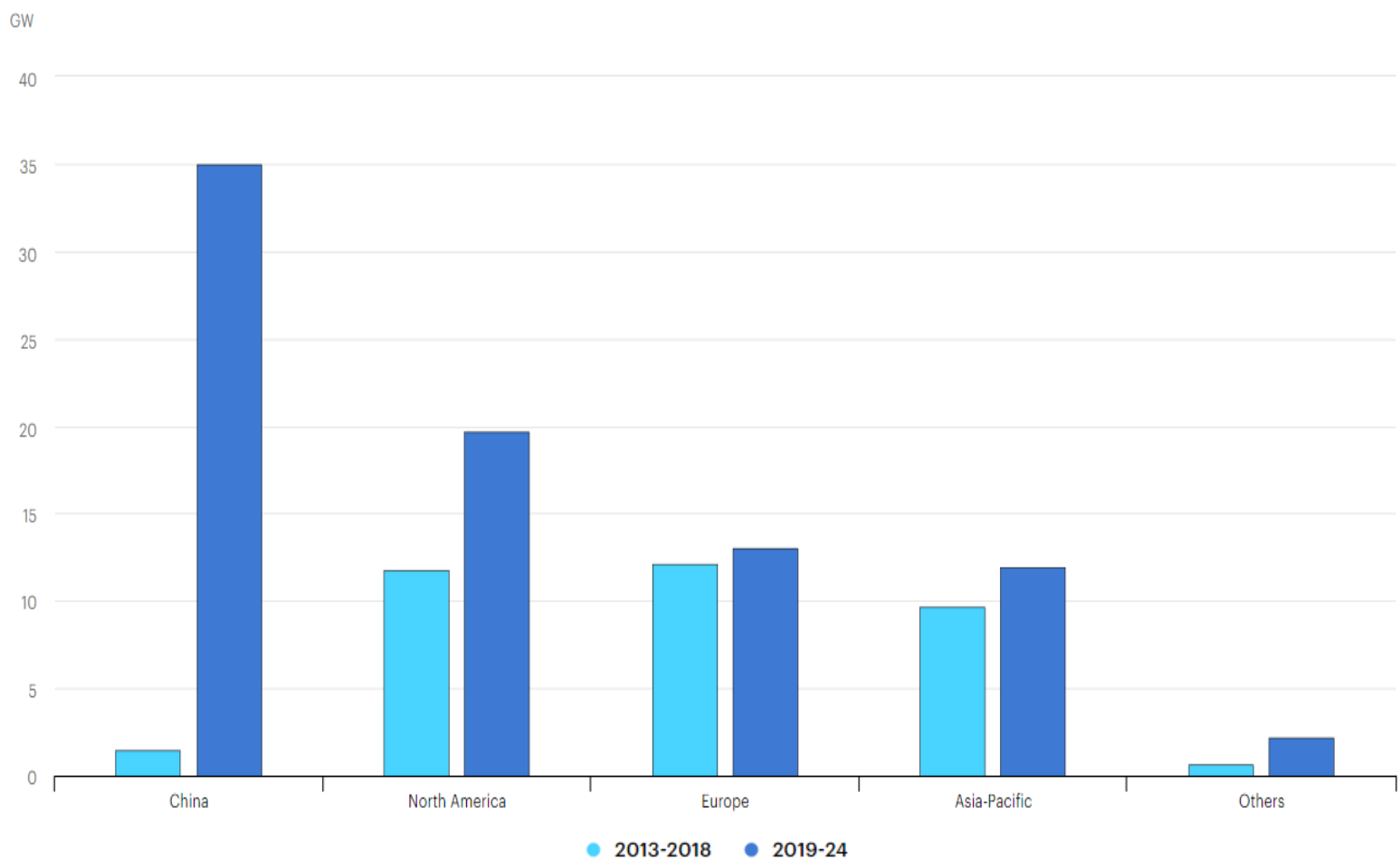
Η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (Decarbonation), η αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Decentralization) και η ψηφιοποίηση των συστημάτων (Digitalization), περιγράφονται ως σύνολο με τον όρο '3Ds of Energy' και αποτελούν τις απαραίτητες μεθόδους μέσα από τις οποίες επιτυγχάνεται η μετάβαση των ηλεκτρικών συστημάτων προς ένα ενεργειακά αποδοτικότερο και περιβαλλοντικά φιλικότερο μέλλον.

Σε επίπεδο υποδομών, η εκσυγχρονισμένη λειτουργία του συστήματος απαιτεί, μεταξύ άλλων, την αναβάθμιση των ηλεκτρικών δικτύων σε δομές οι οποίες θα επιτρέπουν, μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών, τη βέλτιστη ενσωμάτωση των αποδοτικότερων ενεργειακών πόρων στο σύστημα. Ο απώτερος στόχος, μέσα από τη σταδιακή εξέλιξη και ενσωμάτωση των «έξυπνων» τεχνολογιών, είναι η αντικατάσταση των παραδοσιακών ηλεκτρικών δικτύων με «έξυπνα» δίκτυα (smart grids), δηλαδή δίκτυα μέσα στα οποία εκτός από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιπλέον δυνατή η αποθήκευσή της, η διπλή κατεύθυνσή της μέσα στο σύστημα και η δυνατότητα λήψης αποφάσεων από κάθε συμμετέχοντα σε αυτά [2]. Ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας, που στηρίζεται στις δυνατότητες που προσφέρει ένα «έξυπνο» δίκτυο και καθίσταται δυνατός από την ανάπτυξη στον τομέα των ψηφιακών τεχνολογιών, μπορεί να υποστηρίξει την απεξάρτηση από τους ορυκτούς πόρους, μέσω της μεγιστοποίησης της διείσδυσης ενέργειας που παράγουν οι ΑΠΕ, την ενσωμάτωση της αποκεντρωμένης παραγωγής, αλλά και να παράσχει νέες δυνατότητες όσον αφορά το ρόλο των καταναλωτών στη λειτουργία του συστήματος.

Συγκεκριμένα για το ρόλο της κατανάλωσης, η έρευνα επικεντρώνεται σε διάφορες τεχνικές διαχείρισής της, οι οποίες δύνανται να προσδώσουν πρακτικές δυνατότητες ευελιξίας στο φορτίο του συστήματος. Η ευρεία εφαρμογή αντίστοιχων τεχνικών μπορεί να αποφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων τόσο για τους ίδιους τους καταναλωτές, όσο και για το σύστημα ως σύνολο, σε οικονομικό αλλά και σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Μία από αυτές τις περιπτώσεις, η οποία αναλύεται εκτενώς στη συγκεκριμένη εργασία, καθώς το μοντέλο που αναπτύσσεται βρίσκει εφαρμογή εντός των λειτουργικών πλαισίων της, είναι η απόκριση ζήτησης (demand response). Οι επόμενες ενότητες του κεφαλαίου επικεντρώνονται στο συγκεκριμένο φαινόμενο όσον αφορά τα διάφορα στοιχεία διαχείρισης ζήτησης που αναλύονται.

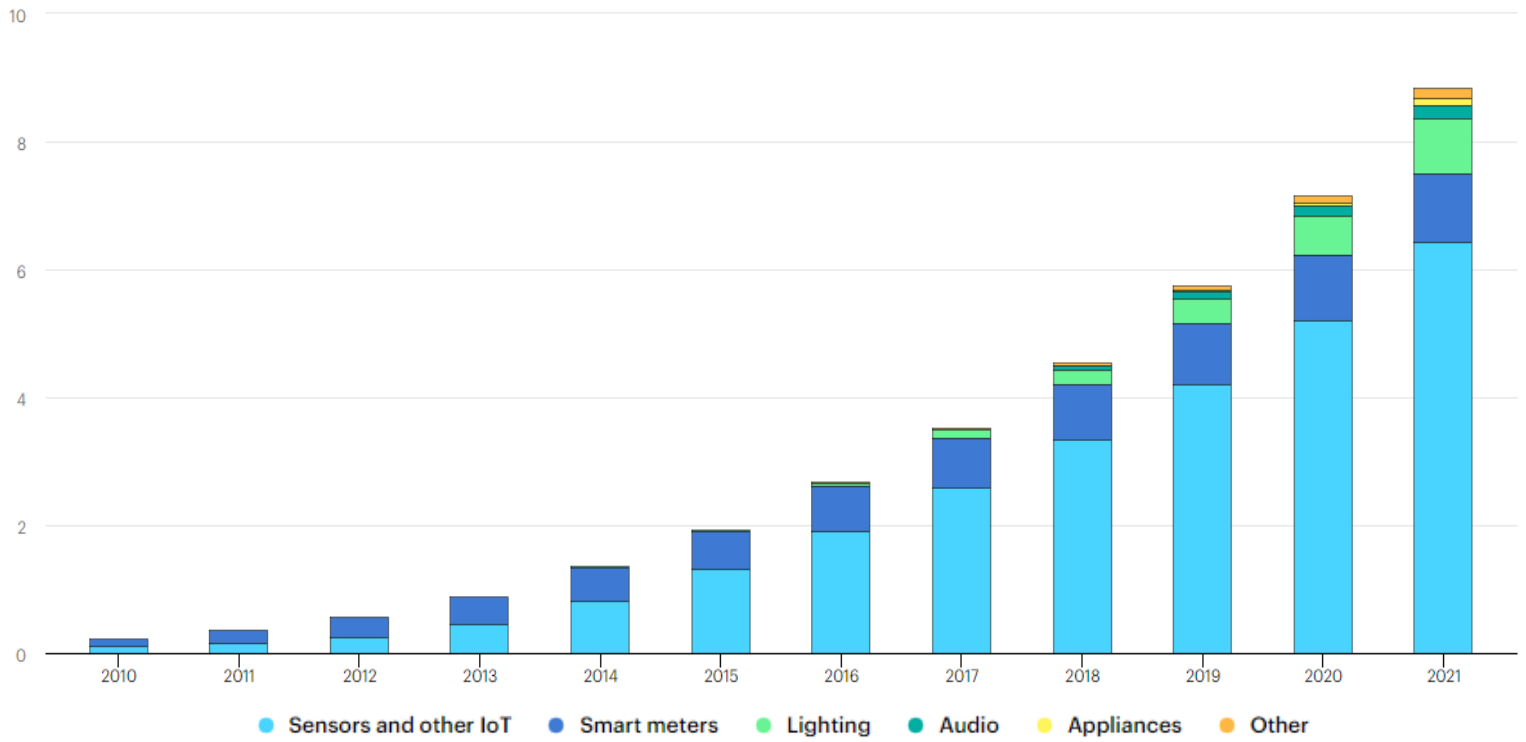


Διάγραμμα 1.1 Ποσοστό παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από ΑΠΕ



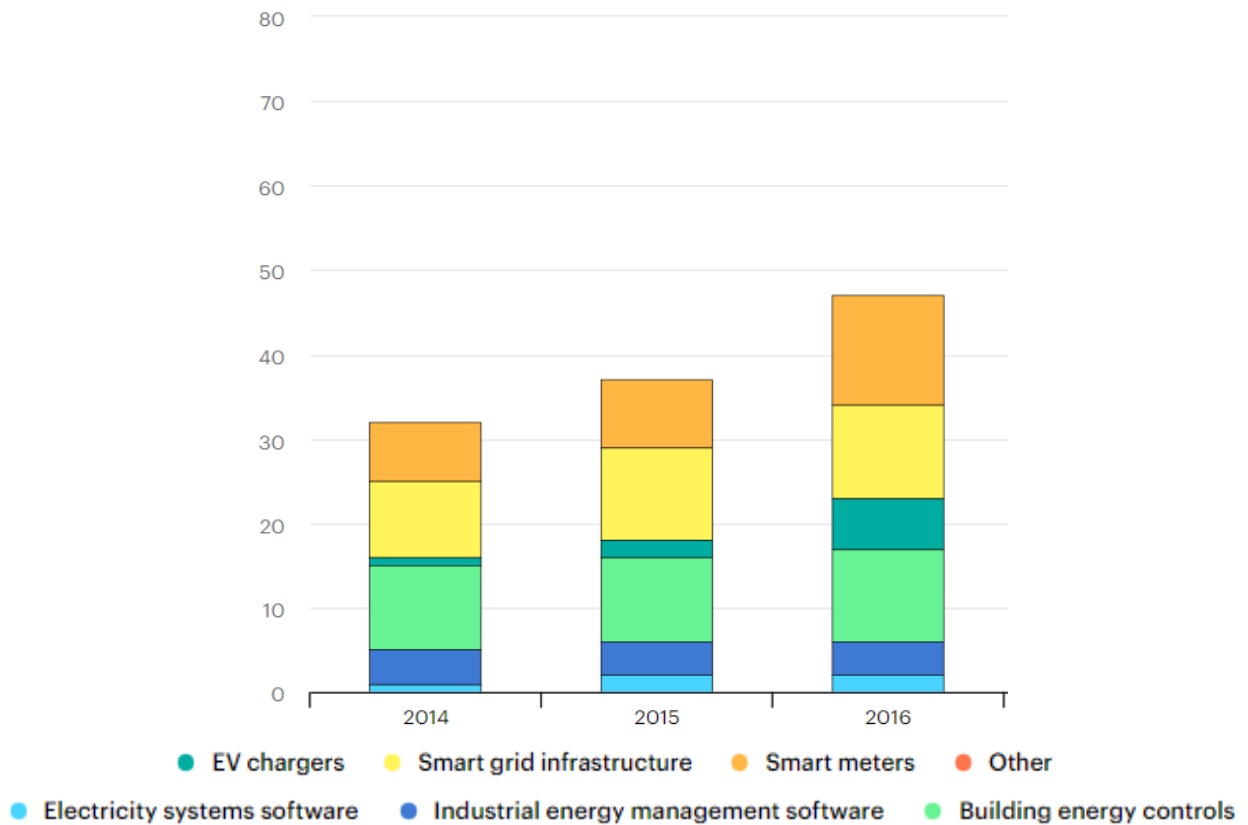
Διάγραμμα 1.2 Παγκόσμια εγκατάσταση παραγωγής Φ/Β πάνελ σε οροφές σπιτιών

billion connected devices



Διάγραμμα 1.3 Παγκόσμια εγκατάσταση ψηφιακά αυτοματοποιημένων συσκευών

USD billion (2016)

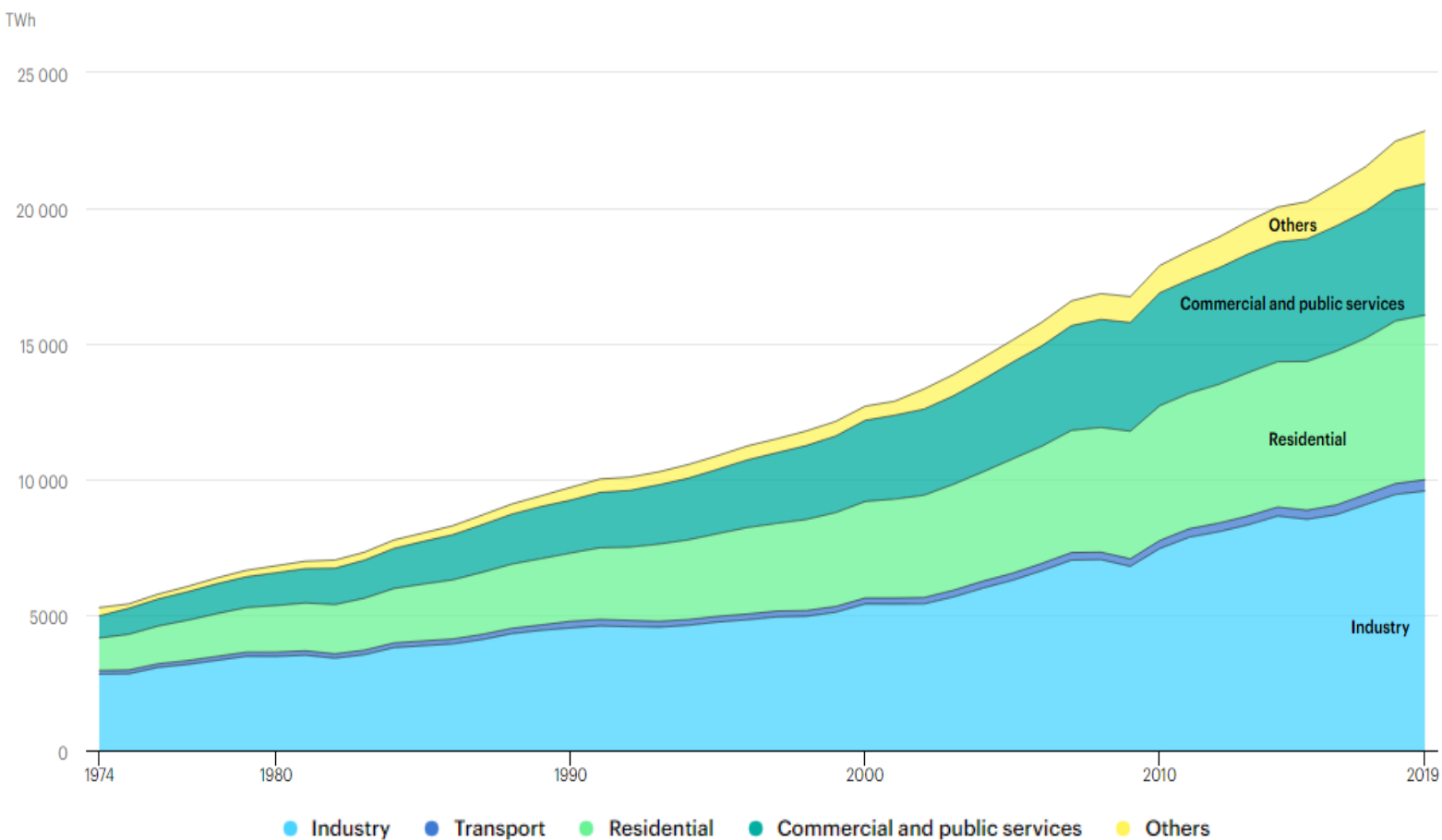


Διάγραμμα 1.4 Επενδύσεις σε ψηφιακές υποδομές και λογισμικά στο χώρο των ηλεκτρικών συστημάτων

1.2 Τύποι ηλεκτρικών καταναλωτών

Οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, κατά σειρά φθίνουσας ισχύος, διαχωρίζονται κυρίως σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τους βιομηχανικούς, τους εμπορικούς και τους οικιακούς καταναλωτές. Κάθε κατηγορία καταναλώνει περίπου το 1/3 της συνολικής ενέργειας του συστήματος [Διάγραμμα 1.5], με ένα αμελητέο ποσοστό να αντιστοιχεί σε άλλους τομείς. Ο τομέας της ηλεκτρικής μετακίνησης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς με την ταχύτατη εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων το αντίστοιχο ποσοστό προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον. Αναφορικά με τα αξιοσημείωτα στοιχεία του προφίλ κατανάλωσης κάθε τομέα, το προφίλ κατανάλωσης των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και του βιομηχανικού εξοπλισμού δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου, όπως του εμπορικού και του οικιακού τομέα, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις παραγωγής που λειτουργούν καθ'όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Ακόμη, για τον εμπορικό τομέα παρατηρείται, όπως είναι λογικό, αύξηση της κατανάλωσης κατά τις εργάσιμες ώρες και σημαντική μείωση τις νύχτες και τα Σαββατοκύριακα. Τέλος, η οικιακή κατανάλωση έγκειται κυρίως στα φορτία θέρμανσης/ψύξης, στο φωτισμό και στη χρήση διαφόρων ενεργοβόρων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών όπως τα πλυντήρια ρούχων/πιάτων και τις συσκευές που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία του μαγειρέματος. Η αύξηση στην κατανάλωση του συγκεκριμένου τομέα παρατηρείται κυρίως κατά τα ζεστά καλοκαιρινά απογεύματα όταν λειτουργούν φορτία ψύξης χώρων και γενικότερα τις απογευματινές προς βραδινές ώρες [4].

Από τα ποσοστά κατανομής της ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά τομέα, συμπεραίνεται ότι ο οικιακός τομέας απασχολεί ένα σημαντικό τμήμα της συνολικής κατανάλωσης. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει σε σχέση με τους υπόλοιπους τομείς όσον αφορά την ευελιξία του, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η κατάλληλη διαχείριση της οικιακής ζήτησης προς την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος μπορεί να αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα. Καθότι η συγκεκριμένη εργασία έγκειται στη δημιουργία ενός μοντέλου βέλτιστης διαχείρισης του προφίλ κατανάλωσης ενός τυπικού οικιακού καταναλωτή, οι επόμενες ενότητες του κεφαλαίου εμπεριέχουν ειδικές αναφορές σχετικά με το συγκεκριμένο τομέα όσον αφορά τα στοιχεία που αναλύονται.



Διάγραμμα 1.5 Παγκόσμια κατανομή ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά τομέα κατανάλωσης

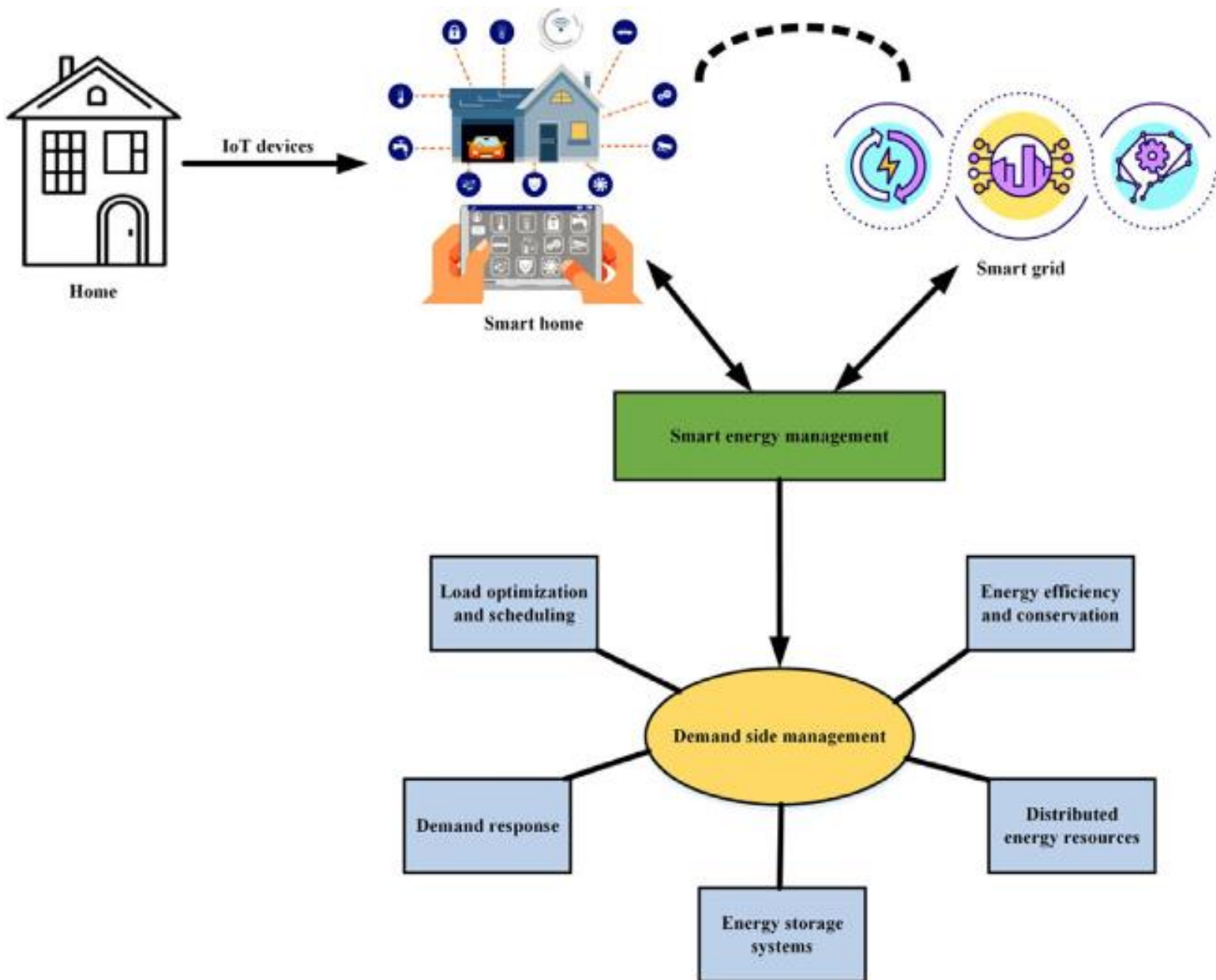
1.3 Διαχείριση ζήτησης (DSM) – Απόκριση ζήτησης (DR)

Ιστορικά η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούταν σχετικά ανελαστική με αποτέλεσμα η παραγωγή να καλείται σε συνεχείς προσαρμογές για την πλήρη ικανοποίησή της και τη διατήρηση της ισορροπίας του συστήματος. Όμως, η προσπάθεια συνεχούς και πλήρους κάλυψης ανελαστικής ζήτησης, όταν μάλιστα αυτή παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές ετησίως, εποχιακά ακόμα και μέσα στην ημέρα, οδηγεί στην αντί-οικονομική και περιβαλλοντικά επιβλαβή λειτουργία του συστήματος, μέχρι και στην κατά περιπτώσεις διακινδύνευση της αξιοπιστίας του. Οι διαχειριστές των συστημάτων, στην προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος, διερευνούν διάφορες τεχνικές διαχείρισης του φορτίου του συστήματος, με την απόκριση ζήτησης (Demand Response) να παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η απόκριση ζήτησης (DR) ορίζεται από τη FERC (Federal Energy Regulatory Commission) ως : «Αλλαγές στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών από τα τυπικά μοτίβα κατανάλωσης τους, ως αντίδραση στη χρονική μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ή σε χρηματικά κίνητρα, με σκοπό τη μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους υψηλών τιμών ή όταν διακινδυνεύεται η αξιοπιστία του συστήματος» [3]. Με λίγα λόγια, οι καταναλωτές που είναι διατεθειμένοι να προσαρμόζουν το προφίλ κατανάλωσής τους, βάσει εντολών ή σημάτων που θα δέχονται από τους παρόχους τους, ως αντάλλαγμα διαφόρων οικονομικών πλεονεκτημάτων που θα τους προσφέρονται / αποφέρονται, μπορούν να συμμετάσχουν άμεσα στη διαδικασία διαχείρισης του φορτίου του

συστήματος και κατ' επέκταση στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που θέτει η ανελαστικότητα της ζήτησης, προς όφελος και των ίδιων αλλά και του συστήματος ως σύνολο.

Το ζητούμενο όσον αφορά την ευελιξία της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι η υλοποίηση των τεχνολογικών υποδομών και των νομοθετικών/λειτουργικών πλαισίων μέσα από τα οποία θα καταστούν δυνατές οι διάφορες μέθοδοι διαχείρισής της. Το γενικότερο φαινόμενο ονομάζεται Demand-Side Management (DSM) και ορίζεται από το EPRI (Electric Power Research Institute) ως : «*Ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η παρακολούθηση των καθημερινών δραστηριοτήτων που είναι σχεδιασμένες για να επηρεάζουν τη χρήση ηλεκτρισμού του καταναλωτή με τέτοιο τρόπο που θα παράγει τις επιθυμητές αλλαγές στο προφίλ φορτίου για τον πάροχο*». Το φαινόμενο της απόκρισης ζήτησης (DR) αποτελεί μία από τις πολλές μεθόδους μέσω των οποίων εφαρμόζεται η διαχείριση της ζήτησης (DSM) [Σχήμα 1.1] και επικεντρώνεται στις μεταβολές που επιβάλλουν οι βραχυπρόθεσμες συνθήκες του συστήματος, βασιζόμενη στην αντίδραση των καταναλωτών που προκύπτει όταν αυτοί παρέχονται με οικονομικά κίνητρα. Συνολικά, η διαχείριση της ζήτησης (DSM) περιλαμβάνει όλες εκείνες τις τακτικές (όχι αποκλειστικά διαχείρισης του φορτίου του συστήματος), που αξιοποιούν με το βέλτιστο τρόπο (και μακροπρόθεσμα) την ενέργεια στο σύστημα. Ο κάθε όρος τείνει να χρησιμοποιείται συχνά αντί του άλλου στη σχετική βιβλιογραφία και τα φαινόμενα έχουν κοινό αποτέλεσμα την αποδοτικότερη/οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, για το φαινόμενο της απόκρισης ζήτησης (DR), η αποδοτικότητα δεν επιτυγχάνεται αποκλειστικά από την εφαρμογή τακτικών που μειώνουν τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στο σύστημα, αλλά κυρίως από την επίτευξη της κατανομής της, στις διάφορες χρονικές περιόδους της ημέρας, που είναι οικονομικότερη για αυτό ως προς την ικανοποίησή της.

Από την περιγραφή του φαινομένου της απόκρισης ζήτησης συμπεραίνεται ότι για την εφαρμογή του απαιτούνται κυρίως δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, η εγκαθίδρυση αξιόπιστων και ικανών διαύλων διμερούς επικοινωνίας καταναλωτών-παρόχων, ώστε από τη μία μεριά οι καταναλωτές να τροφοδοτούνται τακτικά με τις διάφορες εντολές διαχείρισης του φορτίου ή τα διάφορα σήματα που αφορούν το σύστημα (π.χ. διεύθυνση παραγωγής ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα) και την αγορά (π.χ. τιμή ηλεκτρικού ρεύματος σε κάθε χρονική περίοδο), και από την άλλη μεριά οι πάροχοι να δέχονται τακτικά και αναλυτικά τα δεδομένα κατανάλωσής τους. Γενικότερα, κάθε πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης (αναλύονται στην παράγραφο 1.4) απαιτεί, ανάλογα τη μορφή του, την εγκατάσταση απαραίτητου τεχνολογικού εξοπλισμού που αφορά κυρίως τη διαδικασία μέτρησης της κατανάλωσης και την επικοινωνία μεταξύ παρόχου και καταναλωτή. Δεύτερη προϋπόθεση αποτελούν τα ειδικά διαμορφωμένα προγράμματα χρονικά μεταβαλλόμενης τιμολόγησης ή η παροχή άμεσων πληρωμών/χαμηλότερων χρεώσεων, ώστε οι καταναλωτές να βρίσκουν τα οικονομικά κίνητρα που χρειάζονται για να συμμετάσχουν σε μία ανάλογη διαδικασία. Η ύπαρξη οικονομικών επιβραβεύσεων, κάθε μορφής, είναι απαραίτητη για την εφαρμογή του φαινομένου, καθώς ένα προφίλ κατανάλωσης το οποίο διαμορφώνεται από εξωτερικά σήματα και εντολές ενδέχεται να αντιτίθεται σε τυπικές καταναλωτικές συνήθειες και απαιτεί, όπως είναι λογικό, για την επίτευξή του οικονομικά ανταλλάγματα. Η επόμενη υποενότητα περιγράφει αναλυτικότερα τις διάφορες περιπτώσεις προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης και τα οικονομικά πλεονεκτήματα που μπορούν να αποκομίσουν οι καταναλωτές μέσω της συμμετοχής τους σε αυτά.



Σχήμα 1.1 DSM σε περιβάλλον smart grid

1.4 Κατηγοριοποίηση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης

Τα διάφορα προγράμματα απόκρισης ζήτησης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: 1) προγράμματα βασισμένα σε οικονομικά κίνητρα (Incentive-Based programs - IBP) και 2) προγράμματα βασισμένα στην τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος (Price-Based programs - PBP). Η κύρια διαφορά των δύο κατηγοριών είναι ότι στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται τα προγράμματα που προσφέρουν χρηματική επιβράβευση, είτε με τη μορφή άμεσης πληρωμής είτε με τη χρέωση χαμηλότερων τιμών στους καταναλωτές, για τη μείωση συγκεκριμένου ποσού ενέργειας σε μία δεδομένη χρονική περίοδο, ενώ στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται

προγράμματα όπου ο καταναλωτής εθελοντικά προσφέρει μείωση της κατανάλωσής του ως απάντηση σε σήματα (οικονομικά) που δέχεται π.χ. τιμή ηλεκτρικού ρεύματος σε διαφορετικές χρονικές περιόδους της ημέρας [3].

Τα IBP προγράμματα διαχωρίζονται σε κλασικά προγράμματα (classical programs) και προγράμματα βασισμένα στις αγορές (market-based programs). Τα κλασικά προγράμματα διαχωρίζονται με τη σειρά τους σε προγράμματα άμεσου ελέγχου του φορτίου (Direct Load Control – DLC) και προγράμματα διακοπής λειτουργίας των φορτίων (interruptible/curtailable load programs). Τα προγράμματα που βασίζονται στις αγορές περιλαμβάνουν προγράμματα έκτακτης απόκρισης ζήτησης (emergency DR programs), προγράμματα κατάθεσης προσφορών από τη πλευρά της ζήτησης (demand bidding) και προγράμματα συμμετοχής της ζήτησης στις αγορές που διασφαλίζουν α) την αξιοπιστία/διαθεσιμότητα του συστήματος (ancillary markets) και β) την κάλυψη αιχμών φορτίου (capacity markets). Στα κλασικά IBP προγράμματα οι συμμετέχοντες επιβραβεύονται για τη συμμετοχή τους στο πρόγραμμα, με μειωμένες χρεώσεις ή αμεσες πληρωμές. Στα προγράμματα που βασίζονται στις αγορές, οι συμμετέχοντες επιβραβεύονται με χρηματικά ποσά για την απόδοσή τους ανάλογα με το ποσό μείωσης φορτίου που πέτυχαν κατά τις κρίσιμες περιόδους του συστήματος και σε ορισμένες περιπτώσεις απλά για τη δέσμευση της διαθεσιμότητάς τους [5].

Ένας δεύτερος κύριος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει για τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης, είναι εάν τα φορτία είναι ελεγχόμενα από τον ίδιο τον καταναλωτή ή εάν ο έλεγχος συγκεκριμένων φορτίων ανήκει στον πάροχό του. Στη δεύτερη περίπτωση, ο πάροχος έχει τον έλεγχο και μπορεί με δική του απόφαση να απενεργοποιήσει συγκεκριμένα φορτία (με χαρακτηριστικότερη περίπτωση τα φορτία θέρμανσης/ψύξης) ή να μεταβάλλει τα επίπεδα κατανάλωσής τους, αλλάζοντας για παράδειγμα τις ρυθμίσεις ενός θερμοστάτη. Ανάλογα το πρόγραμμα, ο καταναλωτής ειδοποιείται πριν συμβεί μια τέτοια δράση. Προφανώς αυτή η μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη και αμεσότερη ως προς τη διαχείριση του φορτίου του συστήματος, καθώς τότε είναι γνωστή με σχετική ακρίβεια η μείωση κατανάλωσης που μπορεί να συμβεί σε σχέση με την περίπτωση όπου η σβέση των φορτίων είναι καθαρά απόφαση του καταναλωτή και προκύπτει ως αντίδραση σε σήματα τιμών [6]. Μέσω αυτής της τακτικής, η συγκεντρωτική και άμεση διαχείριση μεγάλου πλήθους φορτίων των καταναλωτών, δημιουργεί νέες ευκαιρίες για τους παρόχους όπως η παροχή εφεδρικών υπηρεσιών προς το σύστημα (αναλύεται στην ενότητα 1.5). Ο έλεγχος που διαθέτει ο πάροχος στα φορτία του καταναλωτή, συνήθως περιορίζεται χρονικά σε λίγες ώρες μέσα στην ημέρα, με περαιτέρω λεπτομέρειες να εξαρτώνται από το εκάστοτε συμβόλαιο/πρόγραμμα.

1.4.1 Incentive-Based προγράμματα

1.4.1.1 Κλασικά προγράμματα (classical programs)

Στα προγράμματα άμεσου ελέγχου φορτίου (DLC) οι πάροχοι έχουν τη δυνατότητα να απενεργοποιήσουν τον ηλεκτρικό εξοπλισμό του καταναλωτή ή να μεταβάλλουν τα επίπεδα κατανάλωσής του, με τυπικότερες συσκευές που ελέγχονται στο τομέα της οικιακής κατανάλωσης

να είναι τα κλιματιστικά και οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες. Τα προγράμματα αυτού του είδους απαιτούν την εγκατάσταση ειδικών συστημάτων απομακρυσμένου ελέγχου των φορτίων από τους παρόχους και οι συμμετέχοντες επιβραβεύονται συνήθως με την παροχή άμεσων πληρωμών. Οι οικιακοί καταναλωτές και οι εμπορικοί καταναλωτές μικρής κλίμακας αποτελούν καταλληλότερους υποψήφιους για τα συγκεκριμένα προγράμματα, καθώς οι βιομηχανικές διαδικασίες απαιτούν ακριβείς προγραμματισμούς ηλεκτρικής κατανάλωσης. Τα προγράμματα διακοπής λειτουργίας των φορτίων (interruptible/curtailable programs) στοχεύουν στη μείωση του φορτίου από τους καταναλωτές κατά δεδομένες προκαθορισμένες τιμές μέσα σε περιόδους που ορίζονται από τον πάροχο. Οι συμμετέχοντες επιβραβεύονται με μειωμένες χρεώσεις ή μειώσεις στους λογαριασμούς τους και όσοι δεν ανταποκρίνονται μέσα στις απαιτούμενες περιόδους, επιβαρύνονται με οικονομικές ποινές που εξαρτώνται από τους όρους του εκάστοτε συμβολαίου. Γενικότερα, σε κάθε πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης που περιλαμβάνει άμεση πληρωμή ή χαμηλότερη χρέωση, οι λεπτομέρειες της κοστολόγησης/χρηματικής επιβράβευσης εξαρτώνται από το εκάστοτε συμβόλαιο που προσφέρει ο πάροχος. Αυτό σημαίνει ότι παρέχεται η δυνατότητα για αρκετά ιδιαίτερες μεθόδους κοστολόγησης, όπως για παράδειγμα τη χρέωση χαμηλότερων τιμών συγκεκριμένα για την κατανάλωση του φορτίου που ελέγχει ο πάροχος, έπειτα από εγκατάσταση ειδικής μετρητικής συσκευής σε αυτό.

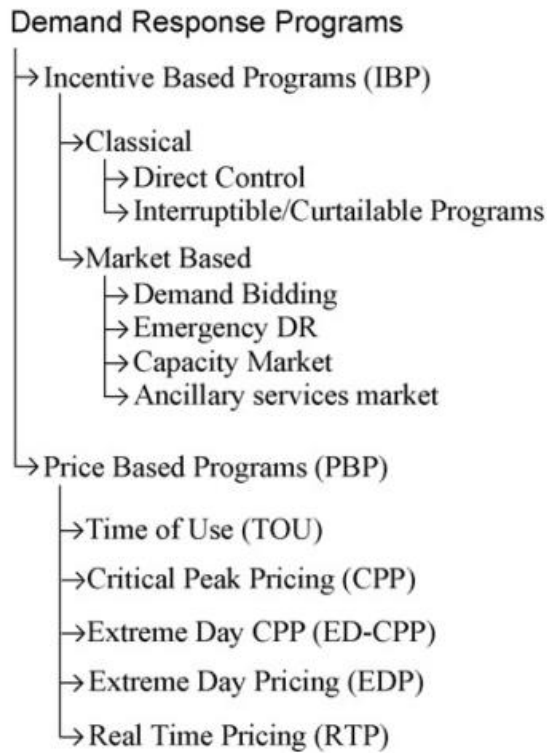
1.4.1.2 Προγράμματα βασισμένα στην αγορά (market-based programs)

Η λειτουργία των προγραμμάτων που περιλαμβάνουν καταθέσεις προσφορών από τη μεριά της ζήτησης (demand bidding) έγκειται στην προσφορά μείωσης της κατανάλωσης κατά ένα συγκεκριμένο ποσό στις διάφορες αγορές ηλεκτρισμού. Η προσφορά γίνεται αποδεκτή αν η τιμή ανά μονάδα μειούμενης ενέργειας που κατατίθεται είναι μικρότερη από την τιμή της αγοράς και όταν γίνει αποδεκτή ο καταναλωτής είναι υποχρεωμένος να μειώσει το φορτίο του κατά τη ποσότητα που αναφέρει στην προσφορά του. Η συμμετοχή μέχρι στιγμής σε τέτοιου είδους προγράμματα είναι δυνατή μόνο σε λίγες χώρες και για καταναλωτές των πολλών MW, με τους καταναλωτές μικρότερης ισχύος να χρειάζονται σε ανάλογες περιπτώσεις τη συσσωρευτική εκπροσώπηση από κάποιον ΦοΣΕ (aggregator) / πάροχο απόκρισης ζήτησης (DRP – Demand Response Provider). Στα προγράμματα έκτακτης απόκρισης ζήτησης (emergency DR programs), οι συμμετέχοντες παρέχονται με οικονομικά κίνητρα για μειώσεις φορτίου που καταγράφονται κατά τη λειτουργία του συστήματος υπό έκτακτες συνθήκες (αστοχία μονάδων παραγωγής, ακραία καιρικά φαινόμενα κ.α.). Τα προγράμματα που συνδέονται με την αγορά κάλυψης αιχμών φορτίου (capacity market programs) προσφέρονται σε καταναλωτές που μπορούν να δεσμευτούν πως θα μειώσουν την κατανάλωσή τους κατά μια προσυμφωνημένη ποσότητα εφόσον προκύψει αύξηση του φορτίου (αιχμή) που τείνει να υπερκαλύψει την παραγωγή. Αναφέρουμε ότι με τον όρο capacity market, όταν πρόκειται για τη μεριά της παραγωγής, περιγράφεται ένας συγκεκριμένος τύπος αγοράς που πληρώνει πόρους για να είναι διαθέσιμοι να καλύψουν αιχμές φορτίου, δηλαδή όχι για παραγωγή ενέργειας αλλά για τη δυνατότητα παραγωγής όταν χρειαστεί. Αντίστοιχα, για τη μεριά της κατανάλωσης, οι καταναλωτές καλούνται να είναι διαθέσιμοι για μείωση της κατανάλωσής τους σε αυτές τις περιπτώσεις. Οι συμμετέχοντες λαμβάνουν κάποια πληρωμή για τη δέσμευσή τους να είναι διαθέσιμοι και επιπλέον πληρωμή αν τελικά χρειαστεί να μειώσουν το φορτίο τους. Συνήθως, λαμβάνουν ειδοποίηση μια ημέρα πριν και αντιμετωπίζουν ποινές αν δεν ανταποκριθούν. Τα προγράμματα που συνδέονται με αγορές που διασφαλίζουν την

αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα του συστήματος (ancillary market programs), επιτρέπουν στον συμμετέχοντα να καταθέσει προσφορές για μείωση της κατανάλωσής του λειτουργώντας ως εφεδρική υπηρεσία για το σύστημα. Γενικώς με τον όρο ancillary market περιγράφεται κάθε αγορά στην οποία διαπραγματεύονται υπηρεσίες που διασφαλίζουν τη λειτουργία και αξιοπιστία του συστήματος πέρα από την παραγωγή και μεταφορά της ενέργειας (π.χ. ρύθμιση συχνότητας). Τα συγκεκριμένα προγράμματα απαιτούν καταναλωτές που μπορούν να εγγραφούν ταχεία μεταβολή της κατανάλωσής τους. Στην ίδια λογική των capacity market προγραμμάτων, οι συμμετέχοντες λαμβάνουν πληρωμές για τη διαθεσιμότητα τους και επιπλέον πληρωμή εάν χρειαστεί να μειώσουν την κατανάλωσή τους.

1.4.2 Priced-Based προγράμματα

Η κατηγορία αυτών των προγραμμάτων βασίζεται στη χρονικά μεταβαλλόμενη τιμολόγηση, όταν δηλαδή οι καταναλωτές δε χρεώνονται με σταθερή τιμή του ρεύματος για κάθε χρονική περίοδο (flat rate tariff). Ο σκοπός αυτών των προγραμμάτων είναι να σταθεροποιήσουν την καμπύλη ζήτησης προσφέροντας υψηλές τιμές κατά τις περιόδους αιχμής και χαμηλές τιμές κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης. Γνωστές μεθόδους αποτελούν η διαφοροποιημένη τιμολόγηση ανάλογα με τη χρονική περίοδο (Time of Use – ToU), η αυξημένη τιμολόγηση κατά τις κρίσιμες αιχμές ζήτησης (Critical Peak Pricing – CPP), κατά τις ακραίες ημέρες (Extreme Day Pricing – EDP) και η τιμολόγηση κατά τον πραγματικό χρόνο (Real Time Pricing – RTP). Ο βασικότερος τύπος αυτών των προγραμμάτων είναι τα ToU προγράμματα [Πίνακας 1.1]. Σε αυτά τα προγράμματα η τιμή διαφοροποιείται σε διαφορετικές περιόδους της ημέρας. Το απλούστερο παράδειγμα αυτής της κατηγορίας εμπεριέχει δύο περιόδους μέσα στην ημέρα, μία εντός αιχμής φορτίου του συστήματος και μία εκτός, με διαφορετική τιμή για τις δύο περιόδους, προφανώς υψηλότερη για την περίοδο αιχμής. Συνηθέστερη πρακτική αποτελεί η χρέωση χαμηλότερων τιμών κατά τις νυχτερινές ώρες. Τα Critical Peak Pricing προγράμματα περιλαμβάνουν υψηλότερο κόστος που υπερτίθεται σε ToU ή σε σταθερή τιμολόγηση και ισχύει σε περιόδους αύξησης της ζήτησης ή πίεσης του συστήματος (που μπορεί να προκληθεί από μη-διαθεσιμότητα εφεδρείας, ακραία καιρικά φαινόμενα κ.α.) και μόνο για λίγες ημέρες και λίγες ώρες το χρόνο. Από την άλλη μεριά, τα Extreme Day Pricing προγράμματα αν και θέτουν υψηλότερες τιμές ακολουθώντας τη λογική των Critical Peak Pricing προγραμμάτων, διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι η αύξηση της τιμής διαρκεί όλο το 24ωρο της ημέρας για την οποία ισχύουν και η οποία είναι συνήθως άγνωστη μέχρι μια ημέρα πριν. Τα Real Time Pricing προγράμματα τιμολογούν τον καταναλωτή με διακυμενόμενες τιμές που ακολουθούν το πραγματικό κόστος παραγωγής. Οι συμμετέχοντες σε αυτά τα προγράμματα συνήθως πληροφορούνται για τις τιμές κάθε προηγούμενη ημέρα ή κάθε προηγούμενη ώρα. Ο τελευταίος τύπος αυτών των προγραμμάτων συνδυάζει τα EDP και CPP προγράμματα (EDP-CPP programs). Σε αυτά τα προγράμματα η αυξημένη τιμολόγηση ακολουθεί τη λογική των CPP προγραμμάτων, αλλά μόνο για τις ειδικές ημέρες των EDP προγραμμάτων.



Σχήμα 1.2 Κατηγοριοποίηση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης

Type of tariffs	Nature of pricing	Illustrative graphical representation
Static ToU pricing	Static	<p>The graph shows a step function where the price (€/kWh) is constant for a period, then jumps to a higher constant value for another period, and then jumps to a lower constant value for a final period. The x-axis is labeled 'Time' and the y-axis is labeled '€/kWh'.</p>
Real time pricing	Dynamic	<p>The graph shows a smooth, continuous curve representing the price (€/kWh) over time. The price fluctuates throughout the period, with a notable peak and a subsequent dip. The x-axis is labeled 'Time' and the y-axis is labeled '€/kWh'.</p>
Variable peak pricing	Combination of static and dynamic	<p>The graph shows a static base price for most of the time, but during a peak period, the price is linked to the market. This is shown as a horizontal line that rises to a higher level (indicated by a green box) and then falls back to the base price. The x-axis is labeled 'Time' and the y-axis is labeled '€/kWh'. A label 'Market linked peak pricing' points to the elevated price level.</p>
Critical peak pricing	Combination of static and dynamic	<p>The graph shows a static base price with sharp, periodic spikes in price. The price is constant at the base level most of the time, but it spikes to a higher constant value for short, regular intervals. The x-axis is labeled 'Time' and the y-axis is labeled '€/kWh'.</p>

Πίνακας 1.1 Βασικότεροι τύποι χρονικά μεταβαλλόμενης τιμολόγησης

1.5 Πλεονεκτήματα ευέλικτης ζήτησης (απόκρισης ζήτησης)

1.5.1 Λειτουργικά / οικολογικά πλεονεκτήματα

Οι υποδομές των ηλεκτρικών συστημάτων είναι σχεδιασμένες για να ανταποκρίνονται στο υψηλότερο επίπεδο ζήτησης, όμως αυτά τα επίπεδα σημειώνονται λίγες φορές μέσα στο χρόνο και διαρκούν συνήθως για λίγες ώρες. Ως εκ τούτου, το σύστημα κατά τις περιόδους εκτός αιχμής συνήθως υποχρησιμοποιείται. Για αυτόν το λόγο, η μείωσή της ζήτησης σε περιόδους αιχμής, είτε απλά με μειωμένη κατανάλωση αυτές τις ώρες είτε με μεταφορά ποσοστού της σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, κρίνεται απαραίτητη για τη μείωση του κόστους των υποδομών του συστήματος και των λειτουργικών του εξόδων. Η ενεργή συμμετοχή της ζήτησης στη λειτουργία του συστήματος, μέσα από τις δυνατότητες που προσφέρει η απόκριση ζήτησης (DR), έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της καμπύλης ζήτησης, και κατ' επέκταση το μετριασμό των απαιτήσεων που το σύστημα καλείται να ικανοποιήσει. Αυτή η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται κυρίως μέσω τριών διαδικασιών που περιγράφονται σχηματικά στο *Διάγραμμα 1.6* και καλούνται με τους όρους peak shaving, valley filling και load shifting. Η ευρεία εφαρμογή αυτών των μεθόδων μπορεί να μειώσει αισθητά το χάσμα μέσης-μέγιστης ζήτησης και να οδηγήσει σε μικρότερες διαστασιολογήσεις των συστημάτων άρα και μείωσης των αντίστοιχων εξόδων όπως οι αντιαποδοτικές συμβατικές μονάδες αιχμής. Ούτως ή άλλως, η αξιοποίηση της απόκρισης ζήτησης μέχρι σήμερα έγκειται κυρίως στην επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου (μείωση αιχμής συστήματος), ο οποίος αποτελεί τον κυριότερο λόγο διερεύνησης τακτικών ελέγχου της ζήτησης.

Η ελαστικότητα της ζήτησης συνεπάγεται ένα πιο ευέλικτο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ως σύνολο. Η ευελιξία του συστήματος επιτρέπει, εκτός των άλλων, τη μεγιστοποίηση διείσδυσης ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Το γεγονός αυτό συμβαδίζει με την κατεύθυνση στην οποία κινείται η παγκόσμια κοινότητα λόγω των περιβαλλοντικών περιορισμών που έχουν τεθεί σχετικά με τη μείωση εκπομπών (κυρίως εκπομπών CO₂), υποβοηθούμενη ταυτόχρονα από την ταχύτερη ανάπτυξη των αντίστοιχων τεχνολογιών που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σε αυτόν τον τομέα. Σε ένα περιβάλλον ευέλικτης ζήτησης, η στοχαστικότητα που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας μπορεί να αντισταθμίζεται από αντίστοιχες μεταβολές της ζήτησης και έτσι να επιτρέπεται η μεγιστοποίηση έγχυσης «πράσινης» ενέργειας στο σύστημα. Με μια απλοϊκή περιγραφή, αυτό θα καθίσταται εφικτό όταν η ζήτηση θα μειώνει ή θα μεταφέρει την κατανάλωσή της από τις περιόδους της ημέρας που η παραγωγή των ΑΠΕ είναι μικρή σε εκείνες που είναι μεγάλη, αποφεύγοντας την απώλεια της φθηνής και οικολογικής ενέργειας κατά τις περιόδους που οι ΑΠΕ εμφανίζουν μεγάλη παραγωγή και η ζήτηση κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα.

Διαχρονικά, οι διακυμάνσεις παραγωγής των ΑΠΕ αντιμετωπίζονταν με ένα συνδυασμό μερικής λειτουργίας συμβατικών μονάδων παραγωγής, διεθνών διασυνδέσεων με συστήματα γειτονικών χωρών και συστημάτων αποθήκευσης [7]. Καθότι αυτές οι διακυμάνσεις είναι συνεχείς και κατά περιπτώσεις ακραίες, απαιτείται η ύπαρξη εφεδρικών συμβατικών μονάδων παραγωγής ήδη διασυνδεδεμένων (και εν λειτουργία) στο σύστημα (διασυνδεδεμένη-στρεφόμενη εφεδρεία / spinning reserve), με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης έπειτα από έντονες μεταβολές παραγωγής των ΑΠΕ. Η συμμετοχή της ζήτησης και ειδικότερα η απόκριση ζήτησης ως μέθοδος διαχείρισης του φορτίου, μπορεί να προσφέρει καινοτόμες λύσεις καθώς η διασυνδεδεμένη εφεδρεία που θα

εξισορροπεί το σύστημα, κατά την υποστήριξη της λειτουργίας του όταν υπάρχει έντονη διείσδυση παραγωγής ανανεώσιμων πηγών, δε θα παρέχεται από την αυξομείωση παραγωγής συμβατικών μονάδων, αλλά από την αυξομείωση κατανάλωσης των φορτίων του συστήματος. Η χαρακτηριστικότερη περίπτωση ακραίων μεταβολών παραγωγής παρατηρείται κατά τη λειτουργία ανεμογεννητριών, όμως ακόμη και για ανανεώσιμες πηγές σχετικά σταθερής παραγωγής όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ, η διαθεσιμότητα εφεδρείας παραμένει απαραίτητη. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια ενός πολύ ζεστού καλοκαιρινού απογεύματος κατά τη δύση του ηλίου (έντονη μείωση παραγωγής Φ/Β), το σύστημα καλείται να καλύψει την αυξημένη κατανάλωση που υπάρχει λόγω λειτουργίας των φορτίων ψύξης και χρειάζεται ταχύτατη αύξηση της παραγωγής. Συμπεραίνεται, ότι ακόμη και στις περιπτώσεις υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα (που σημαίνει χαμηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος) το λειτουργικό κόστος του συστήματος ως σύνολο όταν υποστηρίζει την παραγωγή τους, παραμένει αρκετά υψηλό, γι' αυτό και η κατάλληλη διαχείριση της ζήτησης προς τη μείωσή του κρίνεται απαραίτητη. Δεδομένου ότι η διασυνδεδεμένη εφεδρεία αποτελεί την ακριβότερη περίπτωση εφεδρικής υπηρεσίας, η αξιοποίηση της ζήτησης για αυτό το σκοπό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Γενικότερα, η αξιοποίηση της ζήτησης ως εφεδρεία του συστήματος είναι σημαντική καθώς η συνεισφορά της δεν περιορίζεται μόνο στο βραχυπρόθεσμο ρόλο της διασυνδεδεμένης εφεδρείας. Όταν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αστοχήσει, για παράδειγμα όταν χάνεται η παραγωγή μιας μεγάλης μονάδας, οι διαχειριστές για να αποφύγουν την κατάρρευση του συστήματος (συνήθως με ελεγχόμενα blackouts), αφού εξαντλήσουν τη διασυνδεδεμένη εφεδρεία, στηρίζονται κατά κύριο λόγο στις εφεδρικές μονάδες με δυνατότητα ταχείας σύνδεσης στο σύστημα και εκκίνησης λειτουργίας (μη διασυνδεδεμένη – μη στρεφόμενη εφεδρεία /standing - non-spinning reserve) για την αναπλήρωση της χαμένης παραγωγής μέχρι την αποκατάσταση του προβλήματος. Η κύρια διαφορά διασυνδεδεμένης και μη-διασυνδεδεμένης εφεδρείας, είναι ότι η πρώτη κατηγορία είναι ήδη συγχρονισμένη με τη συχνότητα του συστήματος και μπορεί άμεσα να προσφέρει παραγωγή, σε αντίθεση με τη δεύτερη κατηγορία που απαιτεί λίγα λεπτά για να συγχρονιστεί. Η υψηλή συμμετοχή καταναλωτών σε προγράμματα απόκρισης ζήτησης σχετιζόμενα με αντίστοιχες αγορές (ancillary market programs) όπως και η δυνατότητα άμεσου και συγκεντρωτικού ελέγχου μερικών εκ των φορτίων μεγάλου πλήθους καταναλωτών από τους παρόχους, όταν αυτοί συμμετέχουν για παράδειγμα σε ένα DLC πρόγραμμα, δύναται να προσφέρουν, με ένα διαφορετικό τρόπο, στο σύστημα την εφεδρεία που χρειάζεται εκείνη τη στιγμή για να μην καταρρεύσει, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του.

Σύμφωνα με τον Joseph H. Eto (2007) [8], ο έλεγχος της ζήτησης ως διασυνδεδεμένη εφεδρεία παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον αρχικά γιατί ελέγχοντας τα κατάλληλα φορτία (στη συγκεκριμένη μελέτη τα A/Cs) η διατάραξη της άνεσης του καταναλωτή είναι ανεπαίσθητη και δεύτερον γιατί αποδεικνύεται ότι η επιθυμητή μείωση φορτίου μπορεί να επιτευχθεί πλήρως μέσα σε περίπου 20 δευτερόλεπτα, αντίθετα με την περίπτωση παροχής εφεδρείας από συμβατικές μονάδες παραγωγής όπου δίνεται περιθώριο έως και 10-15 λεπτά για να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα λειτουργίας. Μπορεί στη συγκεκριμένη μελέτη ο συγγραφέας να επικεντρώνεται στη λειτουργία των A/Cs, όμως κάτι τέτοιο φαίνεται να βρίσκει καλή εφαρμογή γενικότερα στα θερμικά φορτία, καθώς το ζητούμενο της λειτουργίας τους είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας

εντός ενός προκαθορισμένου θερμοκρασιακού εύρους και για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (π.χ. όταν υπάρχει ανθρώπινη παρουσία στο χώρο για τα A/Cs), με αποτέλεσμα να είναι εφικτή σε πολλές περιπτώσεις η άμεση μεταβολή της κατανάλωσης τους, η μεταφορά σημαντικού ποσοστού της σε διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσα στην ημέρα, ακόμη και η πλήρης απενεργοποίησή τους για κάποιο χρονικό διάστημα [7]. Σε σχετικές αναφορές, ο D.Milborough (2009) [9] αναφέρει ότι η εκμετάλλευση των ψυγείων στο Ηνωμένο Βασίλειο ως πρωτεύουσα και δευτερεύουσα εφεδρεία (στιγμιαία αντίδραση και αντίδραση λίγων δευτερολέπτων αντίστοιχα) μπορεί να υποκαταστήσει 1 GW παραγωγής, ενώ οι H.Hao et al. (2012) [10] επισημαίνουν ότι το 70% της δευτερεύουσας εφεδρείας των ΗΠΑ μπορεί να καλυφθεί μόνο από A/Cs και ανεμιστήρες. Οι J. L. Mathieu et al. (2010) [11], επισημαίνουν ότι η δυνατότητα άμεσης μεταβολής της κατανάλωσης ορισμένων τύπων φορτίων μπορεί να επιφέρει ως σύνολο, σε ένα περιβάλλον υψηλής συμμετοχής απόκρισης ζήτησης, ταχύτερη μεταβολή της ζήτησης από τη μεταβολή παραγωγής που μπορούν να προσφέρουν οι συμβατικές εφεδρικές μονάδες, καθώς οι λειτουργικοί περιορισμοί που ισχύουν για αυτές θέτουν συγκεκριμένα χρονικά όρια σχετικά με τη δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού παραγωγής τους (ramping rate).

Η αξιοποίηση της ζήτησης ως παροχή εφεδρείας για το σύστημα αποφέρει σημαντικά οφέλη τόσο σε οικονομικό, όσο και σε οικολογικό επίπεδο. Προφανώς η αντικατάσταση των συμβατικών μονάδων συνεπάγεται μειωμένες εκπομπές ρύπων και CO₂. Ακόμη, από οικονομικής άποψης, η χρήση συμβατικών μονάδων για αυτές τις διαδικασίες είναι αρκετά κοστοβόρα για αρκετούς λόγους. Αρχικά, η διασυνδεδεμένη εφεδρεία αποτελείται από μονάδες που είναι αναγκασμένες να λειτουργούν για να παραμένουν συγχρονισμένες με το σύστημα ακόμη και αν δεν προσφέρουν παραγωγή σε αυτό. Επιπλέον, η λειτουργία αυτή είναι αντί-αποδοτική καθώς πραγματοποιείται σε μερικό φορτίο (part load) που κατά κανόνα για τις μονάδες φυσικού αερίου, που συνήθως χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό, συνεπάγεται μειωμένο βαθμό απόδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μονάδες, προκειμένου να μπορούν να αυξομειώσουν γρήγορα τα επίπεδα παραγωγής τους, χρειάζεται να βρίσκονται σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας [7]. Αντίθετα, αν θεωρητικά όλη η ευελιξία που απαιτεί το σύστημα καλυπτόταν από τη μεταβολή της κατανάλωσης, όλες οι απαραίτητες συμβατικές μονάδες θα μπορούσαν να διατηρήσουν μία σταθερή και άρα αποδοτική παραγωγή.

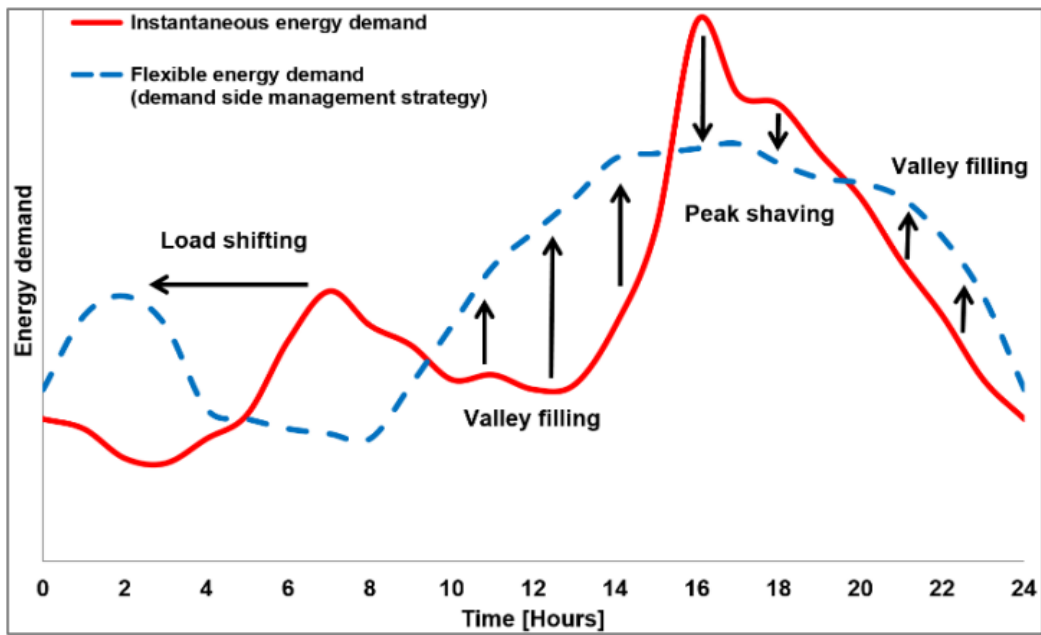
Παράλληλα, ένα σύστημα με μεγάλες και συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις, απαιτεί τακτικές αντικαταστάσεις και αναβαθμίσεις των υποδομών του (π.χ. γραμμές μεταφοράς/διανομής, μετασχηματιστές) οι οποίες είναι αρκετά δαπανηρές και μπορούν να αποφευχθούν όταν γίνεται σωστή διαχείριση της ζήτησης προς την επίτευξη στόχων όπως η μείωση της αιχμής του συστήματος, ο έλεγχος της τάσης και η αποτροπή του κορεσμού. Ο κορεσμός των συστημάτων, δηλαδή η ανεπάρκεια των γραμμών να μεταφέρουν την επιθυμητή ποσότητα ενέργειας και προβλήματα σχετιζόμενα με τη τάση του δικτύου, αν και προς το παρόν δεν αποτελούν μείζοντα προβλήματα για τα περισσότερα δίκτυα, προβλέπεται λόγω της συνεχούς αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα της έντονης παρουσίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων) και αντίστοιχα της αύξησης της αποκεντρωμένης παραγωγής, να απασχολήσουν τους διαχειριστές των συστημάτων στο μέλλον. Όσον αφορά τις εισαγωγές/εξαγωγές ενέργειας, η αποτελεσματική χρήση της απόκρισης ζήτησης θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη, αφού αυτές θα πραγματοποιούνται μόνο όταν θα είναι συμφέρουσες οικονομικά και όχι κατ' ανάγκη

για την εξισορρόπηση του συστήματος [7]. Τέλος, υπάρχει μεγάλο πλήθος μελετών που ερευνούν τη σημασία της απόκρισης ζήτησης στην αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος, όπως οι μελέτες των L. Goel, Q. Wu, P. Wang (2006) [12] όπου αναφέρεται ότι η απόκριση ζήτησης σε πλαίσια απελευθερωμένων αγορών αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος και των S. Mohagheghi, F. Yang, B. Falahati (2011) [13] όπου αναλύεται η δυνατότητα της απόκρισης ζήτησης να βελτιώσει την αξιοπιστία του δικτύου διανομής.

1.5.2 Πλεονεκτήματα σε επίπεδο αγορών ενέργειας / οικονομικά πλεονεκτήματα

Από τη μεριά του καταναλωτή τα οικονομικά οφέλη είναι προφανή. Όλα τα λειτουργικά πλεονεκτήματα που περιγράφονται στην παραπάνω υποενότητα οδηγούν στην οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος και αντικατοπτρίζονται τελικά στη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος για κάθε καταναλωτή, στις περιπτώσεις ευρείας εφαρμογής της απόκρισης ζήτησης, ακόμα και αν αυτός δε συμμετέχει σε κάποιο ειδικό πρόγραμμα [5]. Για έναν συμμετέχοντα σε πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης, η σωστή διαχείριση της κατανάλωσής του ανάλογα με τη χρονικά διαφοροποιημένη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος ή η υπακοή των εντολών μείωσης της κατανάλωσής του κατά τις απαιτούμενες χρονικές περιόδους, σημαίνει ανάλογα το πρόγραμμα στο οποίο συμμετέχει, είτε εξοικονόμηση χρημάτων είτε χρηματική επιβράβευση. Για έναν οικιακό καταναλωτή, η συμμετοχή σε τέτοιου είδους προγράμματα κρίνεται από το αν είναι διατεθειμένος και διαθέσιμος να προσαρμοστεί σε ένα προφίλ κατανάλωσης που διαμορφώνεται από το πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης στο οποίο συμμετέχει, ώστε η εξοικονόμηση χρημάτων που αποφέρεται ή η χρηματική επιβράβευση που παρέχεται, να είναι σημαντικότερη για τον ίδιο από τη διατήρηση ενός άνετου προφίλ κατανάλωσης το οποίο δε διαμορφώνεται από εξωτερικά σήματα και εντολές, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψιν πιθανά κόστη εγκατάστασης απαραίτητου τεχνολογικού εξοπλισμού και πιθανές οικονομικές ποινές που φέρει η συμμετοχή σε ανάλογα προγράμματα.

Ακόμη, η απόκριση ζήτησης, μπορεί να επηρεάσει τις αγορές ηλεκτρισμού. Όταν η ζήτηση αντιδρά σε τοπικά διαφοροποιημένες και χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές ηλεκτρισμού, η «δύναμη» των παραγωγών περιορίζεται αποτρέποντας έτσι τη δυνατότητα χειραγώγησης της αγοράς [5] [Σχήμα 1.4] και μειώνοντας τη διακύμανση της τιμής σε περιόδους αιχμής [14], όπως γενικότερα και τη διακύμανση της τιμής στην χονδρική αγορά (wholesale market) [5]. Η συμμετοχή της ζήτησης στις αγορές ενέργειας είναι απαραίτητη για τη λειτουργία ενός μοντέλου πλήρους ανταγωνισμού, δυστυχώς όμως, όπως αναφέρθηκε, ακόμα και για τις αγορές που επιτρέπουν την υποβολή προσφορών μείωσης της κατανάλωσης από τη μεριά της ζήτησης, δηλαδή προσφορές μείωσης της κατανάλωσης κατά μία δεδομένη ποσότητα με αντάλλαγμα την πληρωμή σε μία δεδομένη τιμή ανά μονάδα μειούμενης ενέργειας, η συμμετοχή συνήθως περιορίζεται σε προσφορές τουλάχιστον της τάξεως των MW, επιτρέποντας έτσι τη συμμετοχή μόνο μεγάλων καταναλωτών και αποκλείοντας τον οικιακό τομέα όταν δεν είναι διαθέσιμη η συμμετοχή μέσω ΦοΣΕ.

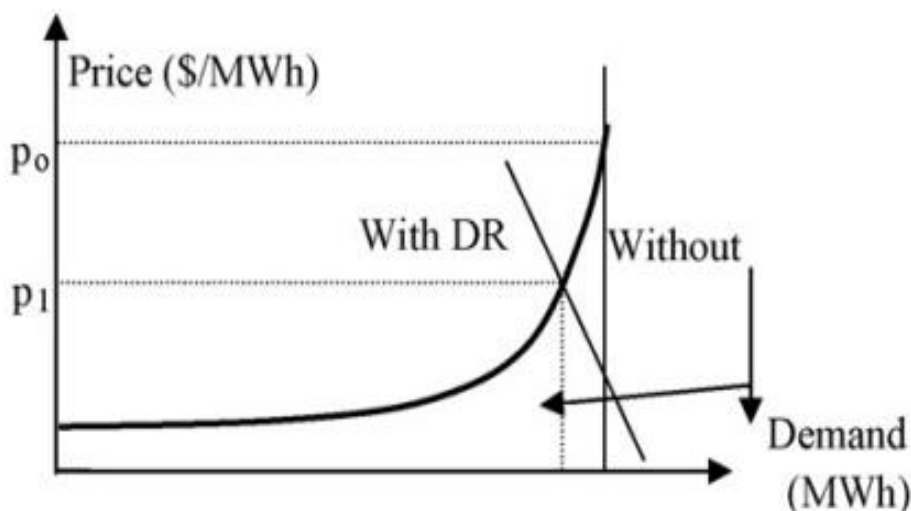


Διάγραμμα 1.6 Σχηματική περιγραφή των μεθόδων διαχείρισης ζήτησης *peak shaving/valley filling/load shifting*

Demand Response Benefits

- Participant
 - Incentive payments
 - Bill savings
- Market-Wide
 - Price reduction
 - Capacity increase
 - Avoided/deferred infrastructure costs
- Reliability
 - Reduced outages
 - Customer participation
 - Diversified resources
- Market performance
 - Reduces market power
 - Options to customers
 - Reduces price volatility

Σχήμα 1.3 Πλεονεκτήματα απόκρισης ζήτησης



Σχήμα 1. 4 Απλοποιημένη σχηματική περιγραφή της επίδρασης της απόκρισης ζήτησης στην τιμή της αγοράς

1.6 Απόκριση ζήτησης οικιακού τομέα

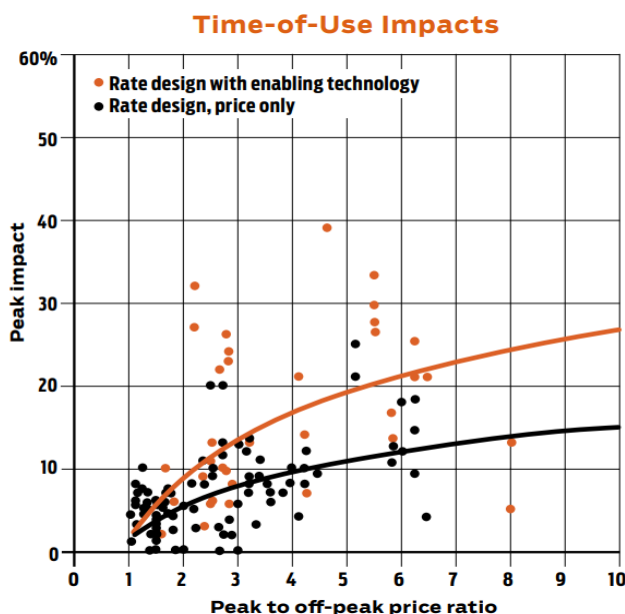
Οι οικιακοί καταναλωτές αποτελούν κατάλληλη περίπτωση για προγράμματα απόκρισης ζήτησης όπως ο άμεσος έλεγχος φορτίου (Direct Load Control – DLC) και προγράμματα βασισμένα στην τιμή του ηλεκτρισμού (price-based programs) [3]. Η μελέτη των M.H. Albadi, E.F. El-Saadany (2008) [5] διαχωρίζει τις δράσεις μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί η απόκριση ζήτησης στον οικιακό τομέα σε τρεις περιπτώσεις. Όπως αναφέρθηκε, οι καταναλωτές μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση κατά τις κρίσιμες περιόδους αιχμής του συστήματος, όταν οι τιμές είναι υψηλές, χωρίς να επηρεάσουν το μοτίβο κατανάλωσης τους τις υπόλοιπες χρονικές περιόδους. Αυτή η επιλογή οδηγεί στην προσωρινή μείωση των επιπέδων άνεσης των καταναλωτών. Δεύτερον, η αντίδραση του καταναλωτή στην αύξηση των τιμών, μπορεί να αφορά τη μεταφορά μέρους της κατανάλωσής του σε περιόδους εκτός αιχμής (χαμηλών τιμών). Η ενέργεια αυτή δεν επιβαρύνει με κόστος τους οικιακούς καταναλωτές, αντίθετα από το βιομηχανικό τομέα, όπου η αναβολή διαφόρων διαδικασιών οδηγεί σε κόστη επαναπρογραμματισμού για την αναπλήρωση των χαμένων υπηρεσιών. Η τελευταία περίπτωση αφορά την ενσωμάτωση αυτό-παραγωγής ενέργειας, ίσως και σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης, η οποία δίνει τη δυνατότητα στον καταναλωτή να μην αλλάξει το μοτίβο κατανάλωσης του, αλλά να επηρεάσει τα δεδομένα του συστήματος καθώς παρουσιάζεται μειωμένη ζήτηση όταν ένα μέρος της κατανάλωσης καλύπτεται από μικρές μονάδες αυτό-παραγωγής (π.χ. ηλιακό πάνελ στην οροφή του σπιτιού) ή αποθηκευμένη ενέργεια.

Όπως αναφέρθηκε, η απόκριση ζήτησης, στις περιπτώσεις όπου η απόκριση οφείλεται σε μεταβολές των τιμών, βρίσκει εφαρμογή όταν η τιμολόγηση είναι μεταβαλλόμενη, καθώς με το μοντέλο της σταθερής ταρίφας (flat-rate tariff) ο καταναλωτής δεν έχει κίνητρο να αλλάξει τις καταναλωτικές του συνήθειες. Αντίθετα, η ειδικά διαμορφωμένη τιμολόγηση των καταναλωτών, μπορεί να οδηγήσει στην επίτευξη μίας ομαλής και αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα, σε μία από τις πολλές μελέτες ευαισθησίας των καταναλωτών ως προς τις μεταβολές της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος, οι O.Corradi et al. (2021) [15], προβλέποντας την απόκριση των καταναλωτών στις μεταβολές της τιμής, αναπτύσσουν ένα μοντέλο διατήρησης σταθερής

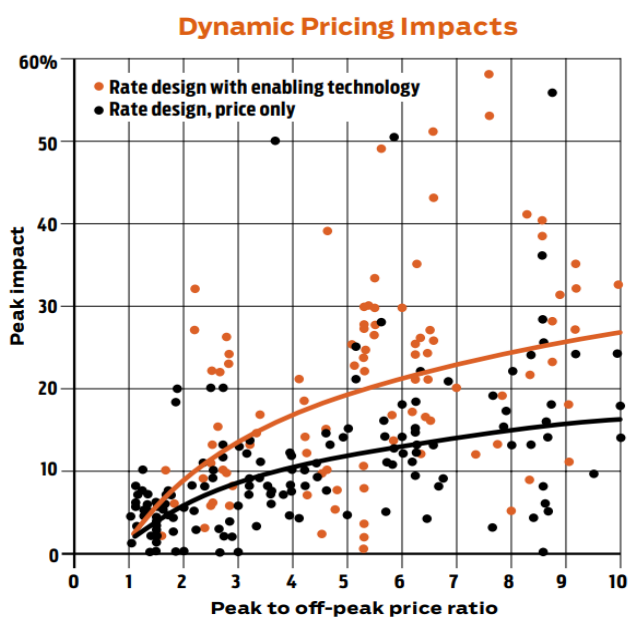
κατανάλωσης των συσκευών θέρμανσης μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την αιχμή της κατανάλωσης. Παρόλα αυτά, και καθότι κάθε μελέτη αποδεικνύει ότι η μετάβαση από τη σταθερή στη μεταβαλλόμενη τιμολόγηση αυξάνει το κοινωνικό πλεόνασμα, υπάρχουν μελέτες που αμφισβητούν τη σημασία της για τον οικιακό τομέα. Στη μελέτη του H. Allcott [16], η τιμολόγηση των οικιακών καταναλωτών σε real-time pricing πρόγραμμα, δεν επιφέρει αρκετή εξοικονόμηση χρημάτων που να δικαιολογεί την εγκατάσταση του τεχνολογικού εξοπλισμού που απαιτείται. Σύμφωνα με τους Niamh O'Connell et al. (2014) [7], η αυτοματοποίηση που ήδη υπάρχει στον βιομηχανικό τομέα, η απουσία της περιπλοκότητας που θέτει ο ανθρώπινος παράγοντας (θεωρώντας τους βιομηχανικούς και εμπορικούς καταναλωτές καθαρά προσανατολισμένους προς το κέρδος) και τα μεγάλα φορτία ψύξης/θέρμανσης για παράδειγμα σε supermarkets και εμπορικά κέντρα, τα οποία αποτελούν τα φορτία με τη μεγαλύτερη ευελιξία, θέτουν το ερώτημα αν αυτοί οι καταναλωτές πρέπει να αποτελέσουν το κέντρο του ενδιαφέροντος για τους παρόχους στις περιπτώσεις απόκρισης ζήτησης. Αυτό συμβαίνει γιατί η επικοινωνία και ο βέλτιστος προγραμματισμός/συγχρονισμός λίγων αλλά μεγάλων καταναλωτών πραγματοποιείται πολύ ευκολότερα απ' ό,τι για τους οικιακούς καταναλωτές, όπου απαιτούνται αρκετά περίπλοκα συστήματα ελέγχου και επικοινωνίας, καθώς σε αυτήν την περίπτωση χρειάζεται να αξιοποιηθεί πολύ μεγαλύτερο πλήθος καταναλωτών (λόγω της μικρής ισχύος τους) για την επίτευξη ίδιων αποτελεσμάτων. Δεύτερον, ορισμένες από αυτές τις μεγάλες δομές ενδέχεται να έχουν ήδη ενσωματωμένα διάφορα αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και γενικότερα τον απαιτούμενο τεχνολογικό εξοπλισμό και τέλος γιατί η δομή και λειτουργία μιας πιθανής αγοράς που θα διαπραγματεύεται την απόκριση ζήτησης μόνο με μεγάλους, άρα λίγους σε αριθμό, καταναλωτές είναι πολύ απλούστερη. Αυτό φανερώνεται επίσης από το γεγονός ότι η απόκριση ζήτησης έως σήμερα στηρίζεται κατά κύριο λόγο σε βιομηχανικούς καταναλωτές μεγάλης κλίμακας, που μειώνουν την κατανάλωσή τους σε περιόδους πίεσης του συστήματος και από την ύπαρξη αρκετών ΦοΣΕ απόκρισης ζήτησης για την εκπροσώπηση βιομηχανικών και εμπορικών καταναλωτών, τη στιγμή που για την οικιακή κατανάλωση βρίσκονται ακόμη σε πρώιμη φάση [17]. Παρόλα αυτά, ο μεγάλος όγκος της οικιακής κατανάλωσης κρίνει απαραίτητη τη διερεύνηση της αξιοποίησής της προς όφελος του συστήματος σε πλαίσια απόκρισης ζήτησης. Σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency) πάνω από το 75% του παγκόσμιου δυναμικού όσον αφορά την απόκριση ζήτησης βρίσκεται στα κτίρια, με τη θέρμανση χώρων, τη θέρμανση νερού και τα φορτία κλιματισμού να έχουν τις μεγαλύτερες προοπτικές [18], φορτία που συναντώνται στη συντριπτική πλειοψηφία της οικιακής κατανάλωσης.

Χρειάζεται να σημειωθεί πως αν και σε γενικές γραμμές η απόκριση των καταναλωτών στην εκπομπή ενός σήματος τιμής είναι αναμενόμενη (π.χ. η αύξηση της τιμής σε μια χρονική περίοδο οδηγεί στη μείωση της κατανάλωσης), είναι σημαντικό για τις ανάγκες της μελέτης των αποτελεσμάτων της ευρείας εφαρμογής του φαινομένου απόκρισης ζήτησης, αυτή η αντίδραση να ποσοτικοποιηθεί και να αναλυθεί με μεγάλη λεπτομέρεια. Σε αυτό το σημείο συναντάται ένα μεγάλο εμπόδιο, τουλάχιστον όσον αφορά τον οικιακό τομέα, το οποίο φανερώνεται στις μελέτες που έχουν διεξαχθεί για την αξιολόγηση της απόκρισης των καταναλωτών σε διαφορετικά μοντέλα τιμολόγησης. Τα αποτελέσματα όσον αφορά την αντίδραση των καταναλωτών σε διάφορες μεταβολές τιμών του ρεύματος μεταξύ περιόδων αιχμής και περιόδων εκτός αιχμής δεν είναι συνεπή, όπως επίσης και τα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται ή όχι «έξυπνη» τεχνολογία. Οι A. Faruqui, S. Sergici και C. Warner (2017) [19] αναφέρουν ότι αυτές οι αποκλίσεις ανάμεσα

στα αποτελέσματα των διαφόρων μελετών, μπορούν να εξαλειφθούν αν η μείωση της αιχμής κατανάλωσης παρουσιαστεί ως συνάρτηση (λογαριθμική-γραμμική) του λόγου τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος σε περίοδο αιχμής προς την τιμή εκτός περιόδου αιχμής [Διάγραμμα 1.7-1.8]. Παρόλα αυτά, η άποψη αυτή αμφισβητείται από πολλούς όπως η Frontier Economics η οποία σε σχετική δημοσίευσή της (2012) [20] αναφέρει ότι η διαφορά αυτών των τιμών, δεν εξηγεί πλήρως τη διακύμανση της απόκρισης των καταναλωτών στο εύρος των μελετών που έχουν διεξαχθεί. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η αύξηση του συγκεκριμένου λόγου τιμών ενισχύει τη μείωση της αιχμής [19]. Το γεγονός ότι παρατηρούνται πολύ διαφορετικές αντιδράσεις μεταξύ καταναλωτών σε ίδιες μεταβολές της τιμής ή και παρόμοιες αντιδράσεις ως προς διαφορετικές μεταβολές, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η οικιακή κατανάλωση πρέπει να μελετηθεί εκτός από ποσοτικά και σε ποιοτικό επίπεδο. Η συμπεριφορά του οικιακού καταναλωτή όσον αφορά την απόκριση ζήτησης σε περιπτώσεις μάλιστα όπου αυτή μπορεί να μην αποφέρει πολύ σημαντικά οικονομικά οφέλη για τον ίδιο είναι απρόβλεπτη και χρίζει αναλυτικής μελέτης για την κατανόησή της και την ακριβή αξιολόγηση της συνεισφοράς της στη λειτουργία του συστήματος. Σαφώς, το οικονομικό κίνητρο είναι αυτό που κυριαρχεί και προκαλεί μια παρόμοια αντίδραση σε όλο το εύρος των καταναλωτών, αλλά για την ακρίβεια των συμπερασμάτων κρίνεται απαραίτητη η συλλογή επιπλέον στοιχείων (π.χ. δημογραφικά στοιχεία, οικονομική κατάσταση οικιακού καταναλωτή, περιβαλλοντικές επιρροές) και ίσως η αλλαγή της μεθοδολογικής επεξεργασίας τους ή η αύξηση της περιπλοκότητας των μαθηματικών μοντελοποιήσεων κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων της απόκριση ζήτησης στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 1.7 Μείωση αιχμής κατανάλωσης συναρτήσεως του λόγου τιμής ηλεκτρικού ρεύματος σε περίοδο αιχμής προς τιμή εκτός αιχμής, με και χωρίς χρήση έξυπνης τεχνολογίας (Time of Use τιμολόγηση)



Διάγραμμα 1.8 Μείωση αιχμής κατανάλωσης συναρτήσεως του λόγου τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος σε περίοδο αιχμής προς τιμή εκτός αιχμής, με και χωρίς χρήση έξυπνης τεχνολογίας (Δυναμική τιμολόγηση)

1.6.1 Κατηγοριοποίηση οικιακών ηλεκτρικών συσκευών

Κατά το σχεδιασμό μαθηματικών μοντέλων βέλτιστης διαχείρισης της οικιακής ζήτησης σε πλαίσιο απόκρισης ζήτησης, τίθεται το θέμα της ορθής κατηγοριοποίησης των ηλεκτρικών συσκευών. Η ορθή κατηγοριοποίηση είναι απαραίτητη αρχικά για το διαχωρισμό των συσκευών σε ευέλικτες, των οποίων η λειτουργία μπορεί να διαχειρίζεται από φαινόμενα όπως η απόκριση ζήτησης, και σε μη ευέλικτες για τις οποίες παρόμοια φαινόμενα δεν μπορούν να βρουν εφαρμογή. Ακόμη, κατά την ανάπτυξη αντίστοιχων αλγορίθμων, κάθε τύπος συσκευής απαιτεί διαφορετική μαθηματική μοντελοποίηση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελούν οι συσκευές θέρμανσης/ψύξης, οι οποίες όπως αναφέρθηκε στοχεύουν στη διατήρηση της θερμοκρασίας εντός προκαθορισμένων ευρών και για δεδομένες χρονικές περιόδους. Το γεγονός αυτό απαιτεί για την ορθή μαθηματική αναπαράσταση, κατά την ανάπτυξη μοντέλων που αφορούν την αυτοματοποιημένη λειτουργία τους, τη γνώση ειδικών παραμέτρων όπως εσωτερικές/εξωτερικές θερμοκρασίες και σε αναλυτικότερες μελέτες έως και διάφορα θερμομονωτικά δεδομένα. Σε κάθε περίπτωση, η μοντελοποίηση διαφέρει σημαντικά από άλλου τύπου συσκευές, γι' αυτό και η ανάπτυξη της πληρέστερης δυνατής κατηγοριοποίησης, όπως και οι αναλυτικότερες μαθηματικές μοντελοποιήσεις της λειτουργίας της εκάστοτε συσκευής, κρίνονται απαραίτητες για την εξαγωγή ρεαλιστικότερων αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή αντίστοιχων μοντέλων.

Χαρακτηριστικά, στις μελέτες [21-22] τα φορτία κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

I. Φορτία βασικής κατανάλωσης (Baseline loads)

Τα κύρια φορτία αυτής της κατηγορίας αντιπροσωπεύουν βασικές ανάγκες και δε θεωρούνται κατάλληλα για διαχείριση σε προγράμματα απόκρισης ζήτησης.

II. Φορτία υψηλής κατανάλωσης (*Burst loads*)

Αυτά τα φορτία είναι αρκετά ενεργοβόρα και στη διάρκεια λειτουργίας τους διακρίνεται η αύξηση κατανάλωσης σε σχέση με τη βασική κατανάλωση που συνθέτουν τα *baseline loads*.

III. Ρυθμιζόμενα φορτία (*Regular loads*)

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν φορτία που τα επίπεδα κατανάλωσης τους μπορούν να ελέγχονται με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα τις θερμοστατικές συσκευές (π.χ *A/C*).

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες θεωρούνται ιδανικές για τη διαχείριση της κατανάλωσης ενός σπιτιού με τα αντίστοιχα φορτία να διαφέρουν αρκετά ως προς τα επίπεδα κατανάλωσης και την περίοδο λειτουργίας από καταναλωτή σε καταναλωτή.

Η μελέτη των Subhasis Panda et al. (2022) [23] πραγματοποιεί παρόμοιο διαχωρισμό, διαχωρίζοντας τα ρυθμιζόμενα φορτία σε θερμοστατικά ελεγχόμενα και μη θερμοστατικά ελεγχόμενα αναφέροντας για τα πρώτα τη σημασία της ευελιξίας τους και θεωρώντας για τα δεύτερα ότι η λειτουργία τους μπορεί να αναβληθεί καθώς δεν είναι απαραίτητη για τον καταναλωτή. Ακόμη, αντί για την κατηγορία των *burst loads*, περιλαμβάνονται τα φορτία που διαθέτουν συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας (μπαταρίες), όπως *laptops* και *smartphones*, με την επισήμανση πως τα μοναδικά που θα μπορούσαν να έχουν σημαντική συμμετοχή στη διαχείριση της ζήτησης είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Στον Πίνακα 1.2 παρατίθεται από την ίδια μελέτη η κατάταξη τυπικών ηλεκτρικών συσκευών σε ένα απλό σύστημα κατηγοριοποίησης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

Όπως υποστηρίζουν οι S. Althaher, P. Mancarella, J. Mutale (2015) [6], η πληρέστερη κατηγοριοποίηση, έγκειται στο διαχωρισμό των ηλεκτρικών συσκευών στις κατηγορίες που παρατίθενται παρακάτω. Η κατάταξη αυτή εξαρτάται από τον τύπο της συσκευής, αλλά και από τις προτιμήσεις του χρήστη και είναι η εξής:

I. Συσκευές αναβαλλόμενης λειτουργίας (*Deferrable appliances*)

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στις συσκευές των οποίων η λειτουργία μπορεί να μεταφερθεί μέσα στη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση τους, η συνολική ενέργεια που καταναλώνουν αυτές οι συσκευές πρέπει να περιλαμβάνεται μέσα στο χρονικό ορίζοντα της μελέτης. Οι συσκευές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία μπορούν να αναλυθούν σε δύο τύπους, τις ευέλικτες και τις μη-ευέλικτες.

i. Μη-ευέλικτες συσκευές αναβαλλόμενης λειτουργίας (*Non-flexible deferrable appliances*)

Εδώ περιλαμβάνονται όλες οι συσκευές οι οποίες πρέπει να ακολουθήσουν ένα δεδομένο προφίλ κατανάλωσης κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας τους και των οποίων η λειτουργία δεν μπορεί να διακοπεί. Αυτά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας περιλαμβάνονται για παράδειγμα σε έναν κύκλο διάρκειας 120 λεπτών ενός πλυντηρίου ρούχων.

ii. Ευέλικτες συσκευές αναβαλλόμενης λειτουργίας (*Flexible deferrable appliances*)

Μια συσκευή ανήκει σε αυτήν την υποκατηγορία όταν το προφίλ κατανάλωσης της μπορεί να μεταβληθεί είτε διακόπτοντας τη λειτουργία της, είτε μειώνοντας τα

επίπεδα κατανάλωσής της. Τα plug-in ηλεκτρικά αυτοκίνητα (PEVs) των οποίων ο ρυθμός φόρτισης μπορεί να ελεγχθεί αποτελούν μια τέτοια περίπτωση.

II. *Θερμικές συσκευές (Thermal appliances)*

Ο όρος αφορά συσκευές που έχουν στόχο τη θέρμανση/ψύξη. Η συνήθης μαθηματική μοντελοποίηση αυτών των συσκευών αφορά τη διαχείριση της λειτουργίας τους με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας μέσα σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος που ορίζεται από τον καταναλωτή και για τις ώρες της ημέρας που αυτό είναι επιθυμητό.

III. *Συσκευές διακοπτόμενης λειτουργίας (Curtailable appliances)*

Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει τις συσκευές των οποίων τη λειτουργία μπορούμε να διακόψουμε χωρίς την ανάγκη να επαναλειτουργήσουν αργότερα. Όσον αφορά την αυτοματοποιημένη διαδικασία ελέγχου της οικιακής κατανάλωσης, ο καταναλωτής μπορεί να θέσει προτεραιότητες σχετικά με το ποιων από αυτές τις συσκευές τη λειτουργία θέλει να διακόπτει πρώτα.

IV. *Κρίσιμες συσκευές (Critical appliances)*

Στην κατηγορία αυτή ανήκει κάθε συσκευή της οποίας η περίοδος και τα επίπεδα λειτουργίας δεν μπορούν να ελεγχθούν και πρέπει να διατηρούνται χωρίς παρεμβάσεις.

Household appliances	Type of load
Air Conditioner	Regulatable
Air Purifier	Shiftable, Reschedulable
Coffee Maker	Fixed
Computer (Monitor & Printer)	Fixed
Digital Clock	Fixed
Dishwasher	Schedulable
Electric Hairdryer	Fixed
Electric Iron	Fixed
EV Charger	Reschedulable
Exhaust Fan	Shiftable, Controllable
Fan	Fixed
Food Blender	Fixed
Induction Cooker	Fixed
LED Lights	Fixed
Microwave	Fixed
Night Light	Schedulable
Refrigerator	Fixed
Room Heater	Regulatable
Router Wi-Fi	Fixed
Shaver	Fixed
Television	Fixed
Vacuum Cleaner	Fixed
Washing Machine	Shiftable
Water Heater	Curtailable
Water Pump	Reschedulable

Πίνακας 1.2 Κατηγοριοποίηση τυπικών οικιακών ηλεκτρικών συσκευών βάσει των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους

1.7 Αυτοματοποιημένη απόκριση ζήτησης (Automated demand response)

Για το μέγιστο βαθμό αποτελεσματικότητας του φαινομένου απόκρισης ζήτησης και κατά συνέπεια της μεγιστοποίησης των οικονομικών αποτελεσμάτων για τους καταναλωτές, απαιτείται ένα δεδομένο επίπεδο αυτοματοποίησης, τόσο για την μειωθεί η αβεβαιότητα της απόκρισής τους ως απάντηση στη διακύμανση της τιμής του ρεύματος, όσο και για την απλοποίηση της διαδικασίας για τους ίδιους. Η αυτοματοποίηση του φαινομένου της απόκρισης ζήτησης περιγράφεται με τον όρο Αυτοματοποιημένη Απόκριση Ζήτησης (Automated Demand Response-ADR) και βασίζεται στον αυτόματο έλεγχο των φορτίων των καταναλωτών, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινων παρεμβάσεων. Η διαδικασία καθίσταται εφικτή μέσω της εγκατάστασης ειδικών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας στις τελικές δομές του καταναλωτή (EMS - Energy Management Systems) τα οποία βελτιστοποιούν την απόκρισή του, βασιζόμενα σε δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από διάφορους αισθητήρες, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις προτιμήσεις του και εξωτερικά σήματα. Τα συστήματα αυτά μπορούν να επικοινωνούν με τις συσκευές του καταναλωτή και να εφαρμόζουν αυτόματα το βέλτιστο προγραμματισμό λειτουργίας τον οποίο συνθέτουν, βάσει των δεδομένων που συλλέγονται. Για την περίπτωση της οικιακής κατανάλωσης, ο όρος μετονομάζεται σε HEMS – Home Energy Management Systems. Η λειτουργία του συστήματος, όπως και κάθε άλλη απαραίτητη τεχνολογική υποδομή για την εφαρμογή του φαινομένου της Αυτοματοποιημένης Απόκρισης Ζήτησης περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 1.7.1.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία παρουσιάζει πληθώρα μαθηματικών μεθόδων για την κατασκευή αλγορίθμων που βρίσκουν εφαρμογή στη λειτουργία τέτοιων συστημάτων. Ακόμη, εντοπίζεται πλήθος μελετών οι οποίες παραθέτουν αποτελέσματα της χρήσης τους, όσον αφορά την απόκριση των καταναλωτών. Για παράδειγμα, οι Faruqui A. και Sergici S. (2010) [25], έπειτα από μελέτη 15 πειραμάτων δυναμικής τιμολόγησης παρατηρούν μείωση της αιχμής κατανάλωσης κατά 27-44% σε ToU και CPP προγράμματα. Τα αποτελέσματα αυτά δικαιολογούνται λογικά από την άποψη ότι συστήματα διαχείρισης ενέργειας όπως το HEMS μπορούν να αξιολογήσουν καλύτερα μεταβλητές όπως η τιμή του ρεύματος και άλλες εξωτερικές παραμέτρους και να σχεδιάσουν αποτελεσματικότερα τον προγραμματισμό της κατανάλωσης απ' ό,τι οι ανθρώπινες αποφάσεις. Οι M. Beaudin, H. Zareipour (2015) [26], εξάγοντας μέσους όρους αποτελεσμάτων από διάφορες μελέτες που αφορούν HEMS, αναφέρουν πως ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να μειώσει το κόστος για τους καταναλωτές κατά 23.1% (μέση τιμή 25 μελετών) και την αιχμή της κατανάλωσης κατά 29.6 % (μέση τιμή 18 μελετών).

1.7.1 Υποδομές αυτοματοποιημένης απόκρισης ζήτησης

1.7.1.1 Τεχνολογικές υποδομές

Πέρα από τα διάφορα νομοθετικά και λειτουργικά πλαίσια που πρέπει να τεθούν σε ισχύ ώστε η απόκριση ζήτησης να προτυποποιηθεί ως μοντέλο λειτουργίας, απαραίτητη είναι και η εγκατάσταση αξιόπιστου και ικανού τεχνολογικού εξοπλισμού να υποστηρίξει την εφαρμογή του φαινομένου. Για την εγκαθίδρυση ενός μοντέλου λειτουργίας το οποίο στηρίζεται στη μαζική

απόκριση ζήτησης είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αρκετά εξελιγμένων τεχνολογικών υποδομών. Η επικοινωνία με μεγάλο πλήθος καταναλωτών, απαιτεί αρκετά εξελιγμένα συστήματα τόσο σε επίπεδο μέτρησης και ελέγχου όσο και επικοινωνίας, κυρίως λόγω του τεράστιου πλήθους δεδομένων που προκύπτει. Για αυτό το λόγο, η απόκριση ζήτησης, για να αποτελέσει μελλοντικά την κύρια πηγή ευελιξίας του φορτίου του συστήματος, απαιτεί την επίτευξη υψηλών επιπέδων αυτοματοποίησης όσον αφορά τις διαδικασίες εφαρμογής της. Οι υποδομές που αναλύονται στη συνέχεια αφορούν το μέγιστο επίπεδο αυτοματοποίησης του φαινομένου και εμπίπτουν στην κατηγορία της αυτοματοποιημένης απόκρισης ζήτησης (ADR) που βρίσκει εφαρμογή στο περιβάλλον ενός «έξυπνου» δικτύου και «έξυπνων» σπιτιών.

1.7.1.1.1 Υποδομές μέτρησης και ελέγχου

Ανάμεσα στα κύρια στοιχεία των υποδομών που θα επιτρέψουν τη λειτουργία του μοντέλου της αυτοματοποιημένης απόκρισης ζήτησης είναι οι έξυπνοι μετρητές (smart meters), οι εξελιγμένες υποδομές μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure – AMI), οι οποίες αποτελούν ένα σύστημα πληροφοριών, επικοινωνιακών διαύλων και τεχνολογικού εξοπλισμού και τις οποίες μπορούμε απλά να περιγράψουμε ως ένα δίκτυο επικοινωνίας πολλών έξυπνων μετρητών [3], και τα οικιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας (HEMS - Home Energy Management System). Στο μέγιστο επίπεδο αυτοματοποίησης, η οικιακή κατανάλωση αποτελείται από «έξυπνες» ηλεκτρικές συσκευές, δηλαδή συσκευές που επιτρέπουν τον απομακρυσμένο έλεγχο και την αυτόματη λειτουργία τους έπειτα από προγραμματισμό του καταναλωτή, εφοδιασμένες με τη δυνατότητα αυτόνομης μέτρησης και καταγραφής των δεδομένων κατανάλωσής τους [23] και έξυπνους αισθητήρες που μπορούν ασύρματα ή ενσύρματα να μεταδίδουν τις μετρήσεις τους σε συσκευές καταγραφής που συνδέονται με το HEMS ώστε αυτό να βελτιστοποιεί τον τελικό προγραμματισμό λειτουργίας των οικιακών συσκευών [23]. Τέλος, για την πλήρη αυτοματοποίηση της λειτουργίας των φορτίων, οι έξυπνοι θερμοστάτες παρέχουν διαδικτυακό έλεγχο και ειδικούς αισθητήρες για την ενεργοποίηση/σβέση των αντίστοιχων φορτίων και τη δυνατότητα μείωσης των επιπέδων κατανάλωσης των θερμοστατικά ελεγχόμενων φορτίων όταν βρίσκονται υπό τον έλεγχο του παρόχου [27].

Οι έξυπνοι μετρητές είναι ηλεκτρονικοί μετρητές που προσφέρουν τη δυνατότητα διμερούς επικοινωνίας με τον καταναλωτή. Αυτού του είδους οι μετρητές μπορούν να λάβουν σήματα από τον πάροχο [3] αλλά και από τις συσκευές του καταναλωτή, όντας υπεύθυνοι για τη συλλογή και αποθήκευση μετρήσεων όπως τα επίπεδα κατανάλωσης και η άεργος ισχύς, τις οποίες πρέπει να είναι ικανοί να αναμεταδίδουν στον πάροχο και πιθανόν σε συσκευές που ενημερώνουν τον καταναλωτή σχετικά με τα επίπεδα κατανάλωσής του [28]. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αποθηκευτούν στο μετρητή για μέρες ή εβδομάδες και η συχνότητα μετρήσεων μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα με το είδος του μετρητή [27].

Το AMI [Σχήμα 1.5] δεν μπορεί να συγκεκριμενοποιηθεί ως τεχνολογία, καθώς ενσωματώνει έξυπνους μετρητές, δίκτυα επικοινωνιών όπως το HAN (Home Area Network) και το WAN (Wide Area Network) και συστήματα διαχείρισης δεδομένων μετρήσεων (Meter Data Management Systems – MDMS) [29]. Η γενική περιγραφή του AMI είναι ως ένα σύστημα που μπορεί κατ' εντολή να πραγματοποιήσει μετρήσεις, να συλλέγει/αποθηκεύει/αναλύει δεδομένα και να

αναμεταδίδει πληροφορίες από συσκευές και έξυπνους μετρητές χρησιμοποιώντας διάφορες επικοινωνιακές διόδους [23]. Τα WAN είναι δίκτυα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων από πολλούς μετρητές και το MDMS είναι μια βάση δεδομένων που επεξεργάζεται τα δεδομένα μέτρησης εγγυόμενη ότι είναι ακριβή και πλήρη [27].

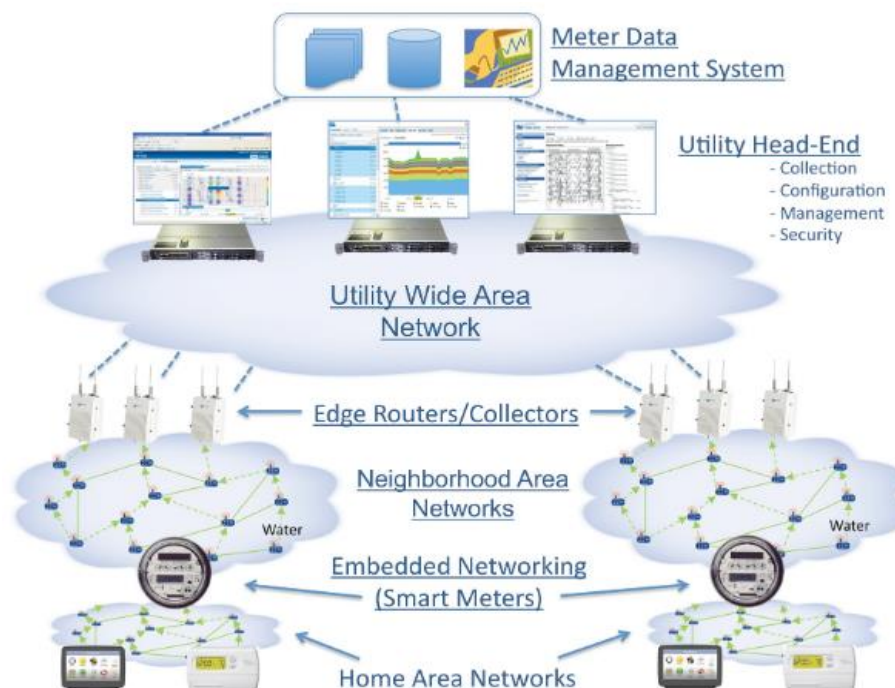
Το τελευταίο στοιχείο αυτής της κατηγορίας είναι τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Systems – EMS) στις δομές του τελικού καταναλωτή (Home Energy Management System – HEMS) [Σχήμα 1.6]. Όλα τα σήματα μεταφέρονται στο HEMS μέσα από το AMI και το σύστημα αυτό εξάγει την βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας των οικιακών πόρων (κατανάλωση, αυτό-παραγωγή, αποθήκευση) που θα ικανοποιεί ταυτόχρονα τις ανάγκες του καταναλωτή και τους περιορισμούς του συστήματος [3]. Το HEMS παρακολουθεί τα επίπεδα κατανάλωσης του οικιακού καταναλωτή και τον βοηθάει να μεταβάλλει την καταναλωτική του συμπεριφορά σύμφωνα με σήματα που λαμβάνει από το σύστημα. Η παρουσία του μπορεί να υποστηρίξει προγράμματα απόκρισης ζήτησης και να μειώσει την αιχμή την κατανάλωσης [24]. Τα HEMS καθιστούν εφικτή τη διαχείριση στοιχείων όπως «έξυπνες» ηλεκτρικές συσκευές, αισθητήρες, μονάδες αυτό-παραγωγής και ελέγχουν την κατανάλωση, την αποθήκευση και την παραγωγή ενέργειας [30]. Το σύστημα αναλύεται περεταίρω στην παράγραφο 1.7.1.2.

1.7.1.1.2 Υποδομές επικοινωνίας

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική απόκριση της ζήτησης αποτελεί η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων. Είναι σημαντικό να υπάρξει μία δίοδος επικοινωνίας μεταξύ παρόχου, HEMS και φορτίων, τέτοια ώστε να υπάρχει μικρή καθυστέρηση μεταξύ της στιγμής που ο πάροχος αποστέλλει ένα αίτημα/πληροφορία και της στιγμής που ο καταναλωτής το λαμβάνει, το επεξεργάζεται και αντιδράει [3]. Ακόμη, χρειάζεται να μπορούν να μεταφερθούν με ικανό ρυθμό δεδομένα από κάθε συσκευή που συνδέεται σε αυτή τη δίοδο επικοινωνίας [3].

Τα βασικά μέρη επικοινωνίας δεδομένων που λαμβάνονται υπόψιν σε ένα πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης είναι κατά κύριο λόγο τρία, το AMI, το διαδίκτυο και το HAN. Όπως αναφέρθηκε το AMI είναι ένα δίκτυο από μεγάλο πλήθος έξυπνων μετρητών. Το διαδίκτυο χρησιμεύει ως πλατφόρμα υπολογισμών και διαχείρισης των πληροφοριών και το HAN είναι η πύλη προς το διαδίκτυο και τον έξυπνο μετρητή για τα ελέγξιμα φορτία και τις αλληλεπιδράσεις τους με το HEMS. Το διαδίκτυο αποτελεί τη διεπαφή μέσω της οποίας διάφορα συστήματα επικοινωνούν για την πραγματοποίηση μιας συγκεκριμένης δράσης [3] και το HAN το δίκτυο που διασυνδέει τις συσκευές, την αποθήκευση και την αυτο-παραγωγή [29]. Παράλληλα, διευκολύνει την εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης ενέργειας μέσω της χρήσης συσκευών που μπορούν να παρακολουθούν και να επικοινωνούν με άλλες συσκευές ελέγχου φορτίου [23]. Ενσωματωμένα στα EMS βρίσκονται τα EIS (Energy information systems) που δρουν σαν πύλες διμερούς επικοινωνίας μεταξύ των EMS ή ομάδων EMS και του παρόχου, αποθηκεύοντας και αναλύοντας ενεργειακά δεδομένα [23]. Τελικώς, όλα τα δεδομένα μέτρησης των καταναλωτών μεταφέρονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων όπου ο πάροχος ή μία βοηθητική υπηρεσία χρησιμοποιεί διάφορα συστήματα για την επεξεργασία τους, την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους και της εξυπηρέτησης των καταναλωτών [27].

Οι επικοινωνίες μεταξύ των συστημάτων μπορούν να γίνουν ασύρματα ή ενσύρματα, με τη βοήθεια διαφόρων τεχνολογιών, καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τη συχνότητα λειτουργίας, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την απόσταση που καλύπτει και τον τομέα στον οποίο εφαρμόζεται [Πίνακας 1.3]. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται η ασφάλεια του επικοινωνιακού συστήματος και η προστασία των δεδομένων που μεταδίδονται.



Σχήμα 1.5 Αρχιτεκτονική AMI

Technology	Operating Frequency	Data transmission rate	Coverage span	Applications	Confines
Wi-Fi	2.4 GHz	11–150 Mbps	100 m	Monitor and control	Security, interference
ZigBee	2.4 GHz, 900 MHz	250 Kbps	25–50 m	AMI	Low throughput, limited range
Wi-Max	3.5 GHz	Up to 70 Mbps	10–50 km	AMI, DR	Not widely used
5G	1–6 GHz	Up to 10 Gbps	300 m	AMI, DR	Cybersecurity attacks
Broadband PLC	100 kHz–300 MHz	Up to 200 Mbps	10 kms	DR	Not interoperable among other PLC standards

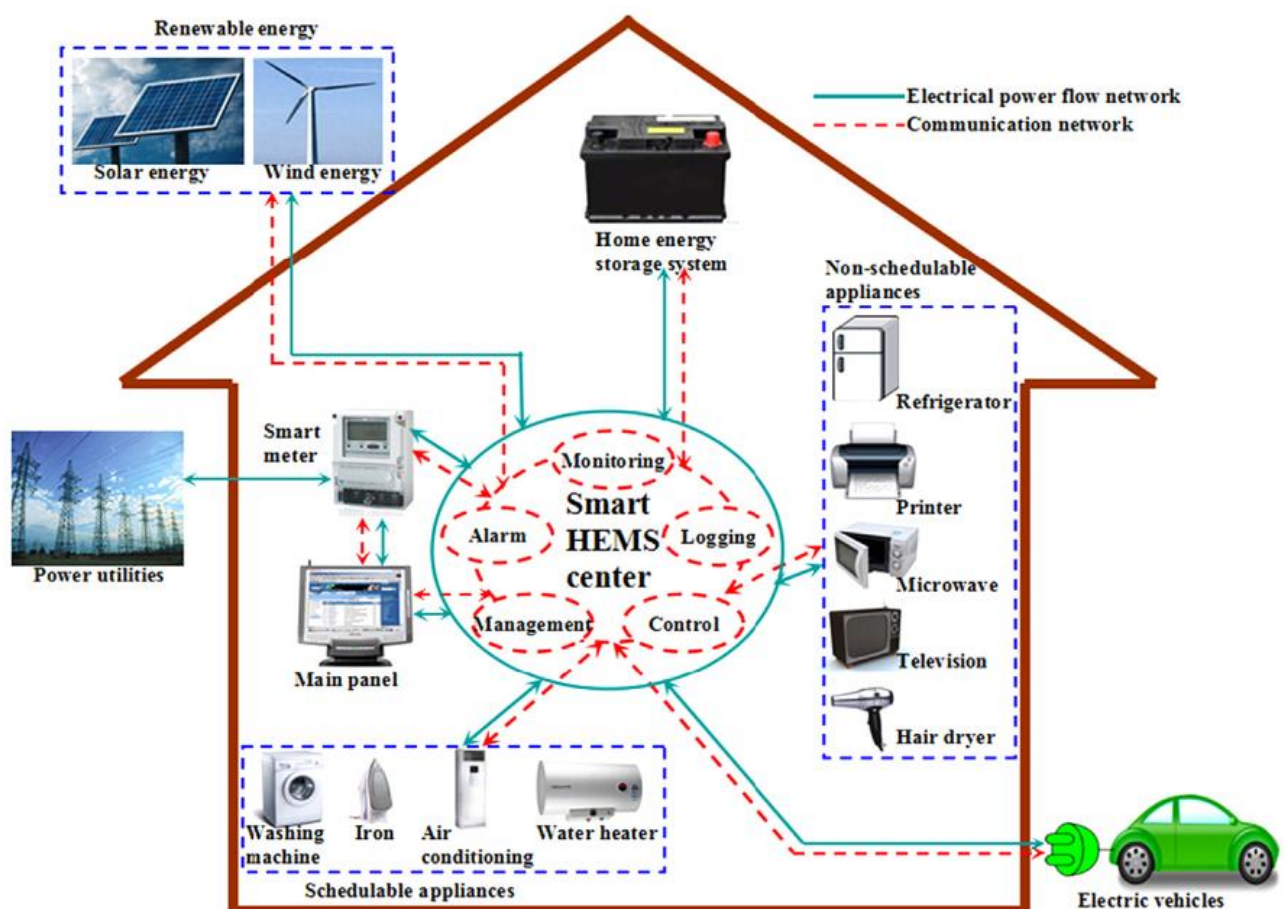
Πίνακας 1.3 Τεχνολογίες επικοινωνιών στη διαχείριση ζήτησης

1.7.1.2 Οικιακό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (HEMS)

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία υποδομών μέτρησης και ελέγχου για την αυτοματοποιημένη διαχείριση της ζήτησης είναι τα HEMS. Τα HEMS είναι αυτοματοποιημένα συστήματα που καταγράφουν, βελτιστοποιούν και ελέγχουν την κατανάλωση των οικιακών συσκευών. Τυπικές συσκευές μεγάλης κατανάλωσης με δυνατότητες ευελιξίας που χρησιμοποιεί ένας οικιακός καταναλωτής και μπορούν να προγραμματίζονται από το HEMS όσον αφορά την οικιακή κατανάλωση είναι: ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες, κλιματιστικά, πλυντήρια και στεγνωτήρια ρούχων

καθώς και πλυντήρια πιάτων [3]. Τα ενσωματωμένα στοιχεία ελέγχου που διαθέτουν τα HEMS επιτρέπουν στους καταναλωτές να προγραμματίζουν τις «έξυπνες» συσκευές ώστε αυτές να ανταποκρίνονται αυτόματα στις μεταβολές της τιμής [27].

Τα οικιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας (HEMS) αποτελούν τα κατάλληλα εργαλεία αυτοματοποίησης της διαδικασίας μεταβολής του προφίλ κατανάλωσης, δημιουργώντας αυτόματα το βέλτιστο προγραμματισμό κατανάλωσης των οικιακών συσκευών εκ μέρους του καταναλωτή, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους όπως το κόστος της ενέργειας και την άνεσή του. Το σύστημα αυτό μπορεί να επικοινωνεί με τις οικιακές συσκευές και τον πάροχο, λαμβάνοντας παράλληλα εξωτερικές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα την αυτό-παραγωγή ενέργειας από ηλιακά πάνελ και την αποθήκευση ενέργειας, βελτιστοποιώντας ανάλογα τον προγραμματισμό κατανάλωσης του χρήστη. Η «έξυπνη» διαχείριση ενέργειας στην περίπτωση των HEMS είναι δυνατή λόγω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών που αφορούν το IoT (Internet of Things), προηγμένων επικοινωνιακών τεχνολογιών και της αποτελεσματικής/ακριβούς διαχείρισης των διαθέσιμων αισθητήρων [23]. Η λογική έγκειται στη διάθεση μιας εφαρμογής στα χέρια του καταναλωτή που θα καταγράφει με ακρίβεια την ηλεκτρική κατανάλωσή του τόσο χρονικά, όσο και σε όγκο, τη διαθέσιμη αυτο-παραγωγή και την αποθήκευση ενέργειας, εάν υπάρχουν, και επεξεργάζοντας τις παραμέτρους που θα εισάγονται στον αλγόριθμό του, να συνθέτει το βέλτιστο προγραμματισμό λειτουργίας των ενεργειακών πόρων, όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα, το οικονομικό όφελος ή την περιβαλλοντική φιλικότητα ανάλογα με τα εξωτερικά σήματα που θα δέχεται.



Σχήμα 1. 6 Αρχιτεκτονική HEMS

1.8 Προοπτικές / τρέχουσες εξελίξεις απόκρισης ζήτησης

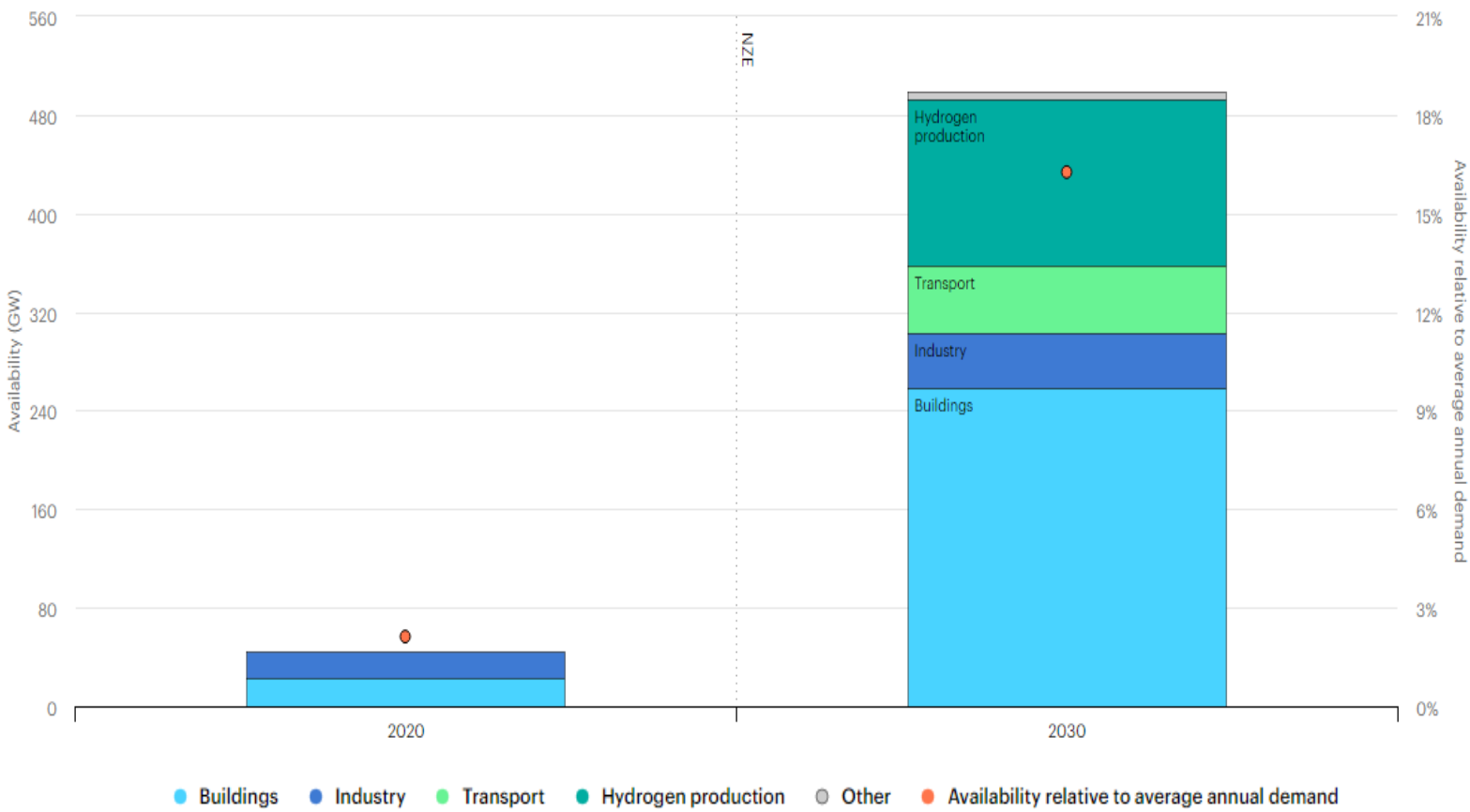
Αν και τα εμπόδια που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν, ώστε η ζήτηση να γίνει ενεργός συμμετέχων των ηλεκτρικών συστημάτων μέσα από φαινόμενα όπως η απόκριση ζήτησης, είναι πολλά, δεν αναλύονται στην παρούσα εργασία. Παρόλα αυτά αναφέρουμε ότι τα διάφορα προγράμματα απόκρισης ζήτησης ανά τον κόσμο διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους λόγω των ποικίλων νομοθετικών πλαισίων που επιβάλλονται στις διάφορες αγορές ηλεκτρισμού της εκάστοτε χώρας και των τεχνικών λεπτομεριών που ο κάθε πάροχος συμπεριλαμβάνει στα προγράμματα τα οποία προσφέρει. Το γεγονός ότι πρέπει να επιτυγχάνεται συνεχής ισορροπία παραγωγής-ζήτησης αλλά και άλλοι αδιευκρίνιστοι παράγοντες όπως η οικονομική αντιμετώπιση που πρέπει να υπάρχει απέναντι στους συμμετέχοντες των προγραμμάτων, αλλά και οι τεχνικές διαφορές μεταξύ αυξομειώσης παραγωγής συμβατικών μονάδων και αυξομειώσης κατανάλωσης των φορτίων που επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο στοιχεία όπως ο συντελεστής ισχύος, οδηγούν σε επιλογές που δυστυχώς περιορίζουν αρκετά το εύρος εφαρμογής των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει η απόκριση ζήτησης. Για παράδειγμα, η επιβολή υψηλών κατώτατων ορίων προσφορών από τη μεριά της ζήτησης και η απαγόρευση συμμετοχής ΦοΣΕ απόκρισης ζήτησης σε συγκεκριμένου είδους αγορές αποκλείουν σε ορισμένες χώρες τη διαθεσιμότητα αρκετών από τα προγράμματα που αναλύθηκαν παραπάνω, ειδικά για τους οικιακούς καταναλωτές. Για αυτό το λόγο, παρατηρείται ασύμμετρη συμμετοχή της απόκρισης ζήτησης στη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων ανά τον κόσμο [3] με τις ΗΠΑ να πρωτοπορούν και την Ευρώπη να αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια, καθώς γενικότερα επιλέγει το δρόμο της ενεργειακής αποδοτικότητας (energy efficiency) για την αποδοτικότερη λειτουργία των συστημάτων της. Παράγοντες όπως το πλήθος των γεγονότων απόκρισης ζήτησης (DR events), δηλαδή των περιόδων που ο πάροχος θα ζητήσει ή θα επιβάλλει μείωση της κατανάλωσης, ο ελάχιστος χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο τέτοιων γεγονότων, η ποσότητα της απαιτούμενης μείωσης της κατανάλωσης (που συνήθως δίνεται ως ποσοστό κάποιας μέσης τιμής κατανάλωσης) αλλά και η διάρκεια αυτής, όπως επίσης και η οικονομική επιβράβευση ή ποινή για τη μείωση που επιτεύχθηκε ή όχι, ακόμη σε ορισμένες περιπτώσεις και για την απλή συμμετοχή σε κάποιο πρόγραμμα, ενδέχεται να διαφέρουν από πάροχο σε πάροχο δίνοντας την ευκαιρία για τη δημιουργία μεγάλου εύρους προγραμμάτων. Ακόμη, ο χρόνος ειδοποίησης πριν την πραγματοποίηση ενός τέτοιου γεγονότος, οι ώρες που θεωρούνται εντός/εκτός αιχμής (on/off peak) σε κάποιο σύστημα ανάλογα την ημέρα και την εποχή αλλά και η ύπαρξη αρκετών προγραμμάτων για τον αυτόματο έλεγχο μόνο συγκεκριμένων ειδών φορτίων (π.χ. προγράμματα DR αποκλειστικά για τα A/Cs) αυξάνει ακόμα περισσότερο τη γκάμα των επιλογών.

Σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency), η απόκριση ζήτησης μέχρι το 2019 προσέφερε 40 «ευέλικτα» GW και η δυναμική της εκπεφρασμένη ως το άθροισμα των ευέλικτων φορτίων σε κάθε ώρα του έτους, ήταν 4000 TWh (κατά μέσο όρο 457 GW) που αναμένεται να αυξηθεί στις 7000 TWh (κατά μέσο όρο 800 GW) έως το 2040 [17]. Μέχρι το 2050 για την περίπτωση επίτευξης του Net Zero Scenario πρέπει να προσφέρει το 50% της ευελιξίας που θα απαιτεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους μέγιστης ανάγκης ευελιξίας και ως εγκατεστημένη ισχύ να κυμαίνεται γύρω στα 500 GW. Από το 2030 χρειάζεται ήδη να πλησιάζει το 20% [Διάγραμμα 1.9] [31]. Το net zero scenario αναφέρεται σε ένα σενάριο επίτευξης μηδενικών εκπομπών CO₂ έως το 2050, δεδομένου ότι αυτές θα επιτευχθούν χρονικά πρώτα από

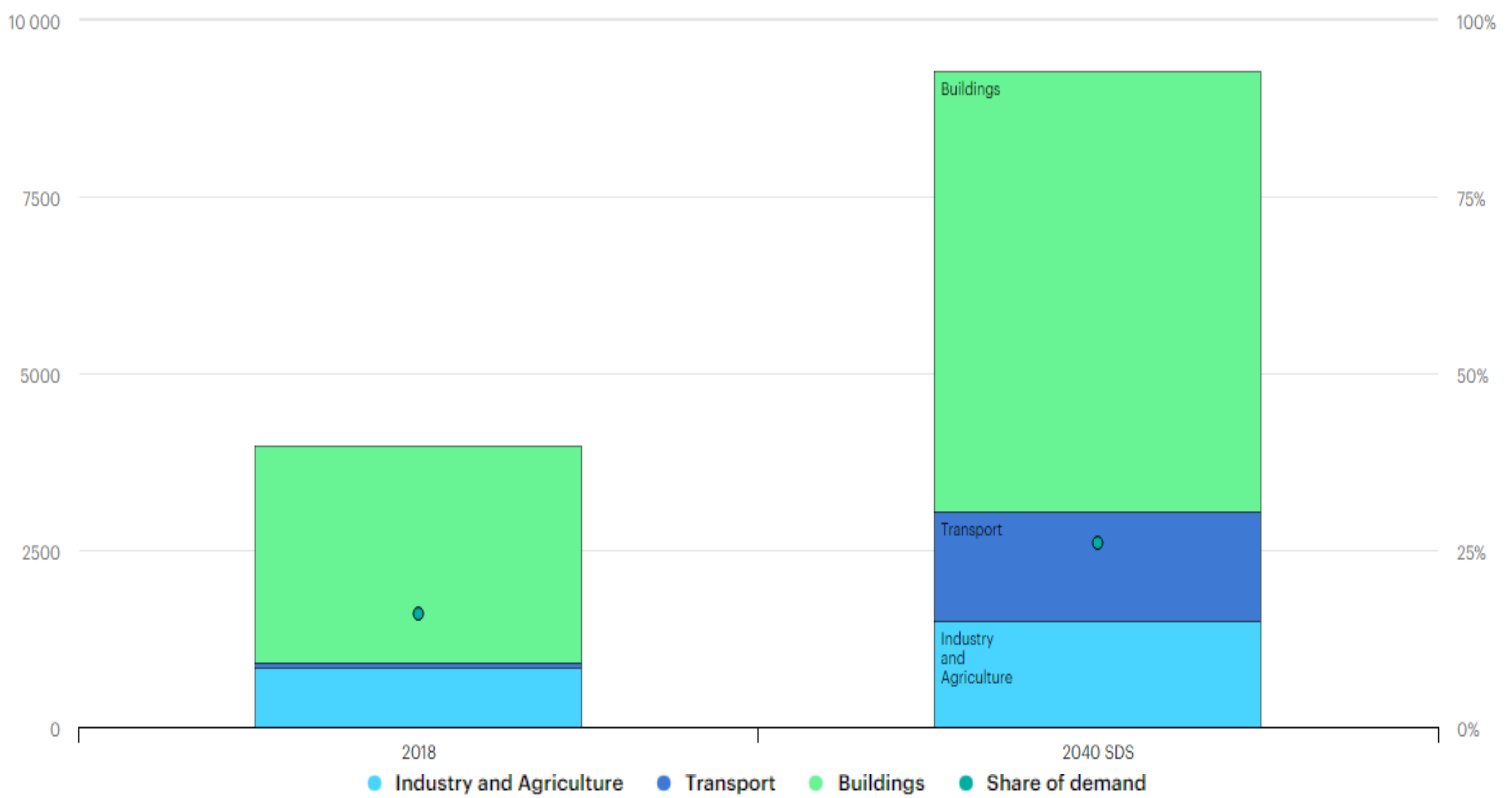
τις πιο ανεπτυγμένες οικονομίες, και εκπλήρωσης ορισμένων ενεργειακών στόχων-κλειδιών βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών. Στο σενάριο βιώσιμης ανάπτυξης (Sustainable Development Scenario) το οποίο περιγράφει την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα που χρειάζεται να επέλθει ώστε να επιτευχθούν οι ενεργειακοί στόχοι βιωσιμότητας των Ηνωμένων Εθνών (Sustainable Development Goals – SDGs) όπως η συμφωνία του Παρισιού (SDG 13), η παγκόσμια πρόσβαση στη μοντέρνα ενέργεια έως το 2030 (SDG 7) και η μείωση της ενεργειακά σχετιζόμενης ρύπανσης και των αντίστοιχων επιπτώσεων στη δημόσια υγεία (SDG 3.9), η απόκριση ζήτησης μέχρι το 2040 πρέπει να αντιστοιχεί σε περίπου 9276 TWh και να αποτελεί το 26% της συνολικής ζήτησης [Διάγραμμα 1.10] [32].

Οι αριθμοί που περιγράφονται παραπάνω είναι ακόμη αρκετά υψηλοί συγκριτικά με την ανάπτυξη που υπάρχει μέχρι πρότινος στον τομέα. Παρόλα αυτά, πέρα από τις πρωτοπόρες χώρες στον χώρο της απόκρισης ζήτησης, οι παγκόσμιες αγορές γενικότερα, ολοένα και δραστηριοποιούνται προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση τα τελευταία χρόνια κάνοντας τα πρώτα τους βήματα. Ορισμένα παραδείγματα ανά τον κόσμο πρώτων δράσεων σχετικά με την απόκριση ζήτησης και γενικότερα της συνεισφοράς της ζήτησης στην ευελιξία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώνονται από την IEA [31] και παρατίθενται παρακάτω:

- Η γαλλική αγορά αύξησε το 2022 κατά 1 GW το demand-side bidding σε σχέση με το 2021 φτάνοντας τα 2,4 GW.
- Το Ηνωμένο Βασίλειο, αν και στη δημοπρασία για τα επόμενα 4 χρόνια (4 year ahead auction) του 2022 παρέμεινε στο 1 GW, υπερδιπλασίασε το ποσό ενέργειας που μπορεί να καλέσει προς μείωση στις περιόδους αιχμής του συστήματος (demand-side resource capacity) φτάνοντας τα 528 MW στη δημοπρασία για τον επόμενο χρόνο (1 year ahead auction).
- Η Νότια Κορέα από την αρχή του 2022 διαθέτει 4,55 GW προς περικοπή σημειώνοντας μείωση της κατανάλωσης κατά 29 GWh τον Δεκέμβριο του 2021 μόνο από price-based απόκριση. Ακόμη από το 2019 διαθέτει το πρόγραμμα «Energy Pause» για οικιακή απόκριση ζήτησης μικρότερη των 70 kW, από το 2020 το πρόγραμμα «Fast DR» για να βελτιώσει τη σταθερότητα της συχνότητας και από το 2021 το πρόγραμμα «Plus DR» για την ελαχιστοποίηση απώλειας ανανεώσιμης ενέργειας.
- Το Βέλγιο στην πρώτη του δημοπρασία για τα επόμενα 4 χρόνια (4 year ahead auction) τον Οκτώβριο του 2021 εξασφάλισε 4,45 GW κάλυψης αιχμής από τα οποία ωστόσο μόνο το 8% προέρχεται από τη μεριά της ζήτησης και από συστήματα αποθήκευσης.
- Η Αυστραλία εισήγαγε μηχανισμό πώλησης απόκρισης ζήτησης στη χονδρική αγορά και πεντάλεπτες (έναντι τριαντάλεπτων) περιόδους για τις τιμές spot, ενθαρρύνοντας τις επενδύσεις σε συστήματα αποθήκευσης.
- Η Κολομβία πραγματοποίησε τα πρώτα βήματα διαμορφώντας έναν πρώτο ρυθμιστικό μηχανισμό απόκρισης ζήτησης και ενέκρινε την εισαγωγή στοιχείων AMI στα συστήματά της.
- Η Ολλανδία υποχρεώνει πλέον την συμμετοχή σε παραγωγούς και καταναλωτές άνω των 60 MW στην παροχή ευελιξίας για το σύστημα στις περιοχές με προβλήματα κορεσμού.



Διάγραμμα 1.9 Παγκόσμια διαθεσιμότητα απόκρισης ζήτησης σε GW και ως ποσοστό της μέσης ετήσιας ζήτησης κατά τις περιόδους μέγιστης ανάγκης ευελιξίας του συστήματος (2030 για net zero emissions scenario)

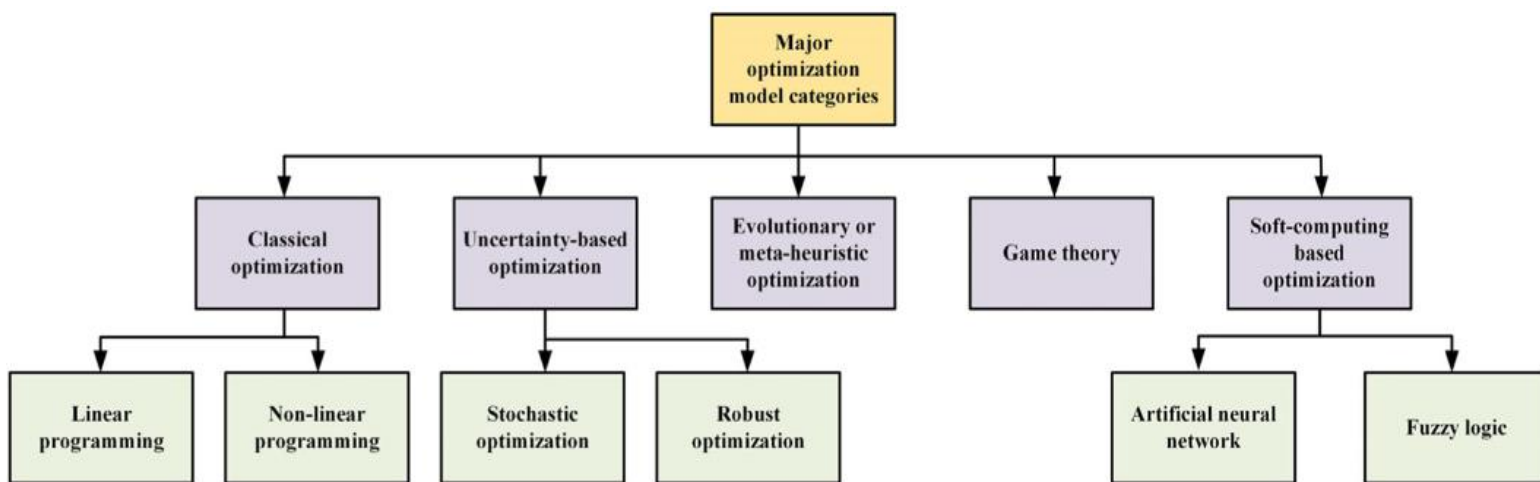


Διάγραμμα 1.10 Διαθεσιμότητα απόκρισης ζήτησης σε TWh και ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης (2040 για Sustainable Development Scenario)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Βελτιστοποίηση διαχείρισης οικιακής ζήτησης

Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες ανάπτυξης μαθηματικών μοντέλων που αφορούν τη βέλτιστη διαχείριση της οικιακής ζήτησης, κάθε μία από τις οποίες επιλέγει διαφορετική μαθηματική μεθοδολογία, ανάλογα με τις συνθήκες του προβλήματος που διαμορφώνει. Σε κάθε περίπτωση, η μελέτη έγκειται στην επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, γι' αυτό και οι διάφορες μέθοδοι αφορούν αλγορίθμους που βρίσκουν εφαρμογή σε τέτοιου είδους προβλήματα. Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει σχηματικά όλες τις μεθοδολογίες που συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μελέτες.



Σχήμα 2.1 Μαθηματικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης διαχείρισης οικιακής ζήτησης

Κάθε πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης της ζήτησης διαφέρει από ένα άλλο ως προς τις εξής κατηγορίες :

1. Μαθηματική μεθοδολογία
2. Αντικειμενική συνάρτηση
3. Περιορισμοί
4. Μεταβλητές απόφασης
5. Τεχνικές διαχείρισης ζήτησης

Καθώς ο έλεγχος και η διαχείριση της οικιακής ζήτησης (τεχνικές διαχείρισης ζήτησης) μπορεί να συμβεί με πολλούς τρόπους (π.χ. load curtailment, load shifting κ.α.) και επηρεάζει όχι μόνο τους καταναλωτές αλλά και το σύστημα ως σύνολο, η γκάμα των επιλογών όσον αφορά τα αποτελέσματα που επιδιώκονται (αντικειμενική συνάρτηση), τις μεταβλητές του προβλήματος και τους περιορισμούς που τίθενται σε κάθε πρόβλημα είναι πολύ μεγάλη. Η παράγραφος 2.2 αυτού του κεφαλαίου επικεντρώνεται μόνο στις μελέτες αντικειμενικών συναρτήσεων που αφορούν αποκλειστικά την ελαχιστοποίηση του κόστους του καταναλωτή. Στην παράγραφο 2.3 γίνεται αναφορά στις μελέτες που πραγματεύονται την μεγιστοποίηση/ελαχιστοποίηση στοιχείων του συστήματος που δεν αφορούν αποκλειστικά τον οικιακό καταναλωτή αλλά το σύστημα ως σύνολο

ή άλλους συμμετέχοντες σε αυτό (πάροχους ηλεκτρικής ενέργειας, ΦοΣΕ απόκρισης ζήτησης κ.α.) προς ανάδειξη της ποικιλίας των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει ο έλεγχος της οικιακής ζήτησης. Τέλος, στην παράγραφο 2.4, αναφέρονται μελέτες που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση οικολογικών αποτελεσμάτων μέσω του ελέγχου της οικιακής ζήτησης. Καθότι το μοντέλο της παρούσας εργασίας εντάσσεται στα πλαίσια του στοχαστικού προγραμματισμού, η παράγραφος 2.5 αναλύει τις μελέτες βέλτιστης διαχείρισης της οικιακής ζήτησης μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου. Στη συντριπτική πλειοψηφία των μελετών που θα παρατεθούν στη συνέχεια, η διαχείριση της οικιακής ζήτησης πραγματοποιείται μέσω price-based προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης.

2.2 Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης ελαχιστοποίησης κόστους του καταναλωτή

Η πλειοψηφία των μελετών που αναπτύσσουν μοντέλα βέλτιστης διαχείρισης οικιακής ζήτησης αφορούν την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που ελαχιστοποιεί τα ενεργειακά έξοδα του οικιακού καταναλωτή μέσω της οικονομικότερης κατανομής λειτουργίας των συσκευών του μέσα σε κάποιον χρονικό ορίζοντα, συνήθως μία ημέρα. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του μοντέλου είναι δυνατόν να προστεθούν σε δεύτερη φάση και άλλοι παράμετροι βελτιστοποίησης εκτός από το οικονομικό όφελος. Για παράδειγμα, ο Sajjad Golshannavaz (2018) [33] αναπτύσσει ένα μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους του καταναλωτή, το οποίο έπειτα από την επίτευξη αυτού του στόχου αξιοποιεί ένα EV (electric vehicle) και ένα οικιακό ESS (energy storage system), με δυνατότητα επιστροφής ενέργειας στο σύστημα, για να βελτιώσει τον συντελεστή ισχύος της home-to-grid σύνδεσης. Η συγκεκριμένη παράγραφος δεν αναφέρεται σε τέτοιου είδους μελέτες.

Χρειάζεται να σημειωθεί πως στην συντριπτική πλειοψηφία τους, τα μοντέλα βελτιστοποίησης συνδυάζουν την ελαχιστοποίηση του κόστους είτε με τη μεγιστοποίηση της «άνεσης» του καταναλωτή είτε με περιορισμούς που αφορούν μέγιστα επιτρεπόμενα όρια κατανάλωσης σε κάθε χρονική περίοδο. Η πρώτη περίπτωση έγκειται στη δημιουργία ενός προγραμματισμού κατανάλωσης που αφενός επιφέρει εξοικονόμηση χρημάτων αφετέρου μπορεί να ακολουθείται από τον καταναλωτή, καθώς δεν τον προτρέπει σε ένα πρόγραμμα που αντιτίθεται σε τυπικές καθημερινές καταναλωτικές συνήθειες (π.χ το EV πρέπει να φορτίσει τις βραδινές ώρες, ακόμη και αν για κάποιο λόγο η τιμή του ηλεκτρισμού είναι υψηλή για αυτές). Η «άνεση» του καταναλωτή μπορεί να μοντελοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους σε κάθε μελέτη. Για παράδειγμα οι S.Althaher, P.Mancarella και J.Mutale (2015) [24] εξετάζουν την ελαχιστοποίηση του κόστους για διάφορες τιμές της άνεσης του καταναλωτή την οποία ορίζουν ως τον λόγο της ενέργειας που τελικά δεν καταναλώνεται από curtailable συσκευές, λόγω επιβολής ανώτατου ορίου κατανάλωσης, προς τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια αυτών όταν δεν εφαρμόζεται κάποια μέθοδος διαχείρισης της ζήτησης. Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή κατά την επιβολή ανώτατων ορίων κατανάλωσης σε κάθε χρονική περίοδο, αντιμετωπίζεται ένα από τα βασικότερα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθεί κατά τη μαζική απόκριση ζήτησης και αφορά στη μεταφορά μεγάλου μέρους της κατανάλωσης στις περιόδους χαμηλών τιμών, δημιουργώντας έτσι νέες αιχμές ζήτησης για το σύστημα και προκαλώντας προβλήματα στο δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται με τον όρο rebound effect και με απλά λόγια περιγράφει την έντονη αύξηση

κατανάλωσης τη στιγμή που τελειώνει η περίοδος των υψηλών τιμών ρεύματος για την αναπλήρωση των «χαμένων» υπηρεσιών. Μάλιστα, η σημασία της επιβολής ανώτατων ορίων κατανάλωσης φανερώνεται από την παρουσία μελετών που στοχεύουν αποκλειστικά στη διατήρηση της αιχμής της οικιακής κατανάλωσης κάτω από συγκεκριμένα όρια, όπως η μελέτη των M.Pirattanasomporn, M.Kuzlu και S.Rahman (2011) [34] όπου μέσω της διαχείρισης των οικιακών φορτίων επιδιώκεται η διατήρηση της κατανάλωσης, σε κάθε χρονική περίοδο, κάτω από ένα ανώτατο όριο, εξετάζοντας με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα της μαζικής απόκρισης ζήτησης χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων από την αύξηση της κατανάλωσης σε περιόδους χαμηλών τιμών του ρεύματος.

Οι Chen, Wu και Fu (2012) [35], παρουσιάζουν δύο μοντέλα (stochastic-robust) ελαχιστοποίησης του κόστους, υπό καθεστώς real-time τιμολόγησης, ενσωματώνοντας το οικονομικό ρίσκο που φέρει η αβεβαιότητα της τιμής του ρεύματος και παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα της μεταξύ τους σύγκρισης. Οι Li, Hong (2013) [36], δημιουργούν έναν αλγόριθμο που αξιοποιεί το ωριαίο ποσό που διατίθεται να ξοδέψει ο καταναλωτής και ένα ESS (Energy Storage System) για μεγαλύτερη ευελιξία. Γενικότερα, τα συστήματα αποθήκευσης, οι μονάδες αυτό-παραγωγής και τα EV αποτελούν τις βασικότερες συνιστώσες ευελιξίας της ζήτησης, ωστόσο η συγκεκριμένη μελέτη δε λαμβάνει υπόψιν τα δύο τελευταία στοιχεία. Αντίθετα, οι Jiayun Zhao et al. (2013) [37] ελαχιστοποιούν το κόστος όταν είναι διαθέσιμα και τα τρία στοιχεία (PHEV, PV, ESS) παρουσιάζοντας αποτελέσματα υπό Real Time τιμολόγηση, Time of Use τιμολόγηση και Load curtailment ως μεθόδους διαχείρισης της ζήτησης. Η μοντελοποίηση του EV στην αναλυτικότερη μορφή της, περιλαμβάνει εκτός από τη φόρτισή του, τις περιπτώσεις επιστροφής ενέργειας στο σύστημα (V2G – Vehicle to Grid) και παροχής ενέργειας στο σπίτι (V2H – Vehicle to Home). Στην πρώτη περίπτωση μοντελοποιείται η δυνατότητα του καταναλωτή να πουλήσει ενέργεια στο δίκτυο (όταν η λειτουργία του συστήματος το επιτρέπει) και στη δεύτερη η δυνατότητα λειτουργίας του EV ως μία μονάδα αποθήκευσης για την κάλυψη της οικιακής ζήτησης σε περιόδους υψηλών τιμών, μέσω της εκφόρτισής του σε αυτές τις περιόδους, και αντίστοιχα της φόρτισής του σε περιόδους χαμηλών τιμών. Η μελέτη των M.Rastegar και M.F.Firuzabad (2014) [38] παρουσιάζει τα αποτελέσματα ελαχιστοποίησης του κόστους όταν λαμβάνονται υπόψιν όλες οι παραπάνω λειτουργίες του EV μέσω του βέλτιστου προγραμματισμού φόρτισης/εκφόρτισής του. Οι Erdinc et al. (2014) [39] συνδυάζουν την παρουσία μονάδας αυτοπαραγωγής (PV), EV με δυνατότητα επιστροφής ενέργειας στο δίκτυο (V2G) και παροχής ενέργειας στο σπίτι (V2H) και ESS υπό real-time τιμολόγηση, χωρίς όμως την ειδική μοντελοποίηση των ευέλικτων φορτίων ψύξης-θέρμανσης. Οι N.Paterakis et al. (2014) [40] περιλαμβάνουν πέρα από όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία και μία ειδική μοντελοποίηση των θερμοστατικά ελεγχόμενων φορτίων παρουσιάζοντας μία λεπτομερέστερη χρονική ανάλυση ανά περίοδο ενός λεπτού.

2.3 Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης βελτιστοποίησης στοιχείων που δεν αφορούν τον καταναλωτή

Όπως αναλύεται στο πρώτο κεφάλαιο, η ευελιξία των ηλεκτρικών καταναλωτών μπορεί να εκμεταλλευθεί, όχι μόνο προς δικό τους (οικονομικό) όφελος, αλλά και συγκεντρωτικά από το ίδιο το σύστημα και τους διαχειριστές του ή τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Πίνακας 2.1

εμπεριέχει περιγραφικά τις μελέτες όπου μέσω της διαχείρισης της οικιακής ζήτησης επιδιώκεται η μεγιστοποίηση/ελαχιστοποίηση στοιχείων που δεν αφορούν αποκλειστικά τον καταναλωτή, αλλά το σύστημα ως σύνολο και γενικότερα κάθε συμμετέχοντα σε αυτό (πάροχο, διαχειριστή, ΦοΣΕ απόκρισης ζήτησης κ.α.). Από την ποικιλότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων αναδεικνύεται το εύρος των προοπτικών που μπορεί να προσφέρει ο έλεγχος της οικιακής ζήτησης για το σύστημα της ηλεκτρικής ενέργειας ως σύνολο.

Βιβλιογραφική πηγή	Τεχνική διαχείρισης ζήτησης	Αντικειμενική συνάρτηση
Linear Programming		
Kurucz et al. (1996) [41]	<ul style="list-style-type: none"> • DLC • Peak Shaving 	Ελαχιστοποίηση αιχμής συστήματος
Mazidi et al. (2014) [42]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment • Load shifting 	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους συστήματος
Ng, Sheble (1998) [43]	<ul style="list-style-type: none"> • DLC • CPP 	Μεγιστοποίηση κέρδους παρόχου
Mixed-Integer Linear Programming		
Parvania et al. (2013) [44]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment • Load shifting 	Μεγιστοποίηση εσόδων ΦοΣΕ στην αγορά της επόμενης ημέρας (day-ahead market)
Henriquez et al. (2017) [45]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment • Load shaping 	Ελαχιστοποίηση αιχμής συστήματος
Aghaei, Alizadeh (2013) [46]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους μονάδας CHP τροφοδοσίας μικροδικτύου
Mixed-Integer Non Linear Programming		
Alipour et al. (2017) [47]	<ul style="list-style-type: none"> • Peak shaving 	Ελαχιστοποίηση κόστους ικανοποίησης ζήτησης σε EH (Energy Hub)
Helal et al. (2017) [48]	<ul style="list-style-type: none"> • DLC • Load shifting • CPP 	Ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής αποκεντρωμένων μονάδων σε απομονωμένα μικροδίκτυα

Dynamic programming		
Chu et al. (1993) [49]	<ul style="list-style-type: none"> • DLC • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση περικοπής φορτίου του συστήματος
Cohen, Wang (1988) [50]	<ul style="list-style-type: none"> • Peak shaving • DLC 	Ελαχιστοποίηση αιχμής συστήματος
Hsu, Su (1991) [51]	<ul style="list-style-type: none"> • DLC • Peak Shaving 	Ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής του συστήματος
Stochastic programming		
Trovato et al. (2017) [52]	<ul style="list-style-type: none"> • Load shifting 	Ελαχιστοποίηση κόστους συστήματος με έλεγχο TCLs (Thermostatically Controlled Loads) ως εφεδρεία
Samadi et al. (2014) [53]	<ul style="list-style-type: none"> • RTP • IBR (Inclined Block Rates) 	Ελαχιστοποίηση PAR (Peak to Average Ratio) πολλών καταναλωτών
Sun et al. (2015) [54]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση μακροπρόθεσμου κόστους του συστήματος
Khaloie et al. (2021) [55]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγιστοποίηση κέρδους • Ελαχιστοποίηση ρίσκου • Μεγιστοποίηση πιθανότητας αύξησης κέρδους <p>Υβριδικής μονάδας παραγωγής</p>
Vahedipour-Dahraie et al. (2022) [56]	<ul style="list-style-type: none"> • IBR • RTP 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγιστοποίηση κέρδους διαχειριστή • Ελαχιστοποίηση κόστους καταναλωτών • Μεγιστοποίηση αξιοπιστίας <p>μικροδικτύου</p>
Vahedipour-Dahraie et al. (2017) [57]	<ul style="list-style-type: none"> • Peak shaving 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγιστοποίηση κέρδους • Ελαχιστοποίηση ρίσκου διαχειριστή <p>μικροδικτύου</p>

Robust		
Majidi et al. (2019) [58]	<ul style="list-style-type: none"> • Load shifting • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση λειτουργικών εξόδων μονάδας CHP (Combined Heat Power)
Evolutionary/Meta-heuristic concepts		
Meng, Zeng (2015) [59]	<ul style="list-style-type: none"> • Load shifting • Day Ahead pricing 	Μεγιστοποίηση κέρδους παρόχου το επόμενο 24ωρο
Pedrasa et al. (2009) [60]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση κόστους καταναλωτή • Ελαχιστοποίηση διακοπής λειτουργίας interruptible φορτίων
Faria et al. (2013) [61]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους VPP (Virtual power plant)
Carrasqueira et al. (2017) [62]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment • IBR 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγιστοποίηση κέρδους παρόχου • Ελαχιστοποίηση κόστους καταναλωτή
Hu et al. (2014) [63]	<ul style="list-style-type: none"> • ToU pricing • Load shifting 	Ελαχιστοποίηση διακοπών ρεύματος
Rahman et al. (2018) [64]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση παραβιάσεων άνεσης του καταναλωτή • Ελαχιστοποίηση διακοπών ρεύματος
Qian et al. (2013) [65]	<ul style="list-style-type: none"> • RTP • Peak shaving 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγιστοποίηση κέρδους παρόχου • Μεγιστοποίηση κέρδους καταναλωτή
Cui et al. (2012) [66]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγιστοποίηση κέρδους παρόχου • Ελαχιστοποίηση κόστους καταναλωτή
Bharathi et al. (2017) [67]	<ul style="list-style-type: none"> • Load shifting • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση ζήτησης σε περιόδους αιχμής συστήματος

Jayadev, Swarup (2013) [68]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment • Load shifting 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής • Ελαχιστοποίηση παραβίασης άνεσης καταναλωτή
Hazra et al. (2012) [69]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση κορεσμού γραμμών • Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους συστήματος
Liu et al. (2011) [70]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	Ελαχιστοποίηση κορεσμού γραμμών
Zhang et al. (2016) [71]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής • Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους
Game theory		
Kim et al. (2013) [72]	<ul style="list-style-type: none"> • Load shifting 	Μεγιστοποίηση κοινωνικού πλεονάσματος
Sheikhi et al. (2015) [73]	<ul style="list-style-type: none"> • Load curtailment • Peak shaving 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση PAR • Ελαχιστοποίηση κόστους ενέργειας σε SE hub (Smart Energy hub)

***Πίνακας 2.1** Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης βελτιστοποίησης στοιχείων που δεν αφιερώνουν αποκλειστικά τους καταναλωτές*

2.4 Μελέτες διαχείρισης οικιακής ζήτησης βελτιστοποίησης οικολογικών αποτελεσμάτων

Κάθε μελέτη που στοχεύει στη βέλτιστη διαχείριση της οικιακής ζήτησης αποσκοπεί τελικά στην αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος ανεξάρτητα από το στοιχείο που επιδιώκει να βελτιστοποιήσει. Αυτό συμβαίνει ακόμη και στις περιπτώσεις όπου οι επιπτώσεις της διαχείρισης της ζήτησης στο σύστημα αγνοούνται από το πρόβλημα, όπως για παράδειγμα σε μελέτες που έχουν μοναδικό σκοπό τη μέγιστη εξοικονόμηση χρημάτων για έναν οικιακό καταναλωτή, καθώς σε κάθε περίπτωση ο καταναλωτής υπόκειται σε ένα σύστημα τιμολόγησης που θεωρητικά διαμορφώνεται με σκοπό μια οικονομικότερη/αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος. Έτσι, το οικολογικό αποτέλεσμα σε κάθε μελέτη διαχείρισης της οικιακής ζήτησης είναι θετικό. Παρόλα αυτά, αν και πολλές μελέτες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της οικολογικής συνεισφοράς του μοντέλου που αναπτύσσουν (συνήθως με παρουσίαση της μείωσης εκπομπών CO₂), λίγες είναι

αυτές που επικεντρώνονται στις οικολογικές επιπτώσεις εμπεριέχοντάς τες στην αντικειμενική τους συνάρτηση.

Σε σχετικές μελέτες βέλτιστης διαχείρισης της οικιακής ζήτησης προς βελτιστοποίηση οικολογικών στοιχείων, οι Jamsid Aghaei και Mohammad-Iman Alizadeh (2013) [74], παρουσιάζουν ένα μοντέλο μικροδικτύου που βασίζεται στην παραγωγή CHP (Combined Heat Power) μονάδων, με ενσωματωμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems - ESSs). Η μελέτη αναπτύσσει ένα μοντέλο βέλτιστης κατανομής των ενεργειακών πόρων στο χρονικό ορίζοντα της επόμενης ημέρας με σκοπό αρχικά την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του μικροδικτύου και έπειτα την ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπων όπως οξείδια του θείου και του αζώτου (SO_x, NO_x) από τη λειτουργία των θερμικών μονάδων παραγωγής. Στη μελέτη των C.H. Antunes, A.G. Martins και I.S. Brito (1996) [75], αναπτύσσεται ένα μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων κατά τη διαδικασία αύξησης της μέγιστης παραγωγής ενέργειας του συστήματος (capacity). Οι συγγραφείς θέτουν ως στόχους την ελαχιστοποίηση του κόστους επέκτασης του συστήματος και την ελαχιστοποίηση των οικολογικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την προστιθέμενη παραγωγή. Η μελέτη των M.M.Bidgoli et al. (2021) [76], αναπτύσσει ένα μοντέλο βέλτιστου προγραμματισμού λειτουργίας EH (Energy Hub) στο οποίο λαμβάνεται υπόψιν ως αρχικός στόχος η ελαχιστοποίηση του κόστους, και σε δεύτερη φάση η ελαχιστοποίηση των εκπομπών, των διακοπών ρεύματος και της απαιτούμενης εφεδρείας. Τέλος, οι T.Logenthiran, D. Srinivasan και T.Z.Shun (2012) [77] αναπτύσσουν έναν αλγόριθμο εφαρμογής load shifting που μπορεί να προσαρμόζεται αναλόγως το στόχο που επιλέγεται να επιτευχθεί από τη διαχείριση της ζήτησης, ο οποίος όπως αναφέρουν μπορεί να αφορά μεταξύ άλλων τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα.

2.5 Μελέτες βέλτιστης διαχείρισης οικιακής ζήτησης στοχαστικού προγραμματισμού

Κατά τη διαμόρφωση προβλημάτων βελτιστοποίησης στο πεδίο διαχείρισης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίζονται στοιχεία των οποίων οι τιμές είναι αβέβαιες. Μία από τις μεθόδους αντιμετώπισης αυτού του είδους προβλημάτων τα οποία λαμβάνουν υπόψιν την αβεβαιότητα στην τιμή διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος αποτελεί ο στοχαστικός προγραμματισμός [Σχήμα 2.1]. Σημειώνεται ότι πολλές από τις μελέτες του Πίνακα 2.1 που υπάγονται στις ομάδες ‘Robust’ και ‘Evolutionary/Meta-heuristic concepts’ αντιμετωπίζουν επίσης το πρόβλημα της στοχαστικότητας, αλλά οι μελέτες των συγκεκριμένων κατηγοριών δεν αναλύονται.

Στη σχετική βιβλιογραφία, οι M.Shafie-Khan και P.Siano (2018) [78], προτείνουν ένα μοντέλο HEMS που ενσωματώνει την αβεβαιότητα της διαθεσιμότητας ενός EV και της αυτοπαραγωγής μικρής κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψιν την άνεση του καταναλωτή, τους τεχνικούς περιορισμούς των μπαταριών του EV και του οικιακού ESS, όπως και των οικιακών ηλεκτρικών συσκευών προς ελαχιστοποίηση του κόστους του καταναλωτή. Οι V.Trovato, F.Teng και G.Strbac (2018) [52], αναπτύσσουν ένα μοντέλο βέλτιστης κατανομής λειτουργίας ενός ετερογενούς πληθυσμού TLCs (Thermostatically Controlled Loads) και εφεδρικών μονάδων παραγωγής. Οι P.Samadi et al.

(2014) [53] δημιουργούν έναν αλγόριθμο τιμολόγησης για την ελαχιστοποίηση του PAR ενσωματώνοντας την αβεβαιότητα της επίδρασης της τιμής στη μεταβολή των προφίλ κατανάλωσης των καταναλωτών. Οι S.Sun, M.Dong και B.Liang (2016) [54], μοντελοποιούν ένα σύστημα με μία συμβατική και πολλές μονάδες ανανεώσιμης παραγωγής σε συνδυασμό με μονάδες αποθήκευσης, όπου ένας ΦοΣΕ είναι υπεύθυνος για την εξισορρόπηση του συστήματος. Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μακροπρόθεσμου κόστους, το μοντέλο τους περιλαμβάνει την αβεβαιότητα της ανανεώσιμης παραγωγής, της λειτουργίας των φορτίων και της τιμής της ενέργειας. Την αβεβαιότητα των συγκεκριμένων παραμέτρων λαμβάνουν υπόψιν και οι T.Li και M.Dong (2018) [79] σε ένα μοντέλο βέλτιστης κατανομής λειτουργίας του οικιακού φορτίου παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας προς ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος. Οι Y.Guo et al. (2013) [80] μοντελοποιούν πλήθος οικιακών καταναλωτών με δυνατότητα ανανεώσιμης αυτο-παραγωγής και διάθεσης μονάδων αποθήκευσης όπου μια LSE (Load-Serving Entity) επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, με στοχαστικότητα στην ανανεώσιμη παραγωγή, στο κόστος της ενέργειας και στη λειτουργία των φορτίων. Η μελέτη των M.M. Bidgoli (2021) [76], η οποία αναφέρεται και στην προηγούμενη παράγραφο λόγω των περιβαλλοντικών στόχων που θέτει στη λειτουργία ενός ΕΗ, ενσωματώνει στο μοντέλο στοχαστικά την ανανεώσιμη παραγωγή, την τιμή της ενέργειας και τη λειτουργία των φορτίων. Οι H.Khaloie et.al (2021) [55] σε έναν υβριδικό σταθμό παραγωγής (Hybrid Power Plant - HPP) με αιολική και ηλιακή παραγωγή, μονάδες αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES), συστήματα αποθήκευσης μπαταριών και θερμικές μονάδες που συμμετέχουν στην ενδοημερήσια αγορά (intraday market) και στην αγορά επόμενης ημέρας (day-ahead market), ενσωματώνουν στοχαστικά τις αβεβαιότητες των αγορών και της ανανεώσιμης παραγωγής για την ανάπτυξη ενός μοντέλου περιορισμού και αποφυγής του οικονομικού ρίσκου. Οι M.Vahedipour-Dahraie et al. (2022) [56] σε ένα μοντέλο μεγιστοποίησης των κερδών ενός διαχειριστή μικροδικτύου με δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας, σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους για τους καταναλωτές, ενσωματώνουν τις αβεβαιότητες της τιμής, της λειτουργίας των φορτίων, της ανανεώσιμης παραγωγής, της ανάγκης για εφεδρεία και της διάρκειας αυτόνομης λειτουργίας του μικροδικτύου. Τέλος, σε μια παρόμοιας λογικής μελέτη αποφυγής ρίσκου ενός διαχειριστή μικροδικτύου, οι M.Vahedipour-Dahraie et al. (2017) [57], επιδιώκουν τη μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ/ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται το μοντέλο της βέλτιστης κατανομής λειτουργίας των πιο ενεργοβόρων συσκευών ενός τυπικού οικιακού καταναλωτή μέσα στην ημέρα, προς ελαχιστοποίηση των ενεργειακών του εξόδων. Το κεφάλαιο διαχωρίζεται σε δύο κύρια μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η ντετερμινιστική εκδοχή του μοντέλου, με τους διάφορους υπολογισμούς να συμβαίνουν αφού οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου είναι γνωστές (ex-post deterministic model). Το δεύτερο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζει τη στοχαστική εκδοχή, ενσωματώνοντας τις αβεβαιότητες της παραγωγής των ΑΠΕ, της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς επόμενης ημέρας και της ανελαστικής κατανάλωσης (ex-ante stochastic model).

3.1 Ντετερμινιστικό μοντέλο (ex-post deterministic model)

3.1.1 Πειραματικά δεδομένα

3.1.1.1 Δεδομένα κατανάλωσης

- Για τις ανάγκες της εργασίας προμηθευτήκαμε τα δεδομένα κατανάλωσης ενός ανώνυμου οικιακού καταναλωτή για το δεκαήμερο 3/9/2022 – 12/9/2022. Η κατανάλωση μετράται ανά λεπτό και χωριστά για κάθε φάση της τριφασικής σύνδεσης. Τα δεδομένα έχουν τη μορφή του παρακάτω πίνακα [Πίνακας 3.1].

Χρόνος	Φάση 0 (kWh)	Φάση 1 (kWh)	Φάση 2 (kWh)
3/9/2022 00:00	Τιμή ₁₁	-	-
3/9/2022 00:00	-	Τιμή ₁₂	Τιμή ₁₃
3/9/2022 00:01	Τιμή ₂₁	Τιμή ₂₂	Τιμή ₂₃
3/9/2022 00:02	-	Τιμή ₃₂	Τιμή ₃₃
3/9/2022 00:02	Τιμή ₃₁	-	-

Πίνακας 3.1 Πίνακας μορφής δεδομένων κατανάλωσης

- Εκτός από τις τιμές κατανάλωσης, στη διάθεσή μας έχουμε ένα logbook όπου ο καταναλωτής σημειώνει τις περιόδους λειτουργίας κάθε συσκευής μέσα σε αυτές τις 10 ημέρες. Το logbook έχει τη μορφή του παρακάτω πίνακα [Πίνακας 3.2] (τυχαίες τιμές).

Ημερομηνία	Συσκευή	Από	Έως	Φάση
3/9/2022	Φούρνος	15:02	15:45	-
3/9/2022	Ηλεκτρική Σκούπα	14:23	14:46	0
4/9/2022	A/C	15:30	18:20	2
5/9/2022	Πλυντήριο πιάτων	14:00	14:20	-

Πίνακας 3.2 Πίνακας μορφής δεδομένων logbook

3.1.1.2 Δεδομένα παραγωγής ΑΠΕ, υδροηλεκτρικής παραγωγής και φορτίου συστήματος

Η διαφοροποίηση στο οικονομικό αποτέλεσμα, για κάθε διαφορετική κατανομή λειτουργίας των συσκευών, προκύπτει από την τιμολόγηση του καταναλωτή με διαφορετικές τιμές για διαφορετικές ώρες της ημέρας. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζουμε μία υβριδική ΤοU ταρίφα αποτελούμενη από 4 blocks. Το οικονομικότερο block της ταρίφας θα είναι εκείνο του οποίου οι ώρες της ημέρας παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης του φορτίου του συστήματος από ΑΠΕ και υδροηλεκτρική παραγωγή.

Για αυτό το λόγο, προμηθευόμαστε τα δεδομένα παραγωγής και φορτίου που χρειαζόμαστε από τα αρχεία αποτελεσμάτων των Ενοποιημένων Προγραμματισμών Συστήματος του ΑΔΜΗΕ (Integrated Scheduling Process - ISP). Ο Ενοποιημένος Προγραμματισμός προκύπτει ως λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει τις διάφορες προσφορές για εξισσορόπηση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψιν τους διάφορους λειτουργικούς περιορισμούς που φέρουν, καθώς και τις ανάγκες του συστήματος, με στόχο την κάλυψη των προβλεπόμενων ανισσοροπιών παραγωγής-κατανάλωσης και την προμήθεια της απαιτούμενης εφεδρείας της επόμενης ημέρας με το λιγότερο δυνατό κόστος. Ο παρακάτω πίνακας [Πίνακας 3.3] εμπεριέχει αναλυτικά το χρονοδιάγραμμα δημοσίευσης και εκτέλεσης των αποτελεσμάτων των προγραμματισμών. Για τις ανάγκες του ντετερμινιστικού μοντέλου χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του 1^{ου} Ενοποιημένου Προγραμματισμού κάθε ημέρας (ISP 1).

Ημέρα D						
	ISP 1		ISP 2		ISP 3	
	Δημοσίευση	Εκτέλεση	Δημοσίευση	Εκτέλεση	Δημοσίευση	Εκτέλεση
Ημέρα	D - 1	D - 1	D - 1	D	D	D
Ωρα (EET)	9:30	16:15	21:00	00:00	9:00	12:00

Πίνακας 3. 3 Χρονοδιάγραμμα δημοσίευσης-εκτέλεσης Ενοποιημένων Προγραμματισμών Συστήματος (ISP)

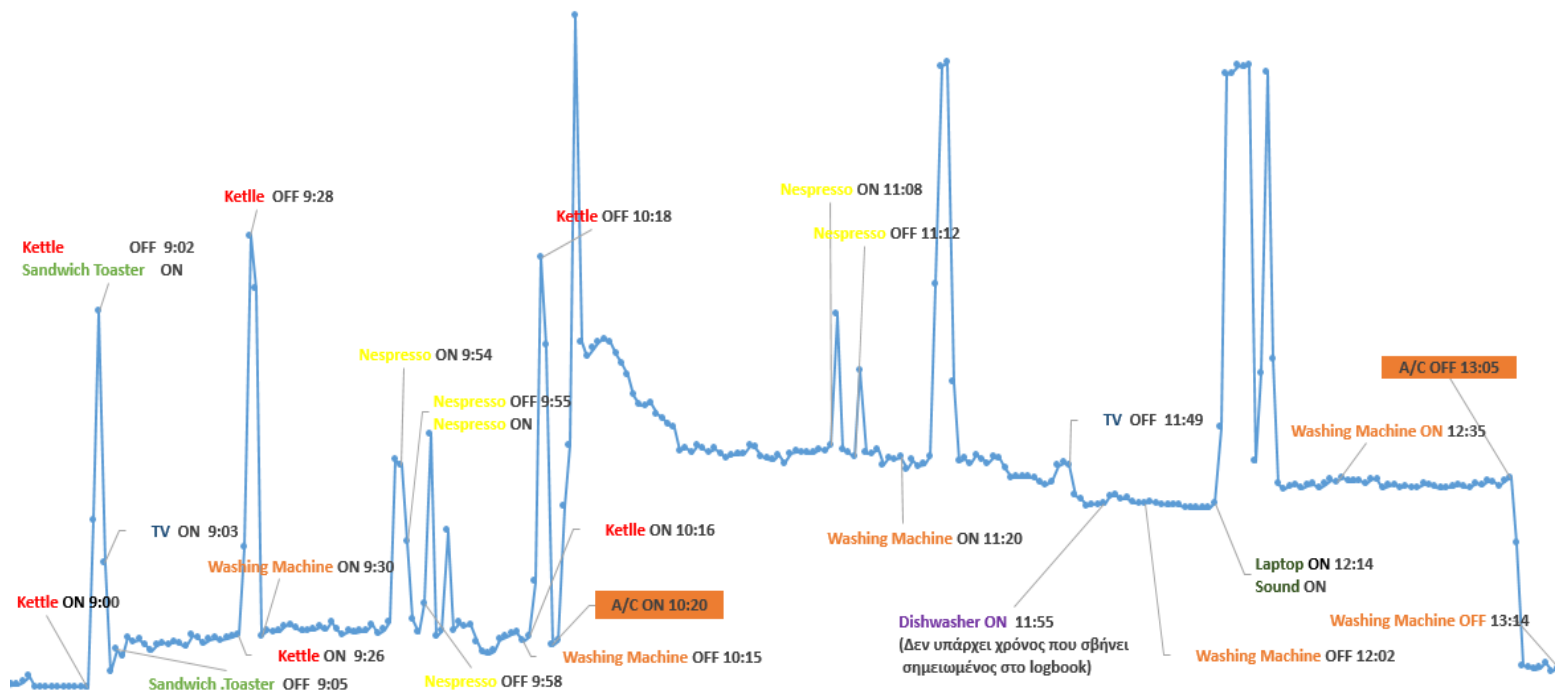
3.1.2 Μεθοδολογία

1^ο Βήμα : Επεξεργασία Δεδομένων Κατανάλωσης (Load Disaggregation)

Για τις ανάγκες του μοντέλου απαιτείται ο διαχωρισμός της κατανάλωσης των πιο ενεργοβόρων φορτίων από τη συνολική κατανάλωση (load disaggregation). Οι καταναλώσεις των ενεργοβόρων φορτίων θα θεωρηθούν ως ευέλικτη κατανάλωση (flexible) και είναι αυτές που το μοντέλο θα μας υποδείξει σε ποιες χρονικές περιόδους (ώρες) πρέπει να υπερτεθούν στην κατανάλωση των υπόλοιπων φορτίων την οποία θα θεωρήσουμε μη-ευέλικτη (inflexible) και δε θα επηρεάσουμε, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Για τον εντοπισμό των ενεργοβόρων φορτίων δημιουργείται ένα διάγραμμα συνολικής κατανάλωσης-χρόνου σύμφωνα με τα δεδομένα κατανάλωσης που έχουμε στη διάθεσή μας. Η συνολική κατανάλωση προκύπτει από το άθροισμα των μετρήσεων των τριών φάσεων σε κάθε

λεπτό. Το logbook μας βοηθά στον προσδιορισμό του φορτίου που λειτουργεί στις περιόδους που παρατηρείται αύξηση της κατανάλωσης στο διάγραμμα. Παρακάτω, παρατίθεται τμήμα του διαγράμματος που δημιουργήθηκε [Διάγραμμα 3.1].



Διάγραμμα 3.1 Τμήμα διαγράμματος συνολικής κατανάλωσης (kWh) - χρόνου (minute)

1. Επισημαίνεται ότι αν και στο διάγραμμα που δημιουργήθηκε [Διάγραμμα 3.1] έχουν σημειωθεί οι χρόνοι έναρξης/λήξης λειτουργίας των φορτίων που αναγράφονται στο logbook, η διαδικασία του load disaggregation πραγματοποιείται για τις περιόδους που παρατηρούνται πραγματικές αυξήσεις της κατανάλωσης, καθώς όπως είναι λογικό για τη λειτουργία κάποιων φορτίων, σε κάποιες ημέρες, ο καταναλωτής ενδέχεται να έχει σημειώσει προσεγγιστικά την περίοδο λειτουργίας τους. Οι ανακρίβειες σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ασήμαντες με αναντιστοιχία λίγων λεπτών μεταξύ της περιόδου λειτουργίας που καταγράφεται στο logbook και της μεταβολής κατανάλωσης που παρατηρείται στο διάγραμμα, όμως σε άλλες περιπτώσεις η αναντιστοιχία είναι μεγάλη.
2. Ακόμη, σημειώνεται ότι η διαδικασία του load disaggregation είναι μία περίπλοκη διαδικασία στο χώρο ανάλυσης δεδομένων, το οποίο στη δική μας περίπτωση έχει γίνει «χειροκίνητα», άρα και προσεγγιστικά, εμπεριέχοντας ανακρίβειες που δεν μπορούμε να αποφύγουμε επειδή:
 - Το logbook δεν είναι απόλυτα ακριβές.
 - Κατά το διαχωρισμό της κατανάλωσης ενός φορτίου σε χρονικές περιόδους όπου η λειτουργία του επικαλύπτεται με τη λειτουργία άλλων φορτίων που ανήκουν στην ίδια φάση, δεν είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε επακριβώς την κατανάλωσή του, ιδιαίτερα όταν τα επικαλυπτόμενα φορτία δε διαθέτουν χαρακτηριστικά προφίλ κατανάλωσης.

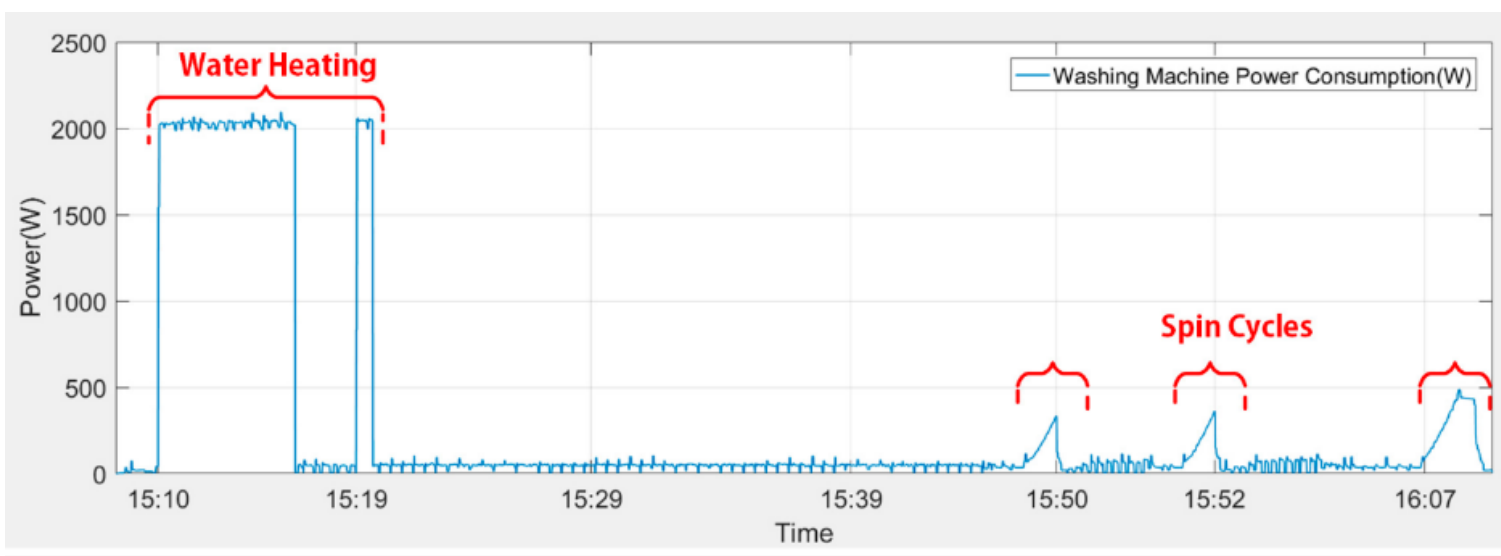
Ο επόμενος πίνακας [Πίνακας 3.4] παραθέτει όλα τα λειτουργούντα φορτία, διαχωρισμένα σε ενεργοβόρα και μη-ενεργοβόρα.

Μη-Ενεργοβόρα φορτία	Ενεργοβόρα φορτία
Βραστήρας***	A/C*
Τοστιέρα	Πλυντήριο πιάτων
TV	Πλυντήριο ρούχων**
Μηχανή espresso	Φούρνος***
Laptop	
Ηχοσύστημα	
Ισιωτική μαλλιών	
Μίξερ***	
Μάτι κουζίνας***	
Πιστολάκι μαλλιών	
Ηλεκτρική σκούπα	
Πολυμάγειρας (cooker)***	

Πίνακας 3. 4 Πίνακας φορτίων καταναλωτή διαχωρισμένα σε ενεργοβόρα και μη-ενεργοβόρα

*Σημειώνεται πως αν και το A/C είναι από τα πιο ενεργοβόρα φορτία του καταναλωτή, το ζητούμενο της λειτουργίας του είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας του χώρου εντός ενός συγκεκριμένου θερμοκρασιακού εύρους για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε να μην πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός της κατανάλωσής του, καθώς η υπόδειξη του μοντέλου για τη λειτουργία του σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας με σκοπό το βέλτιστο οικονομικό αποτέλεσμα δεν έχει νόημα εάν δεν επιτυγχάνει το σκοπό για τον οποίο λειτουργεί, δηλαδή τη θερμική άνεση του καταναλωτή στις επιθυμητές περιόδους.

** Τα αποτελέσματα του load disaggregation του πλυντηρίου ρούχων είναι αρκετά ανακριβή καθώς σε πολλές περιπτώσεις οι ώρες έναρξης ή τερματισμού της λειτουργίας του που αναγράφονται στο logbook δε συνάδουν με τις μεταβολές κατανάλωσης των δεδομένων ή δεν αναγράφονται καθόλου. Επιπλέον, η λειτουργία του επικαλύπτεται πολύ συχνά με τις λειτουργίες άλλων φορτίων της ίδιας φάσης, καθιστώντας αδύνατο το προσδιορισμό των κύκλων πλυσίματος και στεγνώματος [Διάγραμμα 3.2], λόγω της μικρής κατανάλωσης που εμφανίζεται κατά τη διάρκειά τους και οι οποίοι προσδίδουν περίπου το 10-20% της καταναλισκόμενης ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο, σε ορισμένες περιπτώσεις, η κατανάλωση που διαχωρίζεται είναι μικρότερη από τυπικές τιμές ακόμη και αντίστοιχων συσκευών της υψηλότερης ενεργειακής κλάσης και για λειτουργίες στους οικονομικότερους κύκλους (λίγος χρόνος, χαμηλή θερμοκρασία νερού). Ως αποτέλεσμα, η εξοικονόμηση που προκύπτει σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι ενδεικτική των πραγματικών αποτελεσμάτων που μπορούν να αποφερθούν κατά την εφαρμογή του μοντέλου.



Διάγραμμα 3. 2 Προφίλ κατανάλωσης τυπικού πλυντηρίου ρούχων (κύκλος με θερμοκρασία νερού 30 °C)

*** Ο φούρνος λειτουργεί μόνο για τις 4 από τις 10 ημέρες των διαθέσιμων δεδομένων. Για τις υπόλοιπες ημέρες, η διαδικασία του μαγειρέματος έχει πραγματοποιηθεί μέσω της λειτουργίας των ματιών κουζίνας, του βραστήρα του πολυμάγειρα και του μίξερ. Για αυτές τις περιπτώσεις, αλλά και για εκείνες όπου ο φούρνος λειτουργεί συνδυαστικά με κάποια από αυτά τα φορτία, διαχωρίζεται και η δική τους κατανάλωση. Γενικότερα λοιπόν μελετούνται όλα τα φορτία που συμμετέχουν στη διαδικασία του μαγειρέματος.

Οι παρακάτω πίνακες [Πίνακας 3.5–3.6] περιέχουν τις περιπτώσεις λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για το διαχωρισμό της κατανάλωσής τους κατά τη διαδικασία του load disaggregation. Ο Πίνακας 3.5 αφορά τα φορτία που λειτουργούν κατά τη διαδικασία του μαγειρέματος (φούρνος κ.τ.λ.) και ο Πίνακας 3.6 το πλυντήριο πιάτων και το πλυντήριο ρούχων. Η διαφορά στη διαδικασία προκύπτει από το γεγονός ότι η λειτουργία των πλυντηρίων εμφανίζεται με σύντομες αιχμές (spikes) κατανάλωσης.

Φούρνος, μάτια κουζίνας, πολυμάγειρας, βραστήρας, μίξερ		
Περίπτωση	Λειτουργία	Μέθοδος διαχωρισμού (εύρεση συνολικής κατανάλωσης χωρίς την κατανάλωση των συγκεκριμένων φορτίων)
1 ^η	Δεν επικαλύπτεται με τη λειτουργία κανενός άλλου φορτίου	Θέτουμε την κατανάλωση της αντίστοιχης φάσης κατά την περίοδο λειτουργίας του φορτίου ίση με την τιμή που είχε πριν την έναρξη λειτουργίας του.
2 ^η	Επικαλύπτεται με τη λειτουργία φορτίων διαφορετικής φάσης	Ίδια αντιμετώπιση με 1 ^η περίπτωση
3 ^η	Επικαλύπτεται με τη λειτουργία φορτίων ίδιας φάσης η οποία έχει	<u>Κατά τις περιόδους που δεν εμφανίζονται αιχμές</u> Ίδια αντιμετώπιση με 1 ^η περίπτωση

	μορφή αιχμών κατανάλωσης (spikes) π.χ. πλυντήριο ρούχων	<p><u>Κατά τις περιόδους που εμφανίζονται αιχμές</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Βήμα 1 Εύρεση της κατανάλωσης φούρνου κ.τ.λ. μέσω της διαφοράς τιμής συνολικής κατανάλωσης και τιμής που τέθηκε στις περιόδους εκτός αιχμών (εύρεση της κατανάλωσης φούρνου κ.τ.λ.) • Βήμα 2 Αφαίρεση του αποτελέσματος του βήματος 1 από τη συνολική κατανάλωση στις περιόδους εμφάνισης των αιχμών (διατήρηση των αιχμών κατανάλωσης)
4 ^η	Επικαλύπτεται με τη λειτουργία φορτίων ίδιας φάσης η οποία δεν έχει μορφή αιχμών κατανάλωσης	<p>Ίδια αντιμετώπιση με 3^η περίπτωση</p> <p>(Αντί για τις αιχμές κατανάλωσης, η διαδικασία εφαρμόζεται κατά την περίοδο λειτουργίας του μη ευέλικτου φορτίου την οποία εντοπίζουμε προσεγγιστικά με τη βοήθεια του διαγράμματος, του logbook και του προσδιορισμού της μορφής του προφίλ κατανάλωσής του από άλλες χρονικές περιόδους που λειτουργεί μόνο του)</p> <p>(διατήρηση της κατανάλωσης του μη ευέλικτου φορτίου)</p>

Πίνακας 3. 5 Διαδικασία load disaggregation κατά τη διαδικασία του μαγειρέματος

Πλυντήριο πιάτων και πλυντήριο ρούχων		
Περίπτωση	Λειτουργία	Μέθοδος διαχωρισμού (Εύρεση συνολικής κατανάλωσης χωρίς την κατανάλωση των πλυντηρίων)
1 ^η	Δεν επικαλύπτεται με τη λειτουργία κανενός άλλου φορτίου	<p>Θέτουμε την κατανάλωση της αντίστοιχης φάσης κατά την περίοδο λειτουργίας (στις αιχμές) ίση με την τιμή που έχει εκτός των αιχμών</p> <p>(αφαίρεση των αιχμών από τη συνολική κατανάλωση)</p>
2 ^η	Επικαλύπτεται με τη λειτουργία φορτίων διαφορετικής φάσης	Ίδια αντιμετώπιση με 1 ^η περίπτωση

3 ^η	Επικαλύπτεται με τη λειτουργία φορτίων ίδιας φάσης η οποία έχει μορφή αιχμών (π.χ. επικάλυψη πλυντηρίου ρούχων με πλυντήριο πιάτων)	<ul style="list-style-type: none"> • Βήμα 1 Εντοπισμός και προσδιορισμός των αιχμών κάθε φορτίου μέσω της παρατήρησης της λειτουργίας τους σε άλλες περιόδους όπου δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους ή με άλλα φορτία • Βήμα 2 Ίδια αντιμετώπιση με 1^η περίπτωση
4 ^η	Επικαλύπτεται με τη λειτουργία φορτίων ίδιας φάσης η οποία δεν έχει μορφή αιχμών	Ίδια αντιμετώπιση με 1 ^η περίπτωση

Πίνακας 3. 6 Διαδικασία load disaggregation για πλυντήριο πιάτων και πλυντήριο ρούχων

Μέσω των διαδικασιών που περιγράφουν οι παραπάνω πίνακες διαθέτουμε πλέον την ανελαστική κατανάλωση των μη ευέλικτων φορτίων υπό τη μορφή του Πίνακα 3.1. Με απλή αφαίρεση από τα αρχικά δεδομένα βρίσκουμε τις καταναλώσεις και τις περιόδους λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων (αναγράφονται στο Κεφάλαιο 4 δίπλα από τις αντίστοιχες ημέρες μελέτης).

2^ο Βήμα : Επεξεργασία Δεδομένων ΑΠΕ, υδροηλεκτρικής παραγωγής και φορτίου συστήματος

Όπως αναφέρθηκε, η χρησιμότητα των συγκεκριμένων δεδομένων έγκειται στην κατασκευή μιας υβριδικής ταρίφας η οποία θα προσφέρει τη χρονικά μεταβαλλόμενη τιμολόγηση που χρειαζόμαστε για τη διαφοροποίηση του κόστους ανάλογα με τις διάφορες κατανομές λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων.

Η υβριδική ταρίφα έχει μορφή ToU τιμολόγησης και αποτελείται από 4 μπλοκ των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από το ποσοστό κάλυψης του φορτίου του συστήματος από ΑΠΕ και υδροηλεκτρική παραγωγή. Η διαδικασία κατασκευής της ταρίφας είναι η εξής:

- Για κάθε ώρα της ημέρας υπολογίζουμε το ποσοστό κάλυψης του φορτίου του συστήματος από ΑΠΕ και υδροηλεκτρική παραγωγή με τα δεδομένα των αρχείων αποτελεσμάτων των 1^{ων} ενοποιημένων προγραμματισμών (ISP 1) του ΑΔΜΗΕ μέσω του τύπου (3.1)

$$\text{Ποσοστό κάλυψης [\%]} = \frac{RES+Hydro}{Load} * 100 \quad (3.1)$$

RES : Παραγωγή ΑΠΕ [kWh]

Hydro : Υδροηλεκτρική Παραγωγή [kWh]

Load : Φορτίο συστήματος [kWh]

- Από την εφαρμογή *IPTO analytics* του ΑΔΜΗΕ ανακτούμε την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας (day-ahead market) για κάθε ημέρα μελέτης και μέσω του τύπου (3.2) υπολογίζουμε το μέγεθος *base*

$$MCP \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] = 1.4 * base * \frac{2}{24} + 1.2 * base * \frac{4}{24} + base * \frac{12}{24} + 0.6 * base * \frac{6}{24} \quad (3.2)$$

MCP : Τιμή εκκαθάρισης της αγοράς επόμενης ημέρας (μέση τιμή χρονοσειράς 24 τιμών) [€/kWh]

- Δημιουργούμε τα 4 μπλοκ της υβριδικής ταρίφας σύμφωνα με τη μεθοδολογία του παρακάτω πίνακα [Πίνακας 3.7]. Οι ώρες της ημέρας που ανήκουν σε κάθε μπλοκ δεν είναι απαραίτητο να είναι συνεχόμενες κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αυξανόμενο ποσοστό κάλυψης φορτίου συστήματος από ΑΠΕ και υδροηλεκτρική παραγωγή							
→							
Μείωση τιμής							
→							
Μπλοκ 1		Μπλοκ 2		Μπλοκ 3		Μπλοκ 4	
Πλήθος ωρών	Τιμή [€/kWh]	Πλήθος ωρών	Τιμή [€/kWh]	Πλήθος ωρών	Τιμή [€/kWh]	Πλήθος ωρών	Τιμή [€/kWh]
2	1.4 * base	4	1.2 * base	12	base	6	0.6 * base

Πίνακας 3. 7 Χαρακτηριστικά υβριδικής ToU ταρίφας

Οι Πίνακες 3.8-3.9 παραθέτουν τα αποτελέσματα κατασκευής της υβριδικής ταρίφας για το δεκαήμερο μελέτης σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται.

3-Σεπ			4-Σεπ			5-Σεπ			6-Σεπ			7-Σεπ		
MCP														
409.83 €/MWh			435.42 €/MWh			453.25 €/MWh			502.46 €/MWh			410.25 €/MWh		
Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]
14	55.51	254.38	14	64.64	270.26	15	80.46	281.33	14	86.34	311.87	14	88.77	254.64
13	54.96	254.38	13	63.76	270.26	14	79.53	281.33	13	86.22	311.87	13	88.37	254.64
12	53.97	254.38	15	62.68	270.26	16	77.45	281.33	12	85.87	311.87	12	87.81	254.64
15	53.74	254.38	12	62.26	270.26	13	76.41	281.33	15	84.57	311.87	15	86.81	254.64
11	50.78	254.38	11	59.07	270.26	12	73.50	281.33	11	83.41	311.87	11	85.54	254.64
16	48.28	254.38	16	55.75	270.26	17	70.33	281.33	10	79.88	311.87	16	81.48	254.64
10	46.58	423.96	10	54.23	450.43	11	68.96	468.88	16	79.03	519.79	10	81.02	424.40
9	39.29	423.96	9	45.78	450.43	10	64.29	468.88	9	72.68	519.79	9	72.58	424.40
17	38.76	423.96	17	45.34	450.43	18	62.04	468.88	17	68.66	519.79	17	70.90	424.40
20	29.52	423.96	18	34.89	450.43	22	60.64	468.88	2	65.62	519.79	8	64.49	424.40
18	28.73	423.96	8	32.53	450.43	21	59.83	468.88	8	64.58	519.79	7	59.41	424.40
8	28.28	423.96	19	32.48	450.43	23	59.82	468.88	1	64.54	519.79	18	59.04	424.40
21	26.80	423.96	21	30.30	450.43	19	58.74	468.88	4	64.34	519.79	5	58.07	424.40
19	26.65	423.96	20	29.93	450.43	20	57.27	468.88	3	64.17	519.79	4	57.13	424.40
22	23.66	423.96	22	27.52	450.43	9	57.17	468.88	5	63.52	519.79	6	55.69	424.40
23	20.60	423.96	23	25.09	450.43	8	50.22	468.88	7	60.78	519.79	3	55.62	424.40
7	20.24	423.96	7	21.20	450.43	7	45.25	468.88	6	60.46	519.79	2	55.53	424.40
0	15.52	423.96	6	14.98	450.43	6	40.07	468.88	18	58.36	519.79	1	53.78	424.40
1	14.35	508.75	1	14.76	540.52	5	37.98	562.66	0	57.17	623.75	19	53.10	509.28
6	13.71	508.75	0	14.70	540.52	4	33.84	562.66	22	54.75	623.75	21	50.71	509.28
2	13.64	508.75	4	12.65	540.52	3	29.13	562.66	19	54.22	623.75	22	50.51	509.28
5	13.46	508.75	5	12.63	540.52	2	27.98	562.66	21	54.21	623.75	0	50.27	509.28
4	12.59	593.54	2	12.59	630.60	1	25.44	656.43	23	52.98	727.71	20	49.60	594.16
3	12.18	593.54	3	11.20	630.60	0	21.81	656.43	20	51.44	727.71	23	49.10	594.16

Πίνακας 3. 8 Αποτελέσματα κατασκευής υβριδικής ΤοU ταρίφας (3/9/2022 - 7/9/2022)

8-Σεπ			9-Σεπ			10-Σεπ			11-Σεπ			12-Σεπ		
MCP														
414.29 €/MWh			439.75 €/MWh			424.29 €/MWh			415.71 €/MWh			467.58 €/MWh		
Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]	Ωρα	%	τιμή [€/MWh]
13	77.47	257.15	13	57.99	272.95	14	65.10	263.35	14	66.20	258.02	13	69.92	290.22
12	77.33	257.15	14	57.41	272.95	13	63.90	263.35	13	64.71	258.02	12	69.48	290.22
14	76.77	257.15	12	57.10	272.95	15	63.01	263.35	15	64.49	258.02	14	69.39	290.22
11	75.47	257.15	15	55.02	272.95	12	60.92	263.35	12	63.00	258.02	15	67.45	290.22
15	73.07	257.15	11	53.65	272.95	16	57.08	263.35	11	59.74	258.02	11	66.73	290.22
10	71.59	257.15	10	49.69	272.95	11	55.99	263.35	16	57.34	258.02	10	61.97	290.22
16	65.12	428.58	16	49.29	454.91	10	49.25	438.92	10	56.34	430.04	16	61.14	483.70
9	63.27	428.58	9	40.33	454.91	17	45.77	438.92	9	45.69	430.04	9	52.92	483.70
8	54.18	428.58	17	38.32	454.91	9	39.85	438.92	17	43.99	430.04	17	48.86	483.70
17	51.26	428.58	18	28.58	454.91	21	34.79	438.92	21	36.14	430.04	8	43.35	483.70
2	48.98	428.58	8	28.50	454.91	20	33.85	438.92	20	33.34	430.04	18	38.26	483.70
1	48.15	428.58	21	27.95	454.91	18	33.53	438.92	22	33.24	430.04	7	37.33	483.70
4	47.78	428.58	20	26.59	454.91	19	33.47	438.92	8	32.81	430.04	20	37.25	483.70
5	47.44	428.58	22	25.86	454.91	22	32.25	438.92	18	31.32	430.04	21	35.25	483.70
3	47.24	428.58	19	25.24	454.91	23	30.42	438.92	19	26.79	430.04	19	35.16	483.70
7	47.18	428.58	23	21.69	454.91	8	28.57	438.92	23	26.49	430.04	22	34.83	483.70
0	45.27	428.58	7	19.93	454.91	7	19.46	438.92	7	24.81	430.04	6	31.71	483.70
6	44.82	428.58	0	15.78	454.91	1	17.80	438.92	0	21.67	430.04	5	30.38	483.70
18	37.49	514.30	1	15.61	545.89	0	17.69	526.70	6	19.99	516.05	4	26.58	580.44
19	33.04	514.30	6	14.62	545.89	3	16.22	526.70	5	19.29	516.05	23	26.09	580.44
20	30.36	514.30	5	13.88	545.89	6	16.06	526.70	1	19.18	516.05	0	24.31	580.44
21	29.28	514.30	4	13.79	545.89	2	15.99	526.70	2	19.05	516.05	3	24.00	580.44
22	26.13	600.01	3	13.71	636.87	4	15.94	614.49	4	18.61	602.06	2	23.50	677.18
23	22.31	600.01	2	13.59	636.87	5	15.71	614.49	3	18.28	602.06	1	23.42	677.18

Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα κατασκευής υβριδικής ToU ταρίφας (8/9/2022 - 12/9/2022)

3^ο Βήμα : Κατασκευή μαθηματικού μοντέλου

Παρακάτω παρατίθεται η μαθηματική μοντελοποίηση της ντετερμινιστικής εκδοχής του μοντέλου. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους μέσα από τη μεταφορά (load shifting) των καταναλώσεων των ευέλικτων φορτίων, που εξήχθησαν μέσω της διαδικασίας του load disaggregation, από τις ώρες που λειτουργούν στα δεδομένα σε αυτές που υποδεικνύει το μοντέλο και αποδίδουν τη μέγιστη εξοικονόμηση χρημάτων όταν ο καταναλωτής τιμολογείται με την υβριδική ταρίφα.

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T \mathbf{ToU}_t * \mathbf{e}_t$$

\mathbf{ToU}_t : τιμή υβριδικής ταρίφας κατά την ώρα t [€/kWh]

\mathbf{e}_t : συνολική κατανάλωση κατά την ώρα t [kWh]

$T = 24$ (ωριαία ανάλυση της ημέρας)

$t \in \mathbb{N}$

$$\mathbf{e}_t = \sum_k^K \sum_{ro}^{Ro(k)} \mathbf{Qcook}_{k,ro} * \mathbf{x}_{k,ro,t} + \sum_m^M \sum_{rw}^{Rw(m)} \mathbf{Qwashing.machine}_{m,rw} * \mathbf{y}_{m,rw,t} + \sum_n^N \sum_{rd}^{Rd(n)} \mathbf{Qdishwasher}_{n,rd} * \mathbf{z}_{n,rd,t} + \mathbf{inflexible}_t$$

$k, m, n \in \mathbb{N}$

\mathbf{K} : φορές που ο καταναλωτής μαγείρεψε μέσα στην ημέρα

(μπορεί να αφορά τη λειτουργία οποιωνδήποτε εκ των φούρνου, ματιών κουζίνας, πολυμάγειρα, βραστήρα)

\mathbf{M} : πλήθος λειτουργιών πλυντηρίου ρούχων μέσα στην ημέρα

\mathbf{N} : πλήθος λειτουργιών πλυντηρίου πιάτων μέσα στην ημέρα

(για να συμπεριληφθούν οι περιπτώσεις που τα φορτία λειτουργούν πάνω από 1 φορά την ημέρα)

$ro, rw, rd \in \mathbb{N}$

$\mathbf{Ro}(k)$: πλήθος ωρών λειτουργίας φούρνου κ.τ.λ. κατά την k-οστή λειτουργία μέσα στην ημέρα

$\mathbf{Rw}(m)$: πλήθος ωρών λειτουργίας πλ. ρούχων κατά την m-οστή λειτουργία μέσα στην ημέρα

$\mathbf{Rd}(n)$: πλήθος ωρών λειτουργίας πλ. πιάτων κατά την n-οστή λειτουργία μέσα στην ημέρα

(για να συμπεριληφθούν οι περιπτώσεις που κάποια λειτουργία των φορτίων διαρκεί πάνω από 1 ώρα)

$\mathbf{Qcook}_{k,ro}$: κατανάλωση [kWh] κατά την ro-οστή ώρα λειτουργίας της k-οστής λειτουργίας του φούρνου κ.τ.λ. μέσα στην ημέρα

$\mathbf{Qwashing.machine}_{m,rw}$: κατανάλωση [kWh] κατά την rw-οστή ώρα λειτουργίας της m-οστής λειτουργίας του πλυντηρίου ρούχων μέσα στην ημέρα

$Qdishwasher_{n,rd}$: κατανάλωση [kWh] κατά την rd-οστή ώρα λειτουργίας της n-οστής λειτουργίας του πλυντηρίου πιάτων μέσα στην ημέρα

$inflexible_t$: ανελαστική κατανάλωση [kWh] κατά την ώρα t της ημέρας

Μεταβλητές απόφασης

$$x_{k,ro,t} \in \{0,1\}$$

= 1 αν η κατανάλωση της ro-οστής ώρας της k-οστής λειτουργίας του φούρνου κ.τ.λ. (**$Qcook_{k,ro}$**) πραγματοποιείται την ώρα t

= 0 αν δεν πραγματοποιείται την ώρα t

$$y_{m,rw,t} \in \{0,1\}$$

= 1 αν η κατανάλωση της rw-οστής ώρας της m-οστής λειτουργίας του πλυντηρίου ρούχων (**$Qwashing.machine_{m,rw}$**) πραγματοποιείται την ώρα t

= 0 αν δεν πραγματοποιείται την ώρα t

$$z_{n,rd,t} \in \{0,1\}$$

= 1 αν η κατανάλωση της rd-οστής ώρας της n-οστής λειτουργίας του πλυντηρίου πιάτων (**$Qdishwasher_{n,rd}$**) πραγματοποιείται την ώρα t

= 0 αν δεν πραγματοποιείται την ώρα t

π.χ. Αν ο καταναλωτής μαγειρεύει 2 φορές μέσα στην ημέρα, για 3 ώρες και 1 ώρα αντίστοιχα, το πλυντήριο ρούχων λειτουργεί 1 φορά για 1 ώρα και το πλυντήριο πιάτων δε λειτουργεί καθόλου έχουμε:

$$K = 2 \quad \rightarrow \quad Ro(1) = 3 \quad \rightarrow \quad x_{1,1,t} \quad , \quad x_{1,2,t} \quad , \quad x_{1,3,t}$$

$$Ro(2) = 1 \quad \rightarrow \quad x_{2,1,t}$$

$$M = 1 \quad \rightarrow \quad Rw(1) = 1 \quad \rightarrow \quad y_{1,1,t}$$

$$N = 0$$

και δημιουργούνται $24 \times 5 = 120$ μεταβλητές απόφασης (24 για κάθε ώρα, κάθε λειτουργίας, κάθε φορτίου)

<u>ΦΟΥΡΝΟΣ κ.τ.λ</u>				<u>ΠΑ.ΡΟΥΧΩΝ</u>
1^{η} ώρα $1^{\eta\varsigma}$ λειτ.	2^{η} ώρα $1^{\eta\varsigma}$ λειτ.	3^{η} ώρα $1^{\eta\varsigma}$ λειτ.	1^{η} ώρα $2^{\eta\varsigma}$ λειτ.	1^{η} ώρα $1^{\eta\varsigma}$ λειτ.
$x_{1,1,1}$	$x_{1,2,1}$	$x_{1,3,1}$	$x_{2,1,1}$	$y_{1,1,1}$
$x_{1,1,2}$	$x_{1,2,2}$	$x_{1,3,2}$	$x_{2,1,2}$	$y_{1,1,2}$
.
.
.
$x_{1,1,24}$	$x_{1,2,24}$	$x_{1,3,24}$	$x_{2,1,24}$	$y_{1,1,24}$

Περιορισμοί

$$\sum_{t=1}^T x_{k,ro,t} = 1 \quad \forall (k, ro) \quad (1)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{m,rw,t} = 1 \quad \forall (m, rw) \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T z_{n,rd,t} = 1 \quad \forall (n, rd) \quad (3)$$

Η κατανάλωση κάθε ώρας λειτουργίας, κάθε λειτουργίας μέσα στην ημέρα, πραγματοποιείται μόνο μία φορά

$$x_{k,ro,t} = 0 \quad \forall k, \quad (4)$$
$$ro = 1,$$
$$\forall t \text{ όπου } At > 1$$

Όπου $At = |t - t \text{ cook}(k)|$, $t \text{ cook}(k)$ είναι η l^n ώρα λειτουργίας κατά την k -οστή λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. στα δεδομένα

π.χ. Αν ο καταναλωτής ξεκίνησε να μαγειρεύει για 2^η φορά μέσα στην ημέρα στις 21:00 $\rightarrow t \text{ cook}(2) = 21$

Σύμφωνα με τον παραπάνω περιορισμό για κάθε $t \neq 20, 21, 22 \rightarrow x_{2,1,t} = 0$

ΑΡΑ ο περιορισμός (4) δεν αφήνει τα φορτία μαγειρέματος να εκκινήσουν τη λειτουργία τους σε ώρες που απέχουν παραπάνω από 1 ώρα σε σχέση με την ώρα λειτουργίας στα δεδομένα. Σε συνδυασμό με τον περιορισμό (7) περιλαμβάνονται και οι περιπτώσεις όπου η λειτουργία διαρκεί παραπάνω από 1 ώρα. Τελικά, τα φορτία του μαγειρέματος δεν μπορούν να υποστούν load shifting πάνω από 1 ώρα.

$$y_{m,rw,t} = 0 \quad \forall m, \quad (5)$$
$$rw = 1,$$
$$\forall t \text{ όπου } Bt > 6$$

Όπου $Bt = |t - t \text{ wash}(m)|$, $t \text{ wash}(m)$ είναι η l^n ώρα λειτουργίας κατά την m -οστή λειτουργία του πλυντηρίου ρούχων στα δεδομένα

$$z_{n,rd,t} = 0 \quad \forall n, \quad (6)$$
$$rd = 1,$$
$$\forall t \text{ όπου } Ct > 6$$

Όπου $Ct = |t - t \text{ dish}(n)|$, $t \text{ dish}(n)$ είναι η l^n ώρα λειτουργίας κατά την n -οστή λειτουργία του πλυντηρίου πιάτων στα δεδομένα

ΑΡΑ οι περιορισμοί 5,6 δεν αφήνουν τα πλυντήρια να υποστούν load shifting πάνω από 6 ώρες

$$x_{k,ro,t} = x_{k,ro+1,t+1} , \forall (k, ro, t), ro \in [1, Ro(k) - 1], t \in [1, T - 1] \quad (7)$$

ΑΡΑ όταν η κ-οστή λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. διαρκεί για πάνω από 1 ώρα , ο περιορισμός (7) επιβάλλει στις μεταβλητές απόφασης που αφορούν τις διαδοχικές ώρες της κ-οστής λειτουργίας να ισούνται με 1 σε συνεχόμενες ώρες της ημέρας

π.χ. Έστω ότι η 1^η φορά που μαγειρεύει ο καταναλωτής διήρκησε 2 ώρες

$$\rightarrow x_{1,1,1} , \dots , x_{1,1,24} \text{ (24 μεταβλητές απόφασης για την 1^η ώρα λειτουργίας)}$$

$$x_{1,2,1} , \dots , x_{1,2,24} \text{ (24 μεταβλητές απόφασης για την 2^η ώρα λειτουργίας)}$$

$$\text{(48 μεταβλητές απόφασης)}$$

Από τον περιορισμό (1) \rightarrow 2 από τις 48 μεταβλητές ισούνται με 1

(1 από την 24άδα μεταβλητών $x_{1,1,t}$ και 1 από την 24άδα μεταβλητών $x_{1,2,t}$)

Από τον περιορισμό (7), αυτές οι δύο μεταβλητές πρέπει να αντιστοιχούν σε συνεχόμενες ώρες της ημέρας,, με τη μεταβλητή που αφορά την πρώτη ώρα λειτουργίας (από την 24άδα $x_{1,1,t}$) να προηγείται χρονικά της άλλης.

$$y_{m,rw,t} = y_{m,rw+1,t+1} , \forall (m, rw, t), rw \in [1, Rw(m) - 1] , t \in [1, T - 1] \quad (8)$$

$$z_{n,rd,t} = z_{n,rd+1,t+1} , \forall (n, rd, t) , rd \in [1, Rd(n) - 1] , t \in [1, T - 1] \quad (9)$$

$$x_{k,ro,t} + x_{k',ro',t} \leq 1 , \quad \forall (ro, ro', t), k \neq k' \quad (10)$$

$$k' \in \{1, \dots, K\} , ro' \in \{1, \dots, Ro(k')\}$$

$$y_{m,rw,t} + y_{m',rw',t} \leq 1 , \quad \forall (rw, rw', t), m \neq m' \quad (11)$$

$$m' \in \{1, \dots, M\} , rw' \in \{1, \dots, Rw(k')\}$$

$$z_{n,rd,t} + z_{n',rd',t} \leq 1 , \quad \forall (rd, rd', t), n \neq n' \quad (12)$$

$$n' \in \{1, \dots, N\} , rd' \in \{1, \dots, Rd(k')\}$$

ΑΡΑ οι περιορισμοί 10/ 11/ 12 δεν επιτρέπουν σε διαφορετικές λειτουργίες του φούρνου κ.τ.λ./ πλ. ρούχων/ πλ. πιάτων της ημέρας να επικαλυφθούν.

$$\exists t \neq t' : A_t < A_{t'} \text{ και } \sum_{ro=1}^{Ro(k)} Q_{cook} k_{ro} * ToU_{t+ro-1} \leq \sum_{ro=1}^{Ro(k)} Q_{cook} k_{ro} * ToU_{t'+ro-1}$$

τότε

$$\sum_{ro=1}^{Ro(k)} x_{k,ro,t'+ro-1} < Ro(k) \quad (13)$$

$$\forall (k, t')$$

$$\exists t \neq t' : B_t < B_{t'} \text{ και } \sum_{rw=1}^{Rw(m)} Q_{washing.machine} m_{rw} * ToU_{t+rw-1} \leq \sum_{rw=1}^{Rw(m)} Q_{washing.machine} m_{rw} * ToU_{t'+rw-1} , t, t' \in [t wash(m)-6, t wash(m)+6]$$

τότε

$$\sum_{rw=1}^{Rw(m)} y_{m,rw,t'+rw-1} < Rw(m) \quad (14)$$

$$\forall (m, t')$$

$$\forall t \neq t' : C_t < C_{t'} \quad \text{και} \quad \sum_{rd=1}^{Rd(n)} Qdishwasher_{n,rd} * ToU_{t+rd-1} \leq \sum_{rd=1}^{Rd(n)} Qdishwasher_{n,rd} * ToU_{t'+rd-1}, \quad t, t' \in [t \text{ dish}(n)-6, t \text{ dish}(n)+6]$$

τότε

$$\sum_{rw=1}^{Rw(m)} z_{n,rd,t'+rd-1} < Rd(n) \quad (15)$$

$$\forall (n, t, t')$$

Περιορισμός (13) \rightarrow Αν υπάρχει τουλάχιστον ένα t διαφορετικό του t' να ανήκει μέσα στα όρια που ορίζει ο περιορισμός (4) για το οποίο ισχύει: $A_{t'} > A_t$ (πιο κοντά χρονικά στην ώρα έναρξης λειτουργίας των δεδομένων από το t') και $\sum_{ro=1}^{Ro(k)} Qcook_{k,ro} * ToU_{t+ro-1} \leq \sum_{ro=1}^{Ro(k)} Qcook_{k,ro} * ToU_{t'+ro-1}$ (λιγότερο ή ίσο κόστος με έναρξη της λειτουργίας την ώρα t σε σχέση με την ώρα t')

$$\text{Τότε} \quad \sum_{ro=1}^{Ro(k)} x_{k,ro,t'+ro-1} < Ro(k)$$

ΑΡΑ οι περιορισμοί 13/ 14/ 15 περιορίζουν χρονικά το load shifting του φούρνου κ.τ.λ./πλ.ρούχων/πλ.πιάτων ή το αποτρέπουν αν ήδη λειτουργεί στην/ις οικονομικότερη/ες δυνατή/ες ώρα/ες.

$$e_t \leq 10, \quad \forall t \quad (16)$$

Κατανάλωση μικρότερη από 10 kWh για κάθε ώρα της ημέρας

Σημείωση :

- Το ντετερμινιστικό μοντέλο δε λαμβάνει υπόψιν κάποια προτίμηση σχετικά με το αν η μεταφορά του φορτίου θα γίνει προς επόμενες ή προηγούμενες ώρες από την ώρα λειτουργίας που αναγράφεται στα δεδομένα. Αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις στην ύπαρξη πολλαπλών βέλτιστων λύσεων. Για παράδειγμα, αν για το πλυντήριο πιάτων διαθέτουμε την περίπτωση του επόμενου πίνακα, τότε από τον περιορισμό (6) (δυνατότητα load shifting έως και 6 ώρες πριν ή μετά την ώρα λειτουργίας στα δεδομένα) είναι δυνατή η μεταφορά σε κάθε αναγραφόμενη ώρα. Η ελαχιστοποίηση του κόστους αποκλείει την επιλογή της ώρας 18:00-19:00 και ο περιορισμός (15) (χρονικός περιορισμός load shifting) αποκλείει την ώρα 14:00-15:00. Άρα για τη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν 2 βέλτιστες λύσεις, η μεταφορά του φορτίου στην ώρα 15:00-16:00 και στην ώρα 17:00-18:00. Συγκεκριμένα για τα δεδομένα τις εργασίας δε συνέβη κάτι ανάλογο και η βέλτιστη λύση ήταν κάθε φορά μοναδική.

Ωρα	14:00 – 15:00 (διαθέσιμη για load shifting)	15:00 – 16:00 (διαθέσιμη για load shifting)	16:00 – 17:00 (λειτουργία)	17:00 – 18:00 (διαθέσιμη για load shifting)	18:00 - 19:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	75	75	100	75	100

3.2 Στοχαστικό μοντέλο (ex-ante stochastic model)

3.2.1 Κατασκευή σεναρίων

Οι συνιστώσες του μοντέλου που αναπτύχθηκε μέσω των οποίων θα εισαχθεί η στοχαστικότητα είναι οι εξής:

1. Τιμή εκκαθάρισης της αγοράς
2. Ανελαστική κατανάλωση
3. Παραγωγή ΑΠΕ

Η στοχαστικότητα εισάγεται στο μοντέλο με τη μορφή σεναρίων, τα οποία προκύπτουν από τους διάφορους πιθανούς συνδυασμούς των τιμών που μπορούν να λάβουν τα συγκεκριμένα μεγέθη. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των σεναρίων για κάθε μέγεθος.

Τιμή εκκαθάρισης της αγοράς

Επιλέγουμε για μία τυχαία ημέρα τη χρονοσειρά τιμών εκκαθάρισης της αγοράς, την οποία προμηθευόμαστε από την εφαρμογή *IPTO analytics*. Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε 10 χρονοσειρές σφαλμάτων πρόβλεψης της τιμής που προμηθευτήκαμε για τις ανάγκες τις εργασίας. Για τις προβλέψεις με σφάλμα που ξεπερνάει το 30%, το οποίο συμβαίνει κυρίως τα μεσημέρια λόγω μεγάλης παραγωγής των Φ/Β, θέτουμε το αντίστοιχο ποσοστό ίσο με 30%. Έτσι, δημιουργούμε 10 χρονοσειρές (σενάρια) τιμών εκκαθάρισης, ο μέσος όρος κάθε μίας από τις οποίες εισάγεται ως το μέγεθος *MCP* στον τύπο (3.2). Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται 10 σενάρια διαφορετικών τιμών για κάθε μπλοκ της υβριδικής ταρίφας.

Σενάριο 1 → MCP = 402,78 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
583,33	500,00	416,67	250,00
Σενάριο 2 → MCP = 402,64 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
583,13	499,82	416,52	249,91
Σενάριο 3 → MCP = 337,20 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
488,36	418,60	348,83	209,30
Σενάριο 4 → MCP = 412,67 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
597,66	512,28	426,90	256,14
Σενάριο 5 → MCP = 367,51 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
532,25	456,22	380,18	228,11
Σενάριο 6 → MCP = 425,19 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
615,79	527,82	439,85	263,91
Σενάριο 7 → MCP = 391,34 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
566,77	485,81	404,84	242,90
Σενάριο 8 → MCP = 430,58 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
623,60	534,52	445,43	267,26
Σενάριο 9 → MCP = 418,55 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
606,17	519,57	432,98	259,79
Σενάριο 10 → MCP = 428,40 [€/MWh]			
Μπλοκ 1 [€/MWh]	Μπλοκ 2 [€/MWh]	Μπλοκ 3 [€/MWh]	Μπλοκ 4 [€/MWh]
620,45	531,81	443,18	265,91

Πίνακας 3.10 Πίνακας σεναρίων τιμών εκκαθάρισης αγοράς (*MCP*)

Ανελαστική κατανάλωση

Για τα σενάρια ανελαστικής κατανάλωσης χρησιμοποιούνται οι τιμές κατανάλωσης που προκύπτουν από τα διαθέσιμα δεδομένα έπειτα από τη διαδικασία του load disaggregation των ευέλικτων φορτίων. Δηλαδή, η χρονοσειρά ανελαστικής κατανάλωσης κάθε ημέρας θεωρείται ένα ξεχωριστό σενάριο ανελαστικής κατανάλωσης. Καθώς στα δεδομένα περιλαμβάνονται 10 ημέρες, προκύπτουν 10 σενάρια ανελαστικής κατανάλωσης

Ωρα	Σενάριο 1 [kWh]	Σενάριο 2 [kWh]	Σενάριο 3 [kWh]	Σενάριο 4 [kWh]	Σενάριο 5 [kWh]	Σενάριο 6 [kWh]	Σενάριο 7 [kWh]	Σενάριο 8 [kWh]	Σενάριο 9 [kWh]	Σενάριο 10 [kWh]
00:00	0.3880	0.1793	0.8022	0.2565	0.2932	0.3315	0.1876	0.3093	0.1784	0.3073
01:00	0.3211	0.2187	0.6635	0.2153	0.1786	0.1074	0.1922	0.1577	0.1743	0.1777
02:00	0.0918	0.2762	0.0995	0.0708	0.0891	0.0819	0.0692	0.0905	0.2165	0.0981
03:00	0.0874	0.1418	0.0886	0.0710	0.0712	0.0732	0.0685	0.0873	0.1723	0.0951
04:00	0.0874	0.0873	0.0919	0.0663	0.0736	0.0766	0.0646	0.0843	0.0918	0.0903
05:00	0.0878	0.0836	0.0880	0.0759	0.0766	0.0746	0.0629	0.0864	0.0885	0.0841
06:00	0.0872	0.0838	0.0767	0.0735	0.0743	0.0732	0.0787	0.0780	0.0863	0.0822
07:00	0.0861	0.0810	0.0790	0.0653	0.0859	0.0713	0.0739	0.0810	0.0901	0.0820
08:00	0.0866	0.0790	0.1778	0.2095	1.1710	0.1931	0.0855	0.0820	0.0882	0.2112
09:00	0.5206	0.0826	0.4469	0.3749	0.8600	0.5786	0.4982	0.0828	0.0869	0.3813
10:00	1.1209	0.2404	0.3328	0.3308	0.3564	0.3289	0.2469	0.6181	0.9445	0.1435
11:00	1.2391	0.2605	0.3638	0.3524	0.1234	0.2666	0.2486	0.4936	0.8776	0.0886
12:00	1.0972	0.2418	0.3420	0.1391	0.1817	0.1051	0.2613	0.2729	0.0844	0.1732
13:00	0.3015	0.1065	0.1648	0.0879	0.1469	0.0950	0.2726	0.2144	0.0824	0.1928
14:00	1.2348	0.1297	0.1212	0.1119	0.1879	0.0938	0.1828	0.2340	0.0827	0.2565
15:00	0.5354	0.1598	0.1405	0.2510	0.2639	0.1847	0.1521	0.2426	0.3746	0.0986
16:00	0.0753	0.1393	0.1140	0.3491	0.1485	0.2863	0.0952	0.3085	1.2354	0.0859
17:00	0.0754	0.2508	0.1392	0.4593	0.0750	0.4136	0.1407	0.3849	0.9947	0.0992
18:00	0.0759	1.2998	0.1357	0.4069	0.0740	0.3257	0.1609	0.1743	0.6979	0.1029
19:00	0.0748	1.2551	0.3500	0.1397	0.0738	0.2119	0.2282	0.1023	0.4823	0.3124
20:00	0.0741	1.1830	0.2882	0.0732	0.2930	0.0925	0.4207	0.1074	0.1392	0.3939
21:00	0.0739	1.2027	0.3006	0.0715	0.2641	0.0960	0.2930	0.0743	0.2144	0.3220
22:00	0.0744	1.1648	0.3968	0.0736	0.2644	0.0835	0.2772	0.0761	0.4115	0.1796
23:00	0.0739	0.8907	0.2863	0.2038	0.2590	0.0825	0.3066	0.0773	0.3266	0.1828

Πίνακας 3. 11 Πίνακας σεναρίων ανελαστικής κατανάλωσης

Παραγωγή ΑΠΕ

Για την τυχαία ημέρα που επιλέχθηκε, ανακτούμε από το αρχείο αποτελεσμάτων ISP1 τη χρονοσειρά παραγωγής των ΑΠΕ. Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε στη συγκεκριμένη χρονοσειρά, δέκα χρονοσειρές σφαλμάτων πρόβλεψης της παραγωγής τους. Τα σφάλματα προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ προβλέψεων παραγωγής, οι οποίες ανακτώνται από αρχεία πρόβλεψης των ενοποιημένων προγραμματισμών (*ISP RES forecast*) και της πραγματικής παραγωγής από δεδομένα SCADA. Για την κατασκευή των σεναρίων, η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για 10 διαφορετικές χρονοσειρές σφαλμάτων άρα δημιουργήθηκαν 10 διαφορετικές χρονοσειρές παραγωγής των ΑΠΕ (σενάρια).

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε για κάθε ώρα της τυχαίας ημέρας τον τύπο (3.1) με το μέγεθος RES να κυμαίνεται ανάλογα το σενάριο. Τελικά, καθότι για κάθε σενάριο, κάθε ώρα της ημέρας παρουσιάζει διαφορετικό ποσοστό κάλυψης του φορτίου από ΑΠΕ και υδροηλεκτρικά (λόγω διαφορετικής τιμής του μεγέθους RES), δημιουργούνται δέκα διαφορετικές διατάξεις των μπλοκ της ταρίφας. Ο Πίνακας 3.12 παρουσιάζει τα σενάρια που εξήχθησαν.

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5	Σενάριο 6	Σενάριο 7	Σενάριο 8	Σενάριο 9	Σενάριο 10
Ωρα	Ποσοστό κάλυψης φορτίου από ΑΠΕ και υδροηλεκτρικά (%)									
0:00	16.09	17.15	16.33	16.06	16.11	16.72	18.35	17.59	12.81	16.44
1:00	15.07	15.14	13.54	15.91	14.92	14.29	15.43	14.68	15.40	13.36
2:00	15.37	14.47	12.96	16.20	15.68	14.22	16.33	14.06	15.07	13.52
3:00	15.25	15.68	12.27	16.71	15.64	13.50	15.99	14.36	15.43	13.70
4:00	17.01	15.69	12.54	17.13	15.61	12.69	15.71	15.13	15.42	15.05
5:00	18.04	16.59	12.44	16.96	15.42	12.27	17.63	15.04	15.24	15.41
6:00	16.88	17.59	11.84	16.59	15.73	12.44	17.84	15.95	15.36	14.58
7:00	18.79	20.57	14.70	18.47	19.19	14.07	19.72	18.93	17.25	16.57
8:00	32.61	28.98	29.50	28.81	32.60	30.43	31.97	34.50	27.88	30.76
9:00	49.59	42.04	47.32	42.72	46.99	50.83	48.92	52.70	43.12	49.18
10:00	64.23	55.84	62.96	53.99	61.10	62.29	63.63	64.66	56.83	61.49
11:00	74.93	68.50	73.29	66.14	70.83	71.11	72.90	72.78	67.11	70.10
12:00	81.72	74.88	76.65	76.03	76.39	75.53	77.28	77.74	73.22	75.35
13:00	77.03	75.72	89.46	82.41	83.25	77.97	79.50	80.58	77.03	78.74
14:00	73.89	79.17	86.46	78.14	78.71	76.81	78.40	79.41	76.96	77.60
15:00	70.31	76.70	80.17	68.19	69.88	72.67	73.73	75.26	70.93	72.81
16:00	61.49	62.16	70.48	57.45	58.95	63.85	59.79	65.83	62.78	63.77
17:00	46.66	48.58	53.47	45.05	44.52	48.20	45.57	52.05	48.88	46.62
18:00	30.45	34.43	32.27	29.55	25.40	26.72	31.53	27.03	31.47	30.77
19:00	18.64	21.77	15.62	19.76	15.05	15.88	19.52	15.96	18.79	20.88
20:00	16.53	20.61	13.05	16.83	13.86	13.80	16.99	14.36	16.08	17.30
21:00	16.63	18.31	13.84	15.99	14.27	13.60	15.42	13.13	16.00	15.85
22:00	17.83	16.76	14.11	16.11	14.79	14.41	16.12	12.94	15.74	15.83
23:00	17.79	17.37	14.34	15.95	15.51	16.72	17.28	12.53	15.65	16.51

Αυξανόμενο ποσοστό κάλυψης φορτίου συστήματος από ΑΠΕ και υδροηλεκτρική παραγωγή →			
Μείωση τιμής →			
Μπλοκ 1	Μπλοκ 2	Μπλοκ 3	Μπλοκ 4

Πίνακας 3. 12 Πίνακας σεναρίων παραγωγής ΑΠΕ

Παρατηρείται ότι ανεξάρτητα την ημέρα, οι οικονομικότερες ώρες είναι οι μεσημεριανές, καθώς τότε είναι μεγάλη η παραγωγή των Φ/Β σε κάθε σενάριο.

3.2.2 Κατασκευή μαθηματικού μοντέλου

Παρακάτω παρατίθεται η μαθηματική μοντελοποίηση της στοχαστικής εκδοχής του μοντέλου. Σημειώνεται ότι κάθε σενάριο τιμής και ανελαστικής κατανάλωσης θεωρείται ισοπίθανο. Καθότι

κάθε στοχαστική συνιστώσα φέρει 10 διαφορετικά σενάρια, δημιουργούνται συνολικά $10 \times 10 = 100$ διαφορετικά σενάρια τιμών (συνδυασμός διαφορετικών τιμών και διατάξεων) και μέσω των συνδυασμών τους με τα σενάρια ανελαστικής κατανάλωσης $100 \times 10 = 1000$ σενάρια συνολικά για το στοχαστικό μοντέλο. Στο τέλος του μαθηματικού μοντέλου επεξηγείται η ειδική μοντελοποίηση της μεταβλητής απόφασης που αφορά το πλυντήριο πιάτων.

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{minimize } \frac{1}{s1} * \frac{1}{s2} * \left(\sum_{s1=1}^{S1} \sum_{s2=1}^{S2} \sum_{t=1}^T ToU_{s1,t} * e_{s2,t} \right)$$

$ToU_{s1,t}$: τιμή υβριδικής ταρίφας κατά την ώρα t στο σενάριο τιμής $s1$ [€/kWh]

$e_{s2,t}$: συνολική κατανάλωση κατά την ώρα t [kWh] στο σενάριο ανελαστικής κατανάλωσης $s2$

$T = 24$, $S1$: πλήθος σεναρίων τιμής, $S2$: πλήθος σεναρίων ανελαστικής κατανάλωσης

$t, s1, s2 \in \mathbb{N}$

$$e_{t,s2} = \sum_k^K \sum_{ro}^{Ro(k)} Q_{cook}{}_{k,ro} * x_{k,ro,t} + \sum_m^M \sum_{rw}^{Rw(m)} Q_{washing.machine}{}_{m,rw} * y_{m,rw,t} \\ + \sum_n^N \sum_{rd}^{Rd(n)} Q_{dishwasher}{}_{n,rd} * z_{n,rd,s1,s2,t} + inflexible_{t,s2}$$

$k, m, n \in \mathbb{N}$

K : φορές που ο καταναλωτής μαγειρεύει μέσα στην ημέρα

M : πλήθος λειτουργιών πλυντηρίου ρούχων μέσα στην ημέρα

N : πλήθος λειτουργιών πλυντηρίου πιάτων μέσα στην ημέρα

$ro, rw, rd \in \mathbb{N}$

$Ro(k)$: πλήθος ωρών λειτουργίας φούρνου κ.τ.λ. κατά την k -οστή λειτουργία μέσα στην ημέρα

$Rw(m)$: πλήθος ωρών λειτουργίας πλ. ρούχων κατά την m -οστή λειτουργία μέσα στην ημέρα

$Rd(n)$: πλήθος ωρών λειτουργίας πλ. πιάτων κατά την n -οστή λειτουργία μέσα στην ημέρα

$Q_{cook}{}_{k,ro}$: κατανάλωση [kWh] κατά την ro -οστή ώρα λειτουργίας της k -οστής λειτουργίας του φούρνου κ.τ.λ.

$Q_{washing.machine}{}_{m,rw}$: κατανάλωση [kWh] κατά την rw -οστή ώρα λειτουργίας της m -οστής λειτουργίας του πλυντηρίου ρούχων

$Q_{dishwasher}{}_{n,rd}$: κατανάλωση [kWh] κατά την rd -οστή ώρα λειτουργίας της n -οστής λειτουργίας του πλυντηρίου πιάτων

$inflexible_{t,s2}$: ανελαστική κατανάλωση [kWh] κατά την ώρα t της ημέρας στο σενάριο ανελαστικής κατανάλωσης $s2$

Μεταβλητές απόφασης

$$x_{k,ro,t} \in \{0,1\}$$

$$y_{m,rw,t} \in \{0,1\}$$

$$z_{n,rd,s1,s2,t} \in \{0,1\}$$

Περιορισμοί

$$\sum_{t=1}^T x_{k,ro,t} = 1 \quad \forall (k, ro) \quad (1)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{m,rw,t} = 1 \quad \forall (m, rw) \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T z_{n,rd,s1,s2,t} = 1 \quad \forall (n, rd, s1, s2) \quad (3)$$

$$x_{k,ro,t} = 0 \quad \forall k, \quad (4)$$
$$ro = 1,$$
$$\forall t \text{ όπου } At > 1$$

Όπου $At = |t - t \text{ cook}(k)|$, $t \text{ cook}(k)$ είναι η ώρα εκκίνησης λειτουργίας της k -οστής λειτουργίας του φούρνου κ.τ.λ.

$$y_{m,rw,t} = 0 \quad \forall m, \quad (5)$$
$$rw = 1,$$
$$\forall t \text{ όπου } Bt > 6$$

Όπου $Bt = |t - t \text{ wash}(m)|$, $t \text{ wash}(m)$ είναι η ώρα εκκίνησης λειτουργίας της m -οστής λειτουργίας του πλυντηρίου ρούχων

$$z_{n,rd,s1,s2,t} = 0 \quad \forall (n, s1, s2) \quad (6)$$
$$rd = 1,$$
$$\forall t \text{ όπου } Ct > 6$$

Όπου $Ct = |t - t \text{ dish}(n)|$, $t \text{ dish}(n)$ είναι η ώρα εκκίνησης λειτουργίας της n -οστής λειτουργίας του πλυντηρίου πιάτων

$$x_{k,ro,t} = x_{k,ro+1,t+1}, \quad \forall (k, ro, t), \quad ro \in [1, Ro(k) - 1], \quad t \in [1, T - 1] \quad (7)$$

$$y_{m,rw,t} = y_{m,rw+1,t+1}, \quad \forall (m, rw, t), \quad rw \in [1, Rw(m) - 1], \quad t \in [1, T - 1] \quad (8)$$

$$z_{n,rd,s1,s2,t} = z_{n,rd+1,s1,s2,t+1}, \quad \forall (n, rd, s1, s2, t), \quad rd \in [1, Rd(n) - 1], \quad t \in [1, T - 1] \quad (9)$$

$$x_{k,ro,t} + x_{k',ro',t} \leq 1, \quad \forall (ro, ro', t), \quad k \neq k' \quad (10)$$

$$k' \in \{1, \dots, K\}, \quad ro' \in \{1, \dots, Ro(k')\}$$

$$y_{m,rw,t} + y_{m',rw',t} \leq 1, \quad \forall (rw, rw', t), \quad m \neq m' \quad (11)$$

$$m' \in \{1, \dots, M\}, \quad rw' \in \{1, \dots, Rw(k')\}$$

$$z_{n,rd,s1,s2,t} + z_{n',rd',s1,s2,t} \leq 1, \quad \forall (rd, rd', s1, s2, t), \quad n \neq n' \quad (12)$$

$$n' \in \{1, \dots, N\}, \quad rd' \in \{1, \dots, Rd(k')\}$$

$$\exists t \neq t' : A_t < A_{t'} \quad \text{και} \quad \sum_{s1}^{S1} \sum_{ro=1}^{Ro(k)} Q_{cook} k,ro * ToU_{t+ro-1} \leq \sum_{s1}^{S1} \sum_{ro=1}^{Ro(k)} Q_{cook} k,ro * ToU_{t'+ro-1}$$

$$t, t' \in [t_{cook}(k)-1, t_{cook}(k)+1]$$

τότε

$$\sum_{ro=1}^{Ro(k)} x_{k,ro,t'+ro-1} < Ro(k) \quad (13)$$

$$\forall (k, t, t')$$

$$\exists t \neq t' : B_t < B_{t'} \quad \text{και} \quad \sum_{s1}^{S1} \sum_{rw=1}^{Rw(m)} Q_{washing.machine} m,rw * ToU_{t+rw-1} \leq \sum_{s1}^{S1} \sum_{rw=1}^{Rw(m)} Q_{washing.machine} m,rw * ToU_{t'+rw-1}$$

$$t, t' \in [t_{wash}(m)-6, t_{wash}(m)+6]$$

τότε

$$\sum_{rw=1}^{Rw(m)} y_{m,rw,t'+rw-1} < Rw(m) \quad (14)$$

$$\forall (m, t, t')$$

$$\exists t \neq t' : C_t < C_{t'} \quad \text{και} \quad \sum_{s1}^{S1} \sum_{rd=1}^{Rd(n)} Q_{dishwasher} n,rd * ToU_{t+rd-1} \leq \sum_{s1}^{S1} \sum_{rd=1}^{Rd(n)} Q_{dishwasher} n,rd * ToU_{t'+rd-1}$$

$$t, t' \in [t_{dish}(n)-6, t_{dish}(n)+6]$$

τότε

$$\sum_{rd=1}^{Rd(n)} z_{n,rd,s1,s2,t'+rd-1} < Rd(n) \quad (15)$$

$$\forall (n, t, t', s1, s2)$$

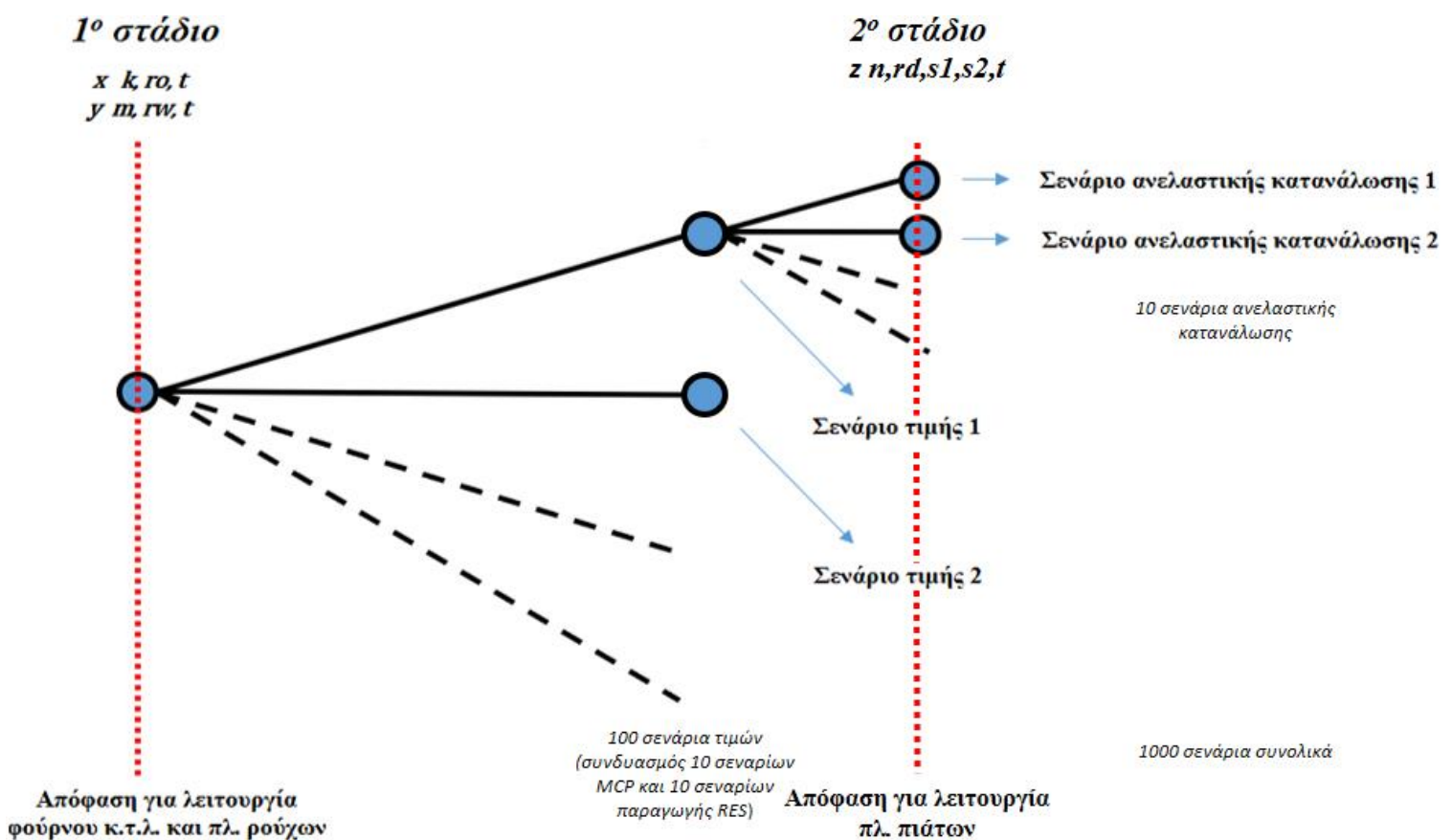
$$e_{s2,t} \leq 10, \quad \forall (s2, t) \quad (16)$$

Σημείωση:

Η ειδική μοντελοποίηση της μεταβλητής απόφασης που αφορά τη λειτουργία του πλυντηρίου πιάτων έγκειται στη μετατροπή του προβλήματος σε ένα πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού 2 σταδίων (two-stage stochastic programming problem). Το παραπάνω μοντέλο υποδεικνύει μία συγκεκριμένη ώρα στην οποία πρέπει να λειτουργήσουν τα φορτία της διαδικασίας του μαγειρέματος και το πλυντήριο ρούχων, λαμβάνοντας υπόψιν συνολικά όλα τα

σενάρια. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται πριν την πραγματοποίηση ενός συγκεκριμένου σεναρίου γι' αυτό και οι αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης ($x_{k,ro,t}$, $y_{m,rw,t}$) δεν εξαρτώνται από τους δείκτες $s1, s2$. Όσον αφορά το πλυντήριο πιάτων, υποδεικνύεται η βέλτιστη ώρα λειτουργίας σε κάθε ένα από τα 1000 σενάρια ξεχωριστά. Η επιλογή της οικονομικότερης ώρας για τη λειτουργία του συγκεκριμένου φορτίου θα μπορούσε να προσδιορίζεται μόνο για τα 100 σενάρια τιμής (η μεταβλητή $z_{n,rd,s1,s2,t}$ να εξαρτάται μόνο από το δείκτη $s1$ και όχι από το δείκτη $s2$), καθώς το σενάριο ανελαστικής κατανάλωσης που τελικά πραγματοποιείται δεν επηρεάζει τη συγκεκριμένη επιλογή. Όμως, για συγκεκριμένα σενάρια ανελαστικής κατανάλωσης ενδέχεται να παραβιάζεται ο περιορισμός (16) μέσω της λειτουργίας σε εκείνη την ώρα, άρα απαιτείται η εξάρτηση και από τους 2 δείκτες. Τελικά, η απόφαση σχετικά με την ώρα στην οποία θα λειτουργήσει αυτό το φορτίο λαμβάνεται αφού πραγματοποιηθεί ένα συγκεκριμένο σενάριο τιμής και ανελαστικής κατανάλωσης. Το Σχήμα 1.3 περιγράφει σχηματικά τη διαδικασία μέσω του δέντρου σεναρίων του προβλήματος.

Εάν το μοντέλο που αναπτυσσόταν δεν αφορούσε στοχαστικό πρόβλημα 2 σταδίων, στην περίπτωση που η μεταβλητή απόφασης του πλυντηρίου πιάτων μοντελοποιούνταν όπως των υπόλοιπων φορτίων, το μοντέλο θα μετατρέποταν σε ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα εξέταζε το μέσο όρο των σεναρίων. Στην αντίθετη περίπτωση, εάν όλες οι μεταβλητές απόφασης παρουσίαζαν εξάρτηση από το κάθε σενάριο, το πρόβλημα θα μπορούσε να διαχωριστεί σε απλούστερα προβλήματα κάθε ένα από τα οποία θα μελετούσε ένα από τα σενάρια.



Σχήμα 3. 1 Δέντρο σεναρίων προβλήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

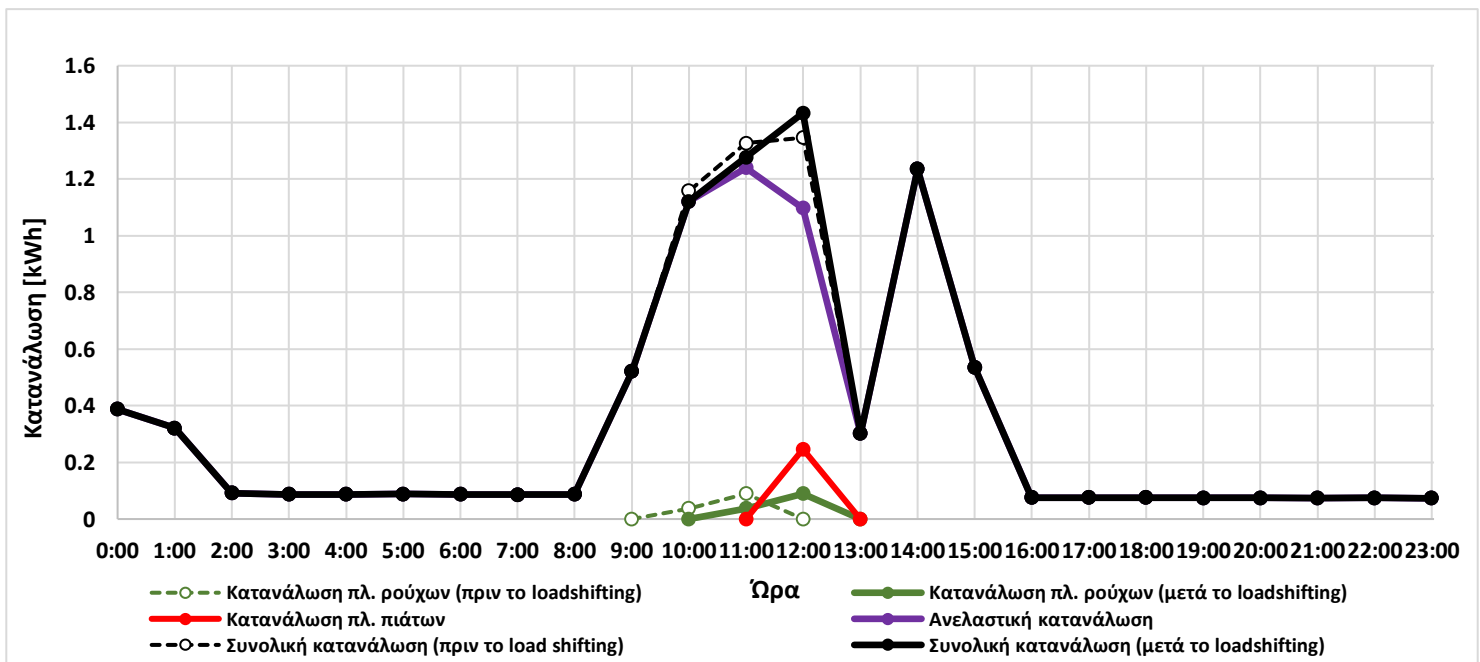
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Ντετερμινιστικό μοντέλο

4.1.1 Εξοικονόμηση

Τα επόμενα διαγράμματα [Διάγραμμα 4.1 - 4.10] παρουσιάζουν σχηματικά για την κάθε ημέρα τη συνολική κατανάλωση, την ανελαστική κατανάλωση και την κατανάλωση των ευέλικτων φορτίων πριν και μετά την εφαρμογή του μοντέλου. Οι αντίστοιχοι πίνακες [Πίνακας 4.1 – 4.10] εμπεριέχουν τις ώρες λειτουργίας των φορτίων πριν και μετά την εφαρμογή του μοντέλου, καθώς και την κατανάλωσή τους. Ακόμη, αναγράφεται το κόστος κάθε περίπτωσης υπό τιμολόγηση με την υβριδική ταρίφα που κατασκευάστηκε, όπως και η εξοικονόμηση που προκύπτει για τον καταναλωτή. Κάτω από κάθε πίνακα παρατίθεται, όπου κρίνεται απαραίτητη, η επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

3/9/2022



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (3/9/2022)

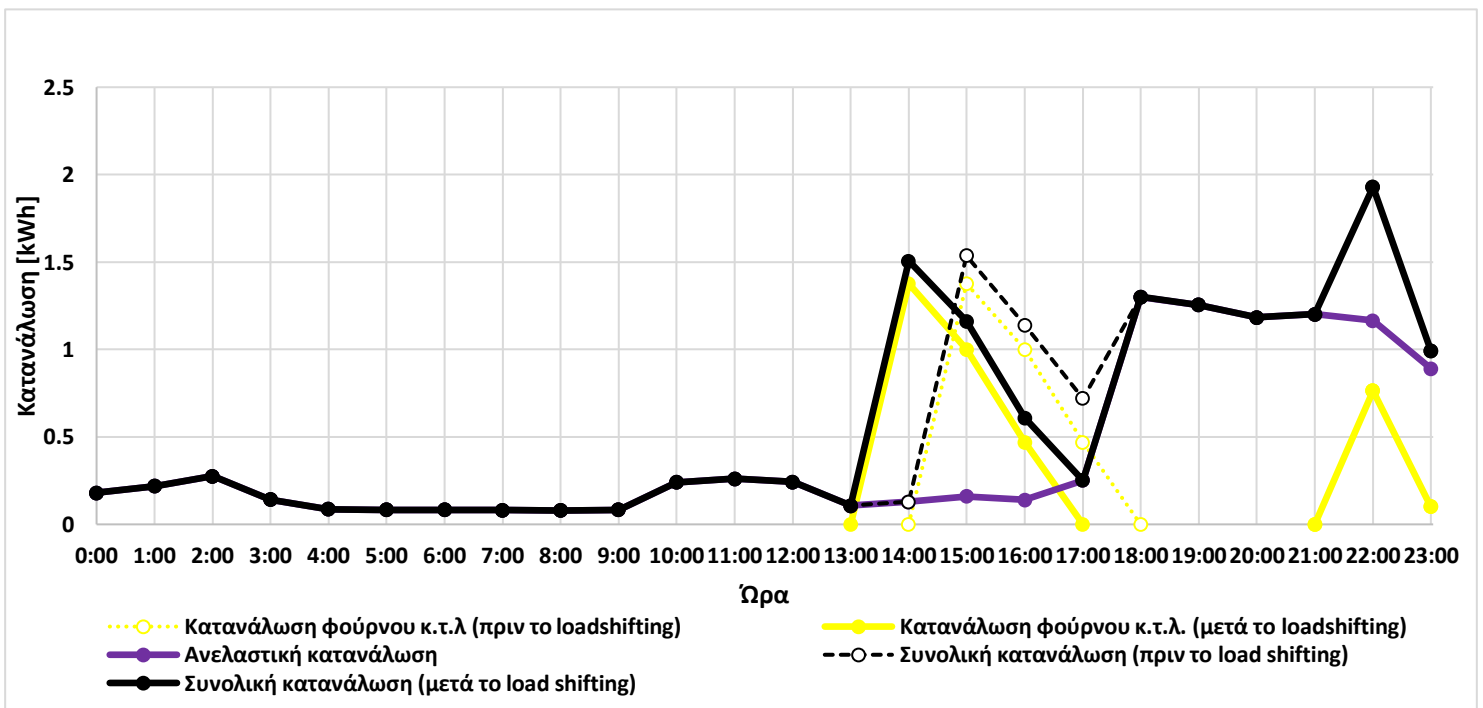
Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	423.96	508.75	508.75	593.54	593.54	508.75	508.75	423.96	423.96	423.96	423.96	254.38
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	254.38	254.38	254.38	254.38	254.38	423.96	423.96	423.96	423.96	423.96	423.96	423.96

3/9/2022				
	Φούρνος κ.τ.λ.	Πλυντήριο πιάτων	Πλυντήριο ρούχων	
Load Shifting	Δε λειτουργεί	-	10:00 – 11:00 ($Q_{1,1} = 0,0377$ kWh) 11:00 – 12:00 ($Q_{1,2} = 0,0892$ kWh) → 11:00 – 12:00 12:00 – 13:00	[€/MWh] 423,96 254,38 → 254,38 254,38
Κόστος χωρίς load shifting [€]	2,7999			
Κόστος με load shifting [€]	2,7935			
Κέρδος [€], [%]	0,0064		0,23 %	

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (3/9/2022)

- Η λειτουργία του πλυντηρίου πιάτων δεν υπόκειται σε load shifting, καθώς η ώρα στην οποία πραγματοποιείται (12:00 – 13:00) ανήκει στο οικονομικότερο block της ταρίφας (254,38 €/MWh).

4/9/2022



Διάγραμμα 4.2 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (4/9/2022)

Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	540.52	540.52	630.60	630.60	540.52	540.52	450.43	450.43	450.43	450.43	450.43	270.26
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	270.26	270.26	270.26	270.26	270.26	450.43	450.43	450.43	450.43	450.43	450.43	450.43

4/9/2022

	Φούρνος κ.τ.λ.		Πλυντήριο πιάτων	Πλυντήριο ρούχων
Load Shifting	1 ^η λειτουργία		Δε λειτουργεί	Δε λειτουργεί
		[€/MWh]		
	15:00 – 16:00 ($Q_{1,1} = 1.3764$)	270,26		
	16:00 – 17:00 ($Q_{1,2} = 1.0009$)	270,26		
	17:00 – 18:00 ($Q_{1,3} = 0.4692$)	450,43		
	→	→		
	14:00 – 15:00	270,26		
15:00 – 16:00	270,26			
16:00 – 17:00	270,26			
Κόστος χωρίς load shifting [€]	5,6153			
Κόστος με load shifting [€]	5,5307			
Κέρδος [€], [%]	0,0846		1,51 %	

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (4/9/2022)

- Η 2^η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, αν και δεν πραγματοποιείται σε ώρες του οικονομικότερου block, καθώς η προηγούμενη ώρα από τις ώρες καταγεγραμμένης λειτουργίας (περιορισμός load shifting φούρνου κ.τ.λ. έως 1 ώρα πριν ή μετά) έχει ίδια τιμή (450,43 €/MWh).

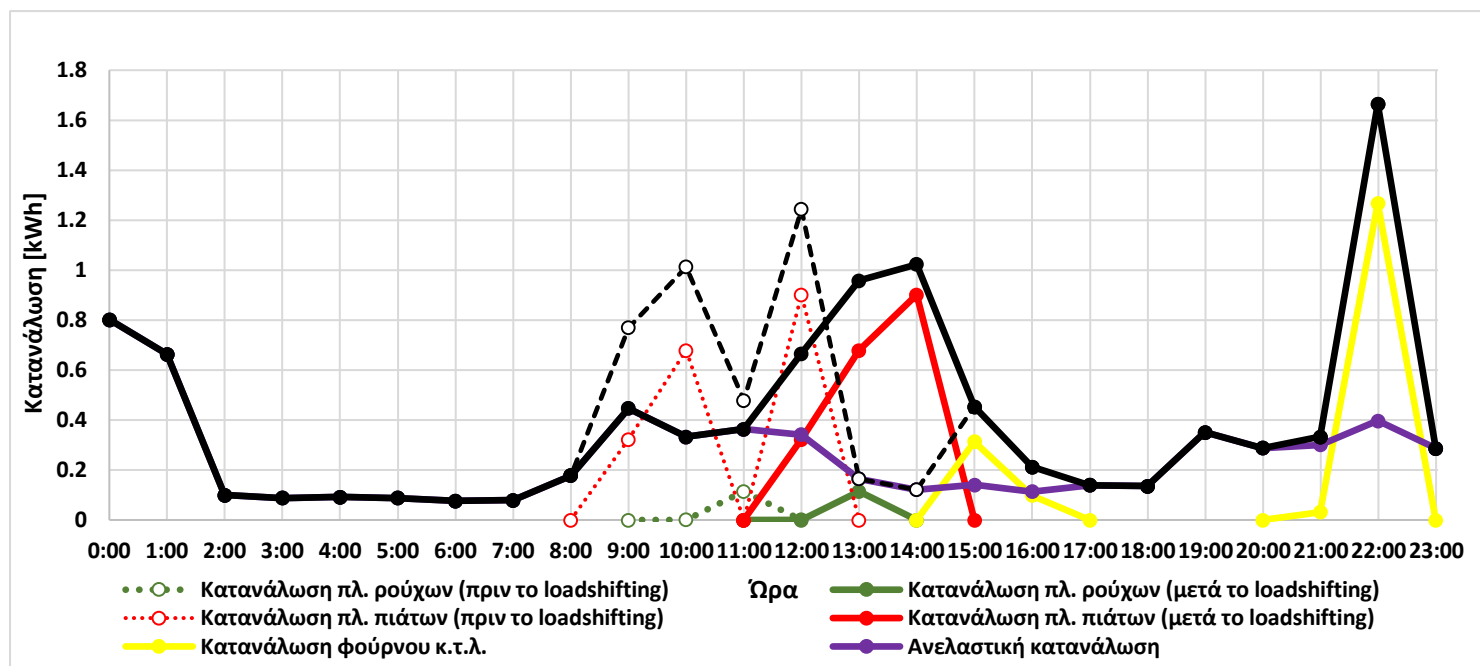
*Δεν είναι δυνατό load shifting προς επόμενες ώρες καθώς η λειτουργία διαρκεί μέχρι και την τελευταία ώρα της ημέρας.

2 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.			
Ωρα	21:00 – 22:00 (διαθέσιμη για load shifting)	22:00 – 23:00 (λειτουργία)	23:00 – 24:00 (λειτουργία)
Τιμή [€/MWh]	450,43	450,43	450,43

- Λόγω του ίδιου περιορισμού, από την 1^η λειτουργία, η οποία διαρκεί 3 ώρες, μόνο η 3^η ώρα λειτουργίας μπορεί να μεταφερθεί σε ώρα χαμηλότερης τιμής.

1 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.					
Ωρα	14:00 – 15:00 (διαθέσιμη για load shifting)	15:00 – 16:00 (1 ^η ώρα λειτουργίας)	16:00 – 17:00 (2 ^η ώρα λειτουργίας)	17:00 – 18:00 (3 ^η ώρα λειτουργίας)	18:00 – 19:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	270,26	270,26	270,26	450,43	450,43

5/9/2022



Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (5/9/2022)

Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	656.43	656.43	562.66	562.66	562.66	562.66	468.88	468.88	468.88	468.88	468.88	468.88
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	281.33	281.33	281.33	281.33	281.33	281.33	468.88	468.88	468.88	468.88	468.88	468.88

5/9/2022								
Load Shifting	Φούρνος κ.τ.λ.		Πλυντήριο πιάτων				Πλυντήριο ρούχων	
	1 ^η λειτουργία	2 ^η λειτουργία	1 ^η λειτουργία		2 ^η λειτουργία			
			9:00 – 10:00 ($Q_{1,1} = 0.3228$)	[€/MWh] 468,88	12:00 – 13:00 ($Q_{2,1} = 0.9014$)	[€/MWh] 281,33	10:00 – 11:00 ($Q_{1,1} = 0.0007$)	[€/MWh] 468,88
	-	-	10:00 – 11:00 ($Q_{1,2} = 0.6790$)	468,88	→	→	11:00 – 12:00 ($Q_{1,2} = 0.1143$)	468,88
			→	→		→	→	→
			12:00 – 13:00	281,33			12:00 – 13:00	281,33
			13:00 – 14:00	281,33			13:00 – 14:00	281,33
Κόστος χωρίς load shifting [€]	4,4755							
Κόστος με load shifting [€]	4,2660							
Κέρδος [€], [%]	0,2095						4,68 %	

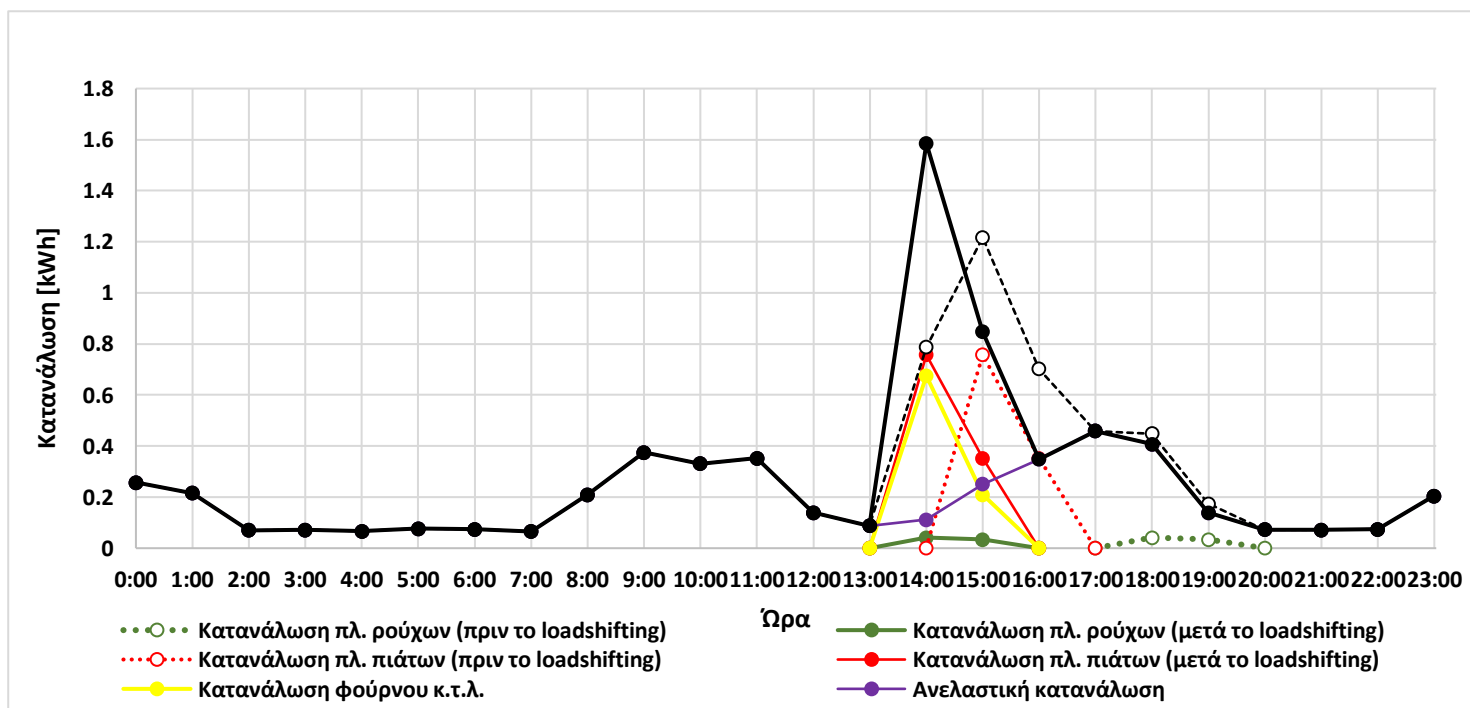
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (5/9/2022)

- Η 1^η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, καθώς οι ώρες στις οποίες πραγματοποιείται (15:00 – 16:00, 16:00 – 17:00), ανήκουν στο οικονομικότερο block της ταρίφας (281,33 €/MWh).
- Η 2^η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, αν και δεν πραγματοποιείται σε ώρες του οικονομικότερου block, καθώς η προηγούμενη και η επόμενη ώρα από τις ώρες καταγεγραμμένης λειτουργίας (περιορισμός load shifting φούρνου έως 1 ώρα πριν ή μετά) έχουν ίδια τιμή (468,88 €/MWh)

2 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.				
Ώρα	20:00 – 21:00 (διαθέσιμη για load shifting)	21:00 – 22:00 (λειτουργία)	22:00 – 23:00 (λειτουργία)	23:00 – 24:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	468,88	468,88	468,88	468,88

- Η 2^η λειτουργία του πλυντηρίου πιάτων αν και δε μεταφέρεται σε ώρα χαμηλότερης τιμής, υπόκειται σε load shifting για να μην επικαλυφθεί με την 1^η λειτουργία του και να έπεται αυτής.

6/9/2022



Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (6/9/2022)

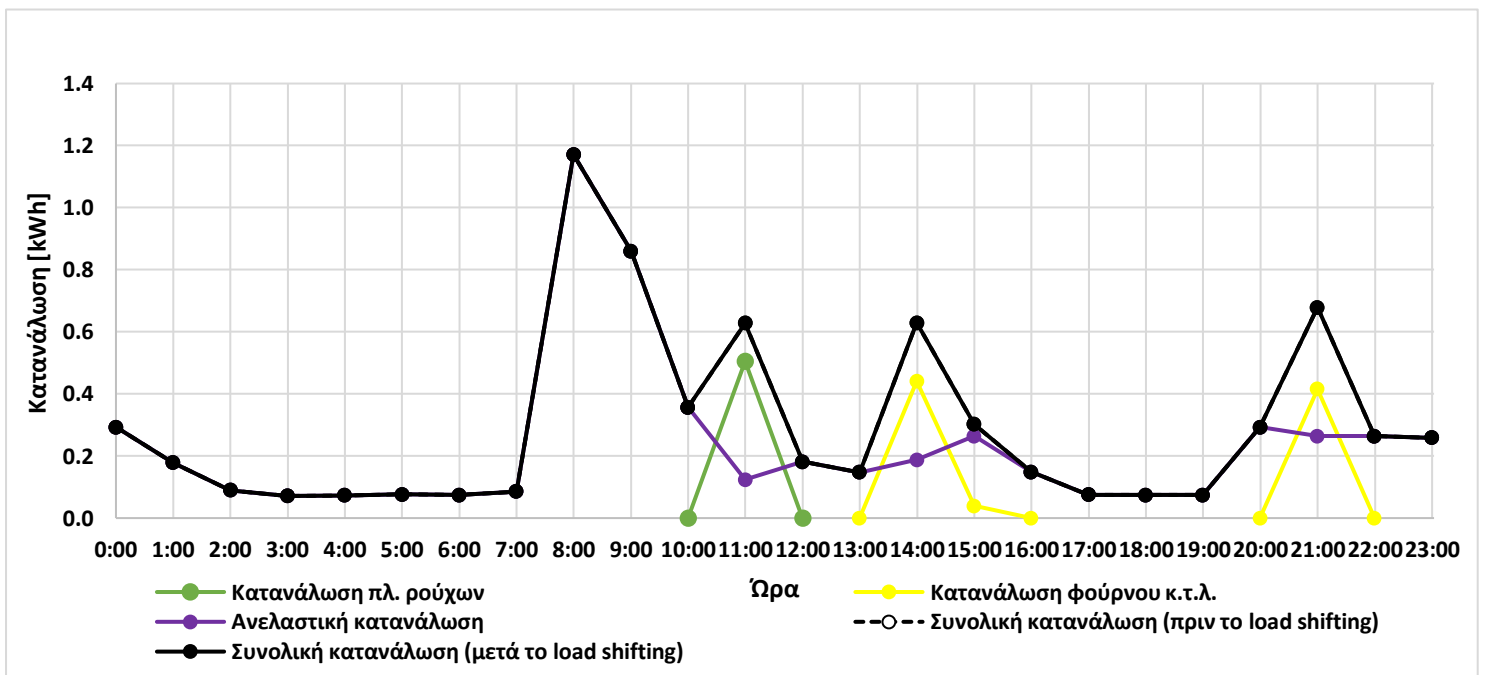
Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	623.75	519.79	519.79	519.79	519.79	519.79	519.79	519.79	519.79	519.79	311.87	311.87
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	311.87	311.87	311.87	311.87	519.79	519.79	519.79	623.75	727.71	623.75	623.75	727.71

6/9/2022						
	Φούρνος κ.τ.λ.	Πλυντήριο πιάτων			Πλυντήριο ρούχων	
Load Shifting	-	15:00 – 16:00 ($Q_{1,1} = 0,7570$)	[€/MWh]	18:00 – 19:00 ($Q_{1,1} = 0,04172$)	[€/MWh]	
		16:00 – 17:00 ($Q_{1,2} = 0,3527$)	311,87	19:00 – 20:00 ($Q_{1,2} = 0,03426$)	519,79	
		→	→	→	→	
		14:00 – 15:00	311,87	14:00 – 15:00	311,87	
		15:00 – 16:00	311,87	15:00 – 16:00	311,87	
Κόστος χωρίς load shifting [€]	2.9224					
Κόστος με load shifting [€]	2.8393					
Κέρδος [€] , [%]	0,0831			2,84 %		

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (6/9/2022)

- Η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, καθώς οι ώρες στις οποίες πραγματοποιείται (14:00 – 15:00 , 15:00 – 16:00), ανήκουν στο οικονομικότερο block της ταρίφας (311,87 €/MWh).

7/9/2022



Διάγραμμα 4.5 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (7/9/2022)

Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	509.28	424.40	424.40	424.40	424.40	424.40	424.40	424.40	424.40	424.40	424.40	254.64
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	254.64	254.64	254.64	254.64	254.64	424.40	424.40	509.28	594.16	509.28	509.28	594.16

7/9/2022				
Load Shifting	Φούρνος		Πλυντήριο πιάτων	Πλυντήριο ρούχων
	1 ^η λειτουργία	2 ^η λειτουργία	Δε λειτουργεί	-
	-	-		
Κόστος χωρίς load shifting [€]	2,8664			
Κόστος με load shifting [€]	2,8664			
Κέρδος [€]	0			

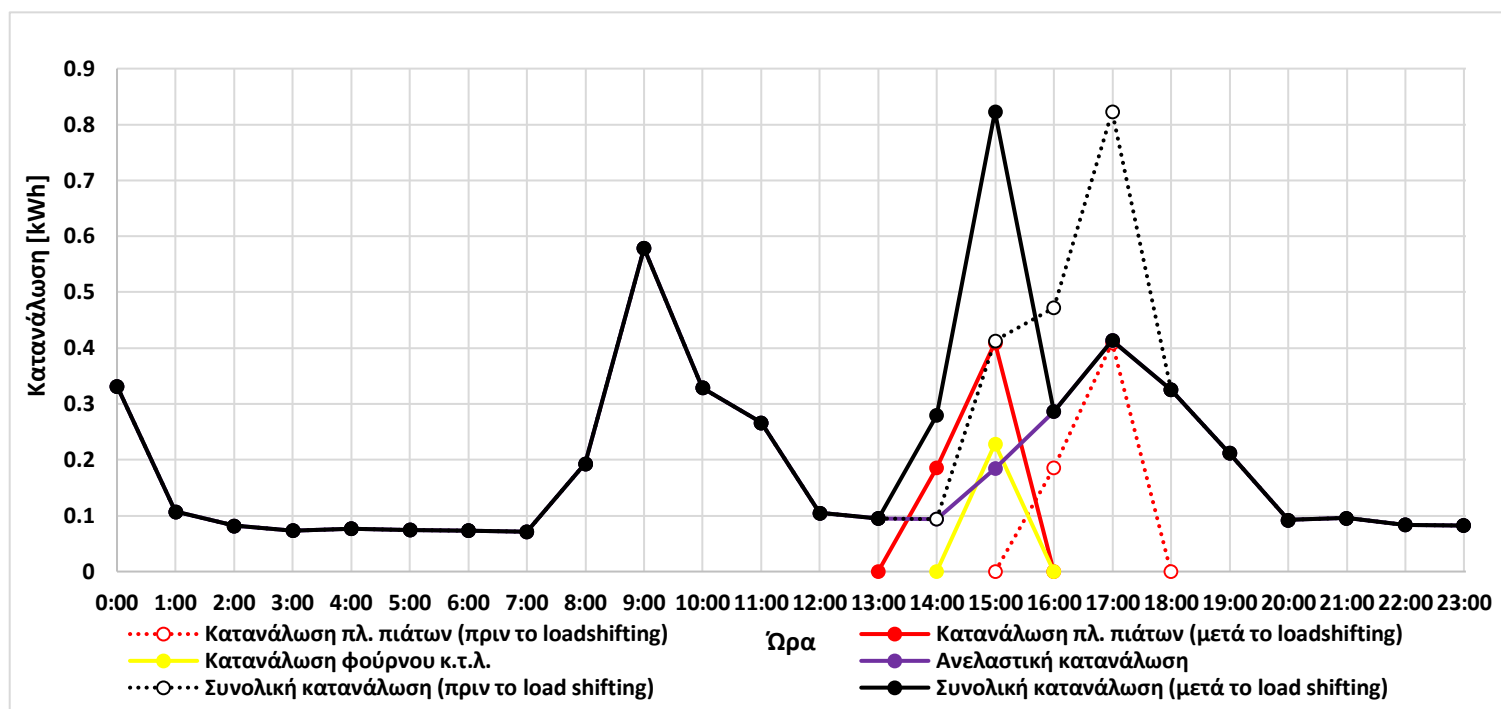
Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (7/9/2022)

- Η 2^η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, αν και δεν πραγματοποιείται σε ώρα του οικονομικότερου block, καθώς η προηγούμενη και η επόμενη ώρα από την ώρα καταγεγραμμένης λειτουργίας (περιορισμός load shifting φούρνου κ.τ.λ. έως 1 ώρα πριν ή μετά) έχουν μεγαλύτερη (594,16 €/MWh) και ίση (509,28 €/MWh) τιμή αντίστοιχα.

2 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.			
Ωρα	20:00 – 21:00 (διαθέσιμη για load shifting)	21:00 – 22:00 (λειτουργία)	22:00 – 23:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	594,16	509,28	509,28

- Η λειτουργία του πλυντηρίου ρούχων και η 1^η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκεινται σε load shifting, καθώς οι ώρες στις οποίες πραγματοποιούνται (11:00 – 12:00 και 14:00-15:00, 15:00 – 16:00 αντίστοιχα), ανήκουν στο οικονομικότερο block της ταρίφας (254,64 €/MWh).
- Καθότι τα φορτία λειτουργούσαν ήδη στις οικονομικότερες ώρες της ταρίφας, δεν υπόκεινται σε load shifting κατά την εφαρμογή του μοντέλου και άρα δεν προκύπτει εξοικονόμηση.

8/9/2022



Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (8/9/2022)

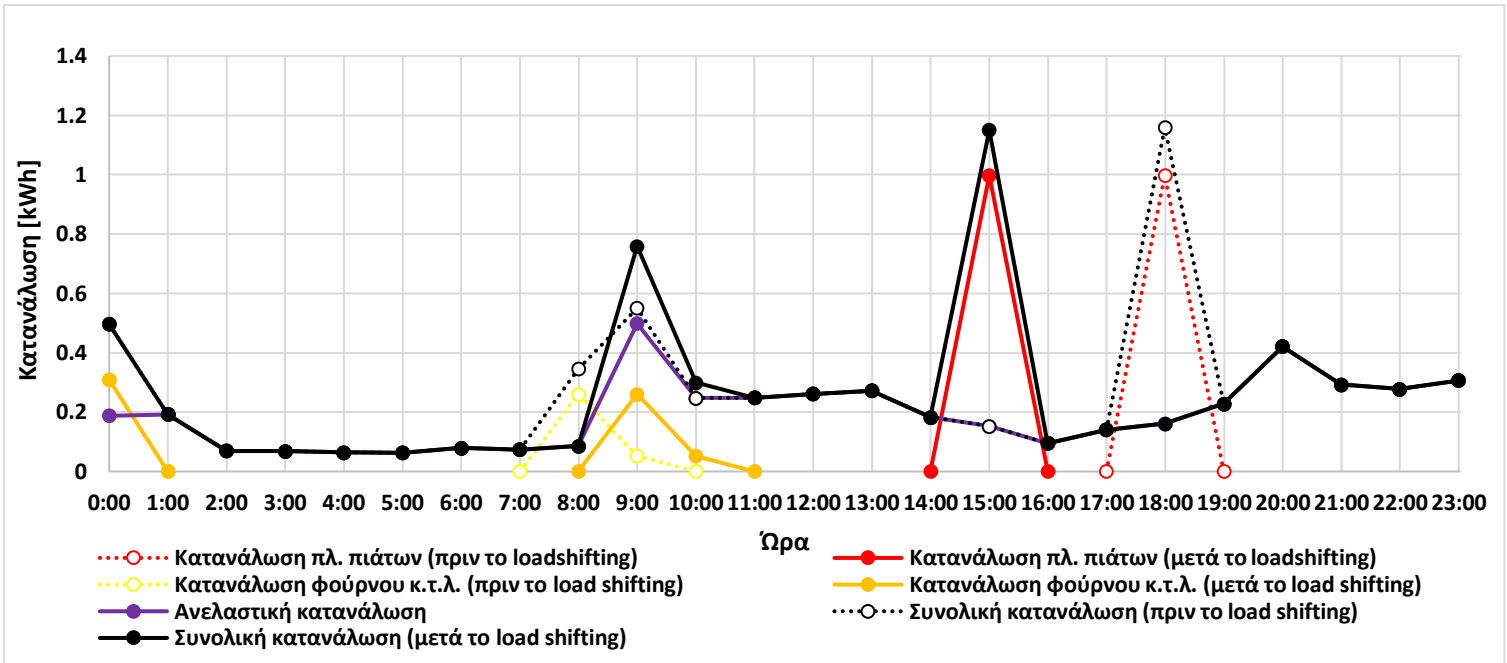
Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	428.58	428.58	428.58	428.58	428.58	428.58	428.58	428.58	428.58	428.58	257.15	257.15
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	257.15	257.15	257.15	257.15	428.58	428.58	514.30	514.30	514.30	514.30	600.01	600.01

8/9/2022				
	Φούρνος κ.τ.λ.	Πλυντήριο πιάτων		Πλυντήριο ρούχων
Load Shifting	-	16:00 – 17:00 ($Q_{1,1} = 0.1857$) 17:00 – 18:00 ($Q_{1,2} = 0.4096$) → 14:00 – 15:00 15:00 – 16:00	[€/MWh] 428,58 428,58 → 257,15 257,15	Δε λειτουργεί
Κόστος χωρίς load shifting [€]	2.0751			
Κόστος με load shifting [€]	1.9731			
Κέρδος [€] , [%]	0,1020		4,92 %	

Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (8/9/2022)

- Η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, καθώς η ώρα στην οποία πραγματοποιείται (15:00 – 16:00), ανήκει στο οικονομικότερο block της ταρίφας (257,15 €/MWh).

9/9/2022



Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (9/9/2022)

Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	454.91	545.89	636.87	636.87	545.89	545.89	545.89	454.91	454.91	454.91	272.95	272.95
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	272.95	272.95	272.95	272.95	454.91	454.91	454.91	454.91	454.91	454.91	454.91	454.91

9/9/2022						
Load Shifting	Φούρνος		Πλυντήριο πιάτων		Πλυντήριο ρούχων	
	1 ^η λειτουργία	2 ^η λειτουργία				
	-	8:00 – 9:00 ($Q_{2,1} = 0,2603$) 9:00 – 10:00 ($Q_{2,2} = 0,0524$) → 9:00 – 10:00 10:00 – 11:00	[€/MWh] 454,91 454,91 → 454,91 272,95	18:00 – 19:00 ($Q_{1,1} = 0,9978$) → 15:00 – 16:00	[€/MWh] 454,91 → 272,95	Δε λειτουργεί

Κόστος χωρίς load shifting [€]	2,6734	
Κόστος με load shifting [€]	2,4823	
Κέρδος [€], [%]	0,1911	7,15 %

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (9/9/2022)

- Η 1^η λειτουργία του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκειται σε load shifting, αν και δεν πραγματοποιείται σε ώρα του οικονομικότερου block, καθώς η επόμενη ώρα από την ώρα καταγεγραμμένης λειτουργίας (περιορισμός load shifting φούρνου κ.τ.λ. έως 1 ώρα πριν ή μετά) έχει μεγαλύτερη τιμή (545,89 €/MWh).

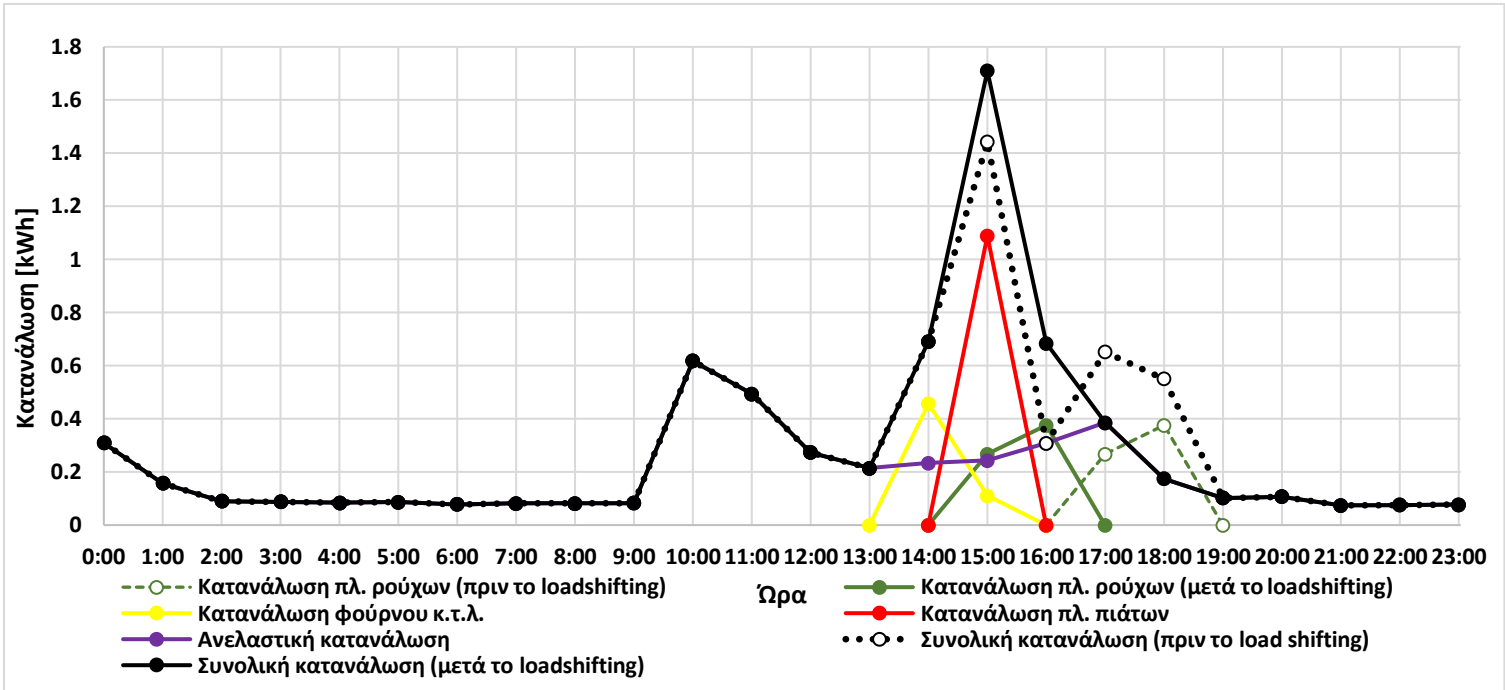
**Δεν είναι δυνατό load shifting προς προηγούμενη ώρα καθώς η λειτουργία πραγματοποιείται την πρώτη ώρα της ημέρας.*

1 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.		
Ωρα	00:00 – 01:00 (λειτουργία)	01:00 – 02:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	454,91	545,89

- Λόγω του ίδιου περιορισμού, από τη 2^η λειτουργία, η οποία διαρκεί 2 ώρες, μόνο η 2^η ώρα λειτουργίας μπορεί να μεταφερθεί σε ώρα χαμηλότερης τιμής.

2 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.				
Ωρα	7:00 – 8:00 (διαθέσιμη για load shifting)	8:00 – 9:00 (1 ^η ώρα λειτουργίας)	9:00 – 10:00 (2 ^η ώρα λειτουργίας)	11:00 – 12:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	454,91	454,91	454,91	272,95

10/9/2022



Διάγραμμα 4.8 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (10/9/2022)

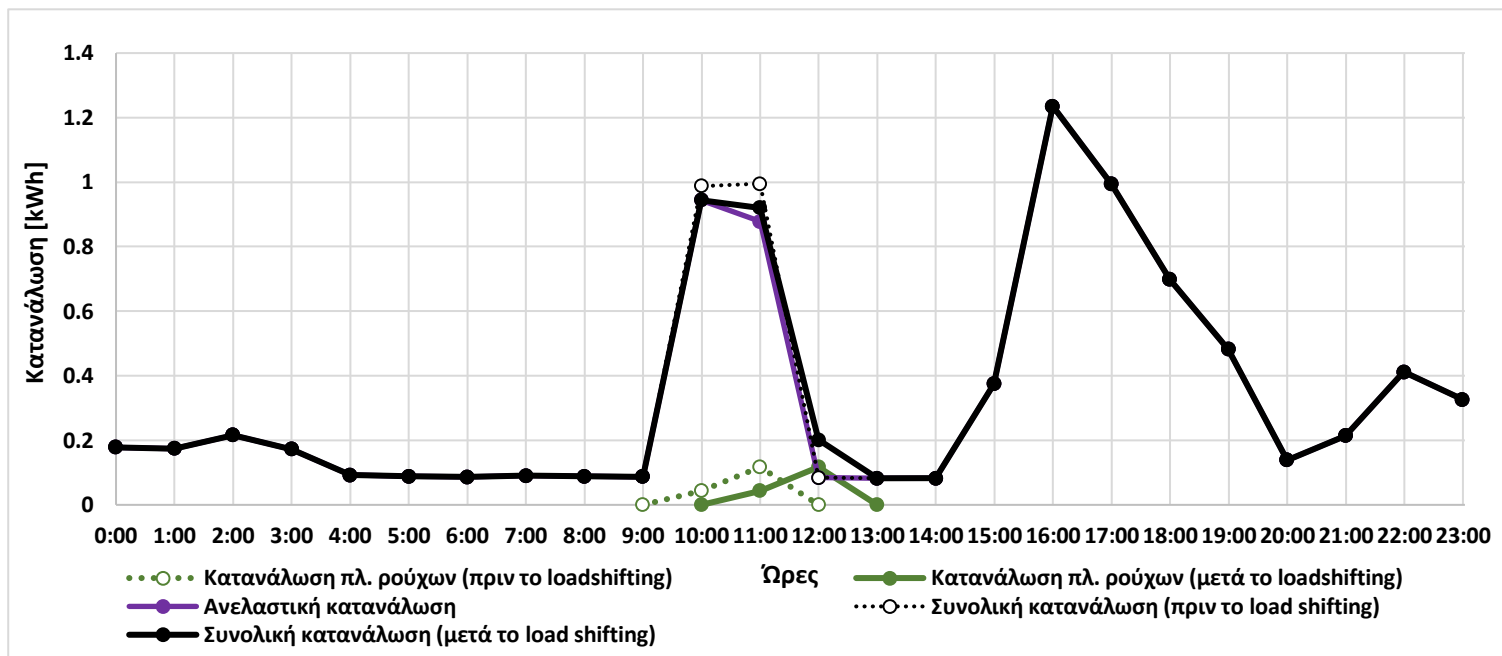
Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	526.70	438.92	526.70	526.70	614.49	614.49	526.70	438.92	438.92	438.92	438.92	263.35
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	263.35	263.35	263.35	263.35	263.35	438.92	438.92	438.92	438.92	438.92	438.92	438.92

10/9/2022			
	Φούρνος κ.τ.λ.	Πλυντήριο πιάτων	Πλυντήριο ρούχων
Load Shifting	-	-	[€/MWh] 17:00 – 18:00 ($Q_{1,1} = 0.2671$) 18:00 – 19:00 ($Q_{1,2} = 0.3758$) → 15:00 – 16:00 16:00 – 17:00 438,92 438,92 → 263,35 263,35
Κόστος χωρίς load shifting [€]	2,4720		
Κόστος με load shifting [€]	2,3591		
Κέρδος [€] , [%]	0,1129		4,57 %

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (10/9/2022)

- Οι λειτουργίες του πλυντηρίου πιάτων και του φούρνου κ.τ.λ. δεν υπόκεινται σε load shifting, καθώς οι ώρες στις οποίες πραγματοποιούνται (15:00 – 16:00 και 14:00 - 15:00, 15:00 – 16:00 αντίστοιχα), ανήκουν στο οικονομικότερο block της ταρίφας (263,35 €/MWh).

11/9/2022



Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου (11/9/2022)

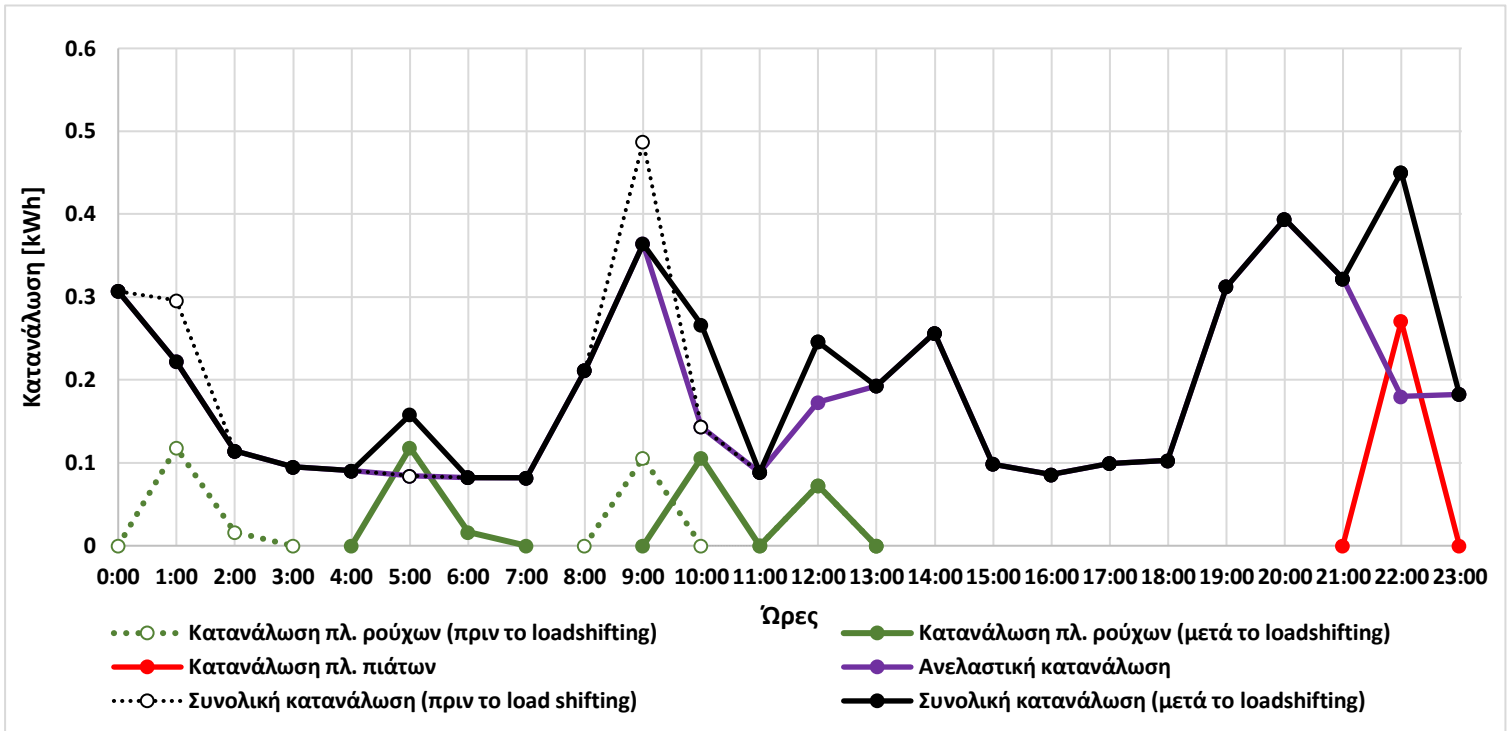
Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	430.04	516.05	516.05	602.06	602.06	516.05	516.05	430.04	430.04	430.04	430.04	263.35
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	263.35	263.35	263.35	263.35	263.35	430.04	430.04	430.04	430.04	430.04	430.04	430.04

11/9/2022

	Φούρνος κ.τ.λ.	Πλυντήριο πιάτων	Πλυντήριο ρούχων	
Load Shifting	Δε λειτουργεί	Δε λειτουργεί	10:00 – 11:00 ($Q_{1,1} = 0,0434$) 11:00 – 12:00 ($Q_{1,2} = 0,1170$) → 11:00 – 12:00 12:00 – 13:00	[€/MWh] 430,04 263,35 → 263,35 263,35
Κόστος χωρίς load shifting [€]	3,2077			
Κόστος με load shifting [€]	3,2002			
Κέρδος [€] , [%]	0,0075		0,24 %	

Πίνακας 4.9 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (11/9/2022)

12/9/2022



Διάγραμμα 4.10 Διάγραμμα καταναλώσεων πριν και μετά την εφαρμογή του νετερμινιστικού μοντέλου (12/9/2022)

Ωρα	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τιμή [€/MWh]	580.44	677.18	677.18	580.44	580.44	483.70	483.70	483.70	483.70	483.70	290.22	290.22
Ωρα	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Τιμή [€/MWh]	290.22	290.22	290.22	290.22	483.70	483.70	483.70	483.70	483.70	483.70	483.70	580.44

12/9/2022							
Load Shifting	Φούρνος κ.τ.λ.	Πλυντήριο πιάτων	Πλυντήριο ρούχων				
			1 ^η λειτουργία		2 ^η λειτουργία		3 ^η λειτουργία
			1:00 – 2:00 ($Q_{1,1} = 0,1182$) 2:00 – 3:00 ($Q_{1,2} = 0,0162$) → 5:00 – 6:00 6:00 – 7:00	[€/MWh] 677,18 677,18 → 483,70 483,70	9:00 – 10:00 ($Q_{2,1} = 0,1059$) → 10:00 – 11:00	[€/MWh] 483,70 → 290,22	
	Δε λειτουργεί	-				-	

Κόστος χωρίς load shifting [€]	2,2802	
Κόστος με load shifting [€]	2,2337	
Κέρδος [€], [%]	0,0465	2,04 %

Πίνακας 4. 10 Αποτελέσματα εφαρμογής ντετερμινιστικού μοντέλου (12/9/2022)

- Η λειτουργία του πλ.πιάτων δεν υπόκειται σε load shifting, αν και δεν πραγματοποιείται σε ώρα του οικονομικότερου block, καθώς οι προηγούμενες και οι επόμενες 6 ώρες από την ώρα καταγεγραμμένης λειτουργίας (περιορισμός load shifting πλυντηρίων έως 6 ώρες πριν ή μετά) έχουν μεγαλύτερη (580,44 €/MWh) ή ίση (483,70 €/MWh) τιμή.

Πλυντήριο πιάτων								
Ωρα	16:00 – 17:00 (διαθέσιμη για load shifting)	17:00 – 18:00 (διαθέσιμη για load shifting)	18:00 – 19:00 (διαθέσιμη για load shifting)	19:00 – 20:00 (διαθέσιμη για load shifting)	20:00 – 21:00 (διαθέσιμη για load shifting)	21:00 – 22:00 (διαθέσιμη για load shifting)	22:00 – 23:00 (λειτουργία)	23:00 – 24:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	483,70	483,70	483,70	483,70	483,70	483,70	483,70	580,44

- Η 1^η λειτουργία του πλ.ρούχων δε μεταφέρεται σε ώρα του οικονομικότερου block, καθώς οι προηγούμενες και οι επόμενες 6 ώρες από την ώρα καταγεγραμμένης λειτουργίας (περιορισμός load shifting πλυντηρίων έως 6 ώρες πριν ή μετά) ανήκουν σε ακριβότερα blocks

1 ^η λειτουργία πλυντηρίου ρούχων								
Ωρα	00:00 – 01:00 (διαθέσιμη για load shifting)	01:00 – 02:00 (λειτουργία)	02:00 – 03:00 (διαθέσιμη για load shifting)	03:00 – 04:00 (διαθέσιμη για load shifting)	04:00 – 05:00 (διαθέσιμη για load shifting)	05:00 – 06:00 (διαθέσιμη για load shifting)	06:00 – 07:00 (διαθέσιμη για load shifting)	07:00 – 08:00 (διαθέσιμη για load shifting)
Τιμή [€/MWh]	580,44	677,18	677,18	580,44	580,44	483,70	483,70	483,70

- Η 3^η λειτουργία του πλ. ρούχων δεν υπόκειται σε load shifting, καθώς η ώρα στην οποία πραγματοποιείται (12:00 – 13:00) ανήκει στο οικονομικότερο block της ταρίφας (290,22 €/MWh).

4.1.2 Εκπομπές CO₂

Καθότι κατά την κατασκευή της ταρίφας επιβάλλονται χαμηλότερες τιμές για τις ώρες της ημέρας που παρουσιάζουν μεγαλύτερη κάλυψη του φορτίου από ΑΠΕ και υδροηλεκτρική παραγωγή, οι κατανομές λειτουργίας που υποδεικνύει το μοντέλο οδηγούν, εκτός από το οικονομικό όφελος του καταναλωτή, σε οικολογικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια μέσω της μείωσης εκπομπών CO₂. Σημειώνεται ότι η μείωση των εκπομπών είναι επόμενο της μεθόδου κατασκευής της ταρίφας, αλλά το μοντέλο δεν επιδιώκει τη μεγιστοποίησή της.

1^ο Βήμα

Από την εφαρμογή *IPTO analytics* του ΑΔΜΗΕ προμηθευόμαστε τους συντελεστές εκπομπής για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από λιγνίτη και φυσικό αέριο.

Λιγνίτης : 1575,150 gr CO₂/ kWh

Φυσικό Αέριο : 386,860 gr CO₂/ kWh

2ο Βήμα

Από τα SCADA δεδομένα του entso-e (European Network of Transmission System Operators for Electricity) προμηθευόμαστε, για τις ημέρες μελέτης, την παραγωγή [kWh] ανά τύπο παραγωγής (λιγνίτης, φυσικό αέριο, υδροηλεκτρικά, ΑΠΕ).

**Τα SCADA δεδομένα από τον ΑΔΜΗΕ δεν περιλαμβάνουν στην παραγωγή των ΑΠΕ την παραγωγή των Φ/Β (αφαιρείται από το φορτίο του συστήματος)*

3^ο Βήμα

Μέσω του τύπου (4.1) υπολογίζουμε το συντελεστή εκπεμπόμενων γραμμαρίων CO₂ ανά kWh για κάθε ώρα, κάθε ημέρας του δεκαήμερου μελέτης.

$$\text{ΕΚΠΟΜΠΕΣ} \left[\frac{\text{grCO}_2}{\text{kWh}} \right] = \frac{\text{Lign} * 1575,150 + \Phi A * 386,860}{\text{Lign} + \Phi A + \text{RES} + \text{Hydro}} \quad (4.1)$$

Lign : Λιγνιτική Παραγωγή [kWh]

ΦΑ : Παραγωγή από Φυσικό Αέριο [kWh]

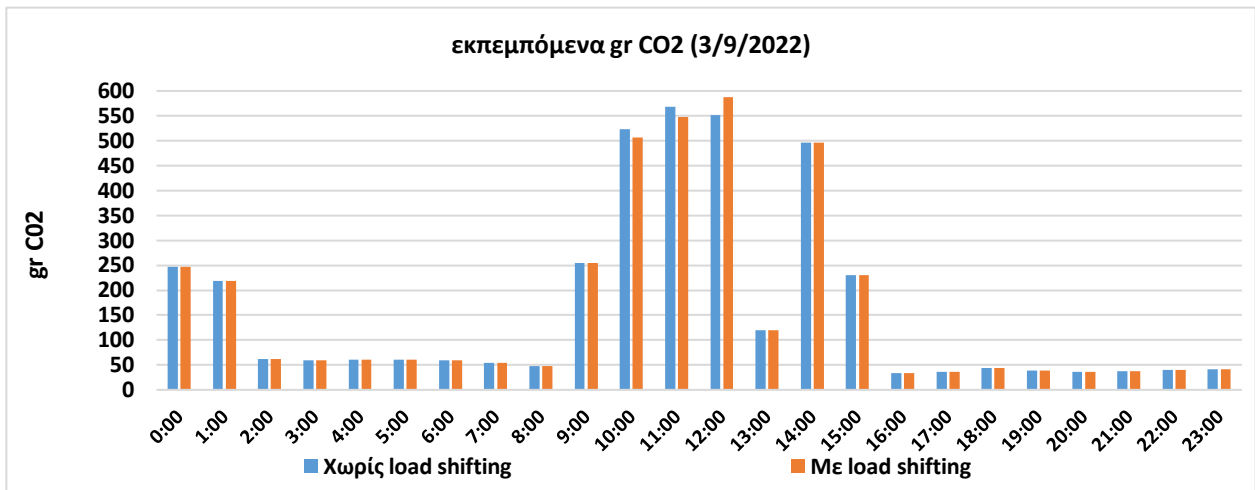
RES : Παραγωγή ΑΠΕ [kWh]

Hydro : Υδροηλεκτρική Παραγωγή [kWh]

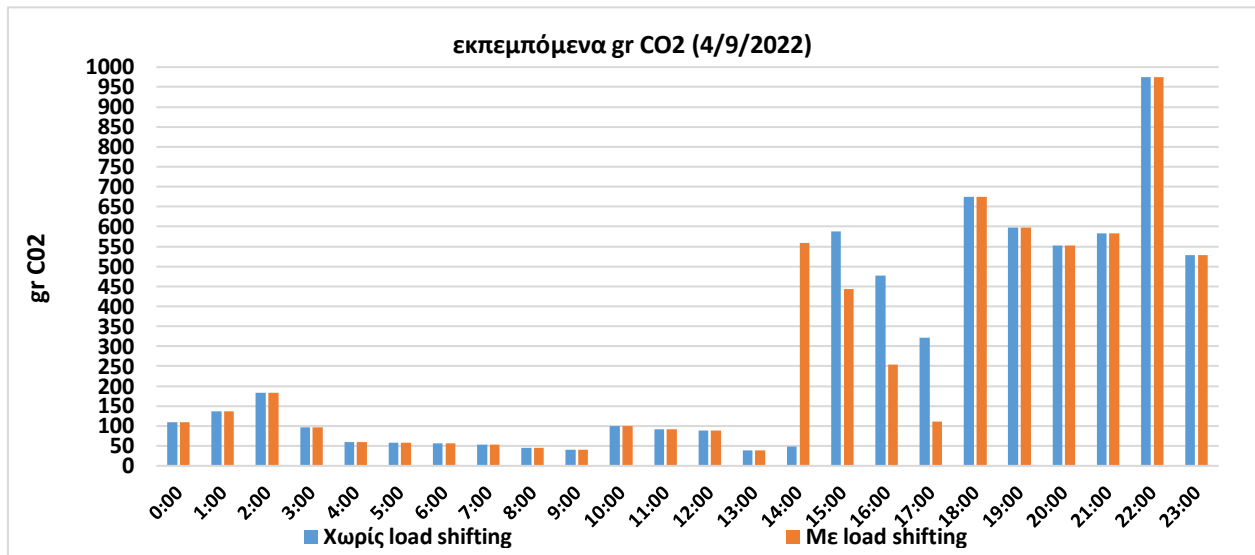
4^ο Βήμα

Για κάθε ώρα πολλαπλασιάζουμε τον αντίστοιχο συντελεστή με την κατανάλωση για την περίπτωση χωρίς load shifting (πριν την εφαρμογή του μοντέλου) και με load shifting (μετά την εφαρμογή του μοντέλου).

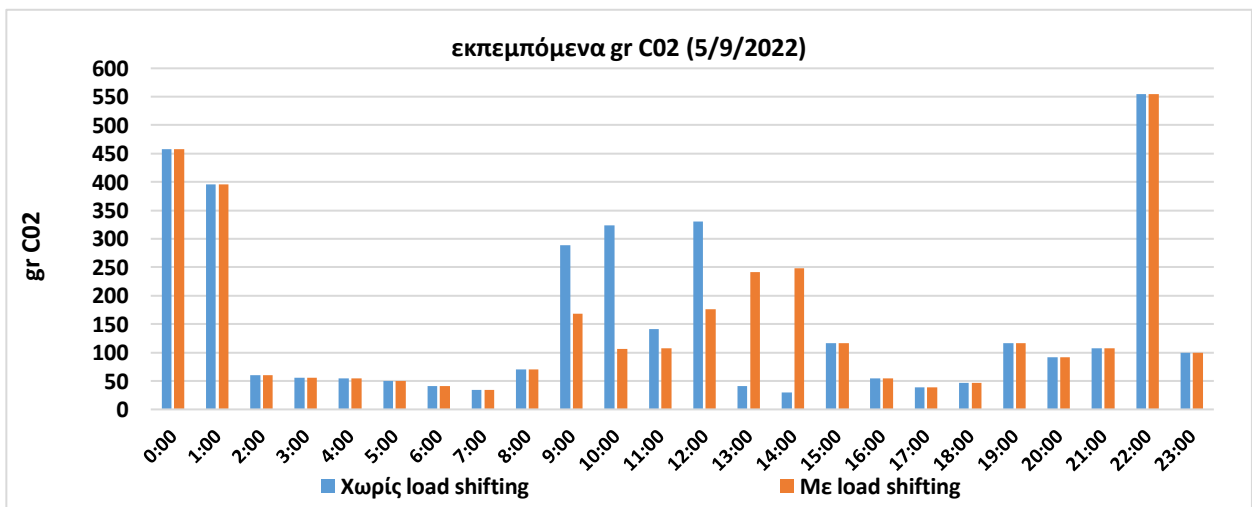
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα εκπομπών με και χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου [Διαγράμμα 4.11-4.20]. Στο τέλος των διαγραμμάτων παρατίθεται ο πίνακας των συντελεστών εκπομπής που προέκυψε από τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω [Πίνακας 4.12].



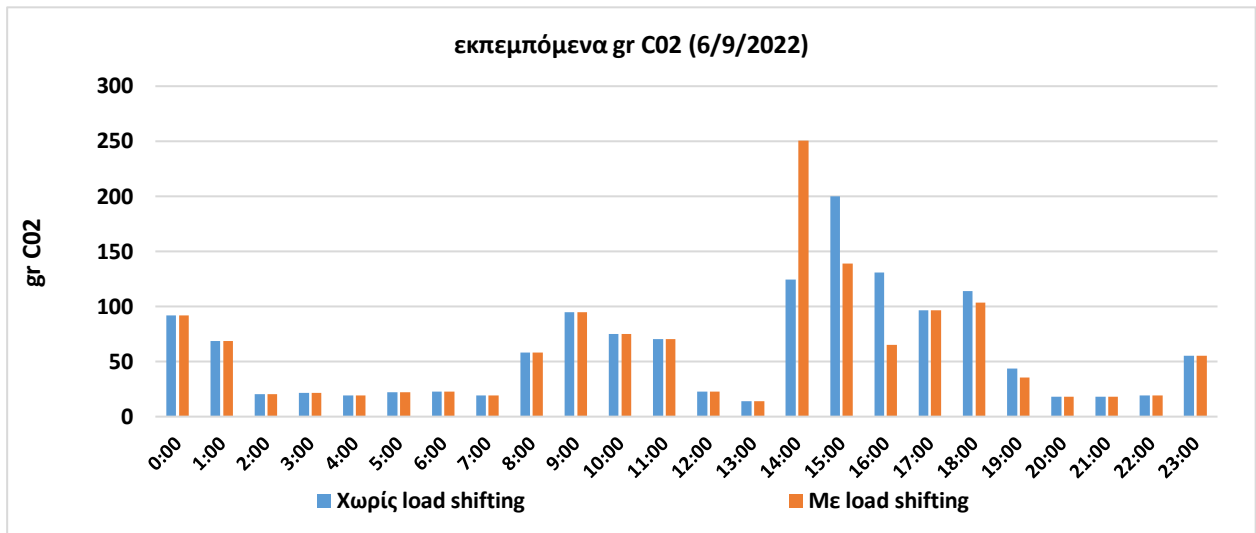
Διάγραμμα 4. 11 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (3/9/2022)



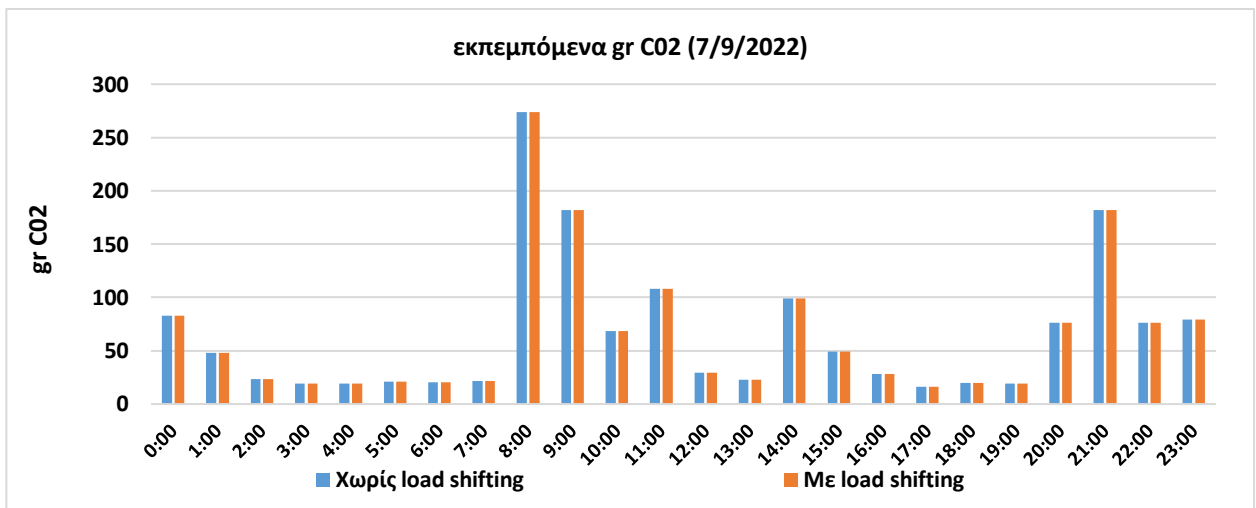
Διάγραμμα 4. 12 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (4/9/2022)



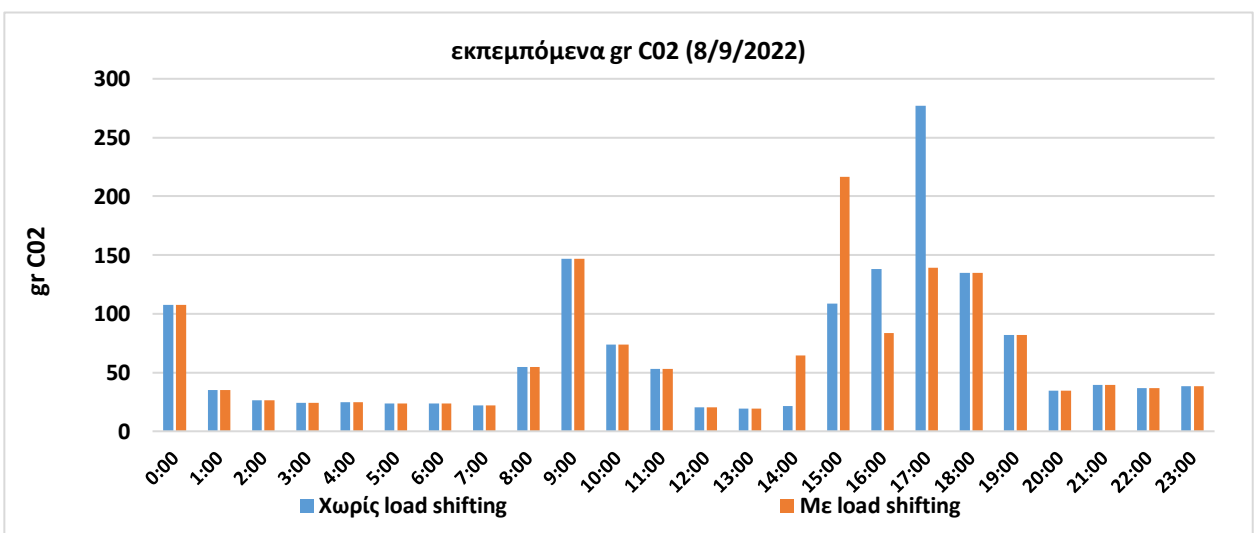
Διάγραμμα 4. 13 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (5/9/2022)



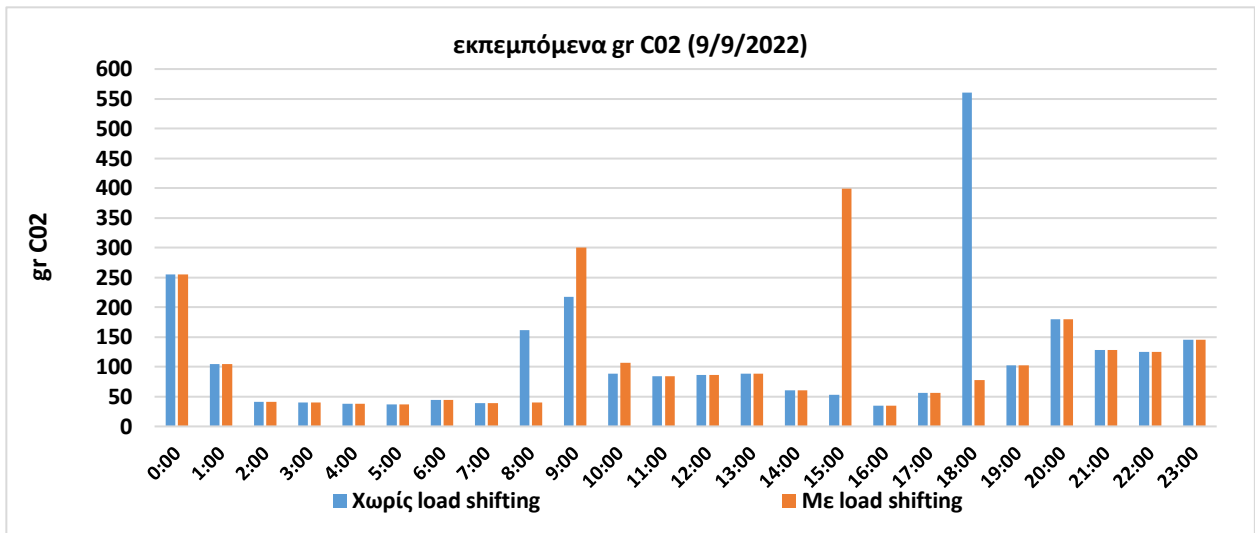
Διάγραμμα 4. 14 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (6/9/2022)



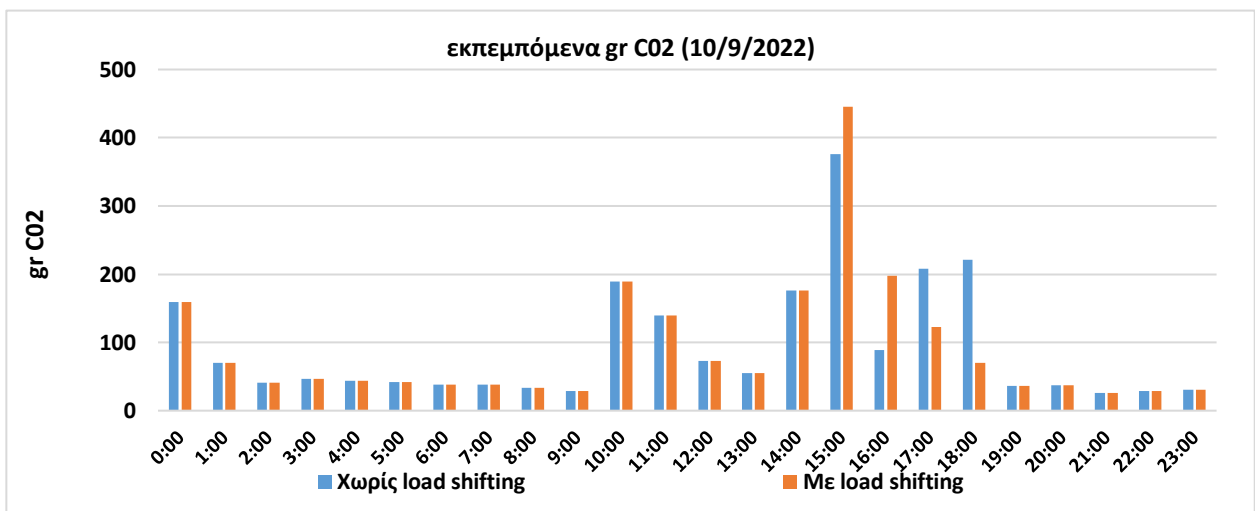
Διάγραμμα 4. 15 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (7/9/2022)



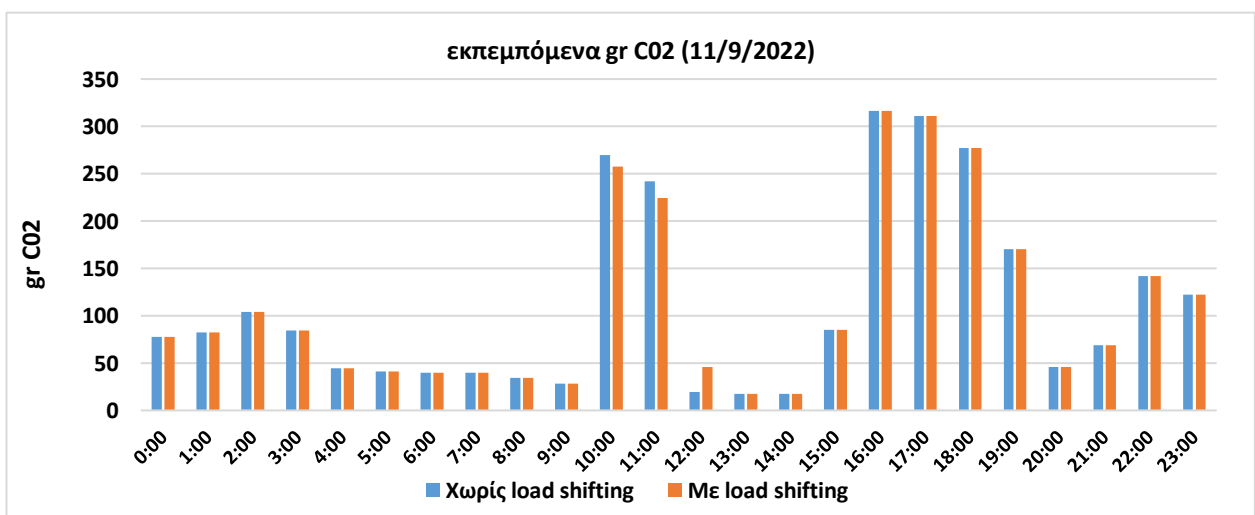
Διάγραμμα 4. 16 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (8/9/2022)



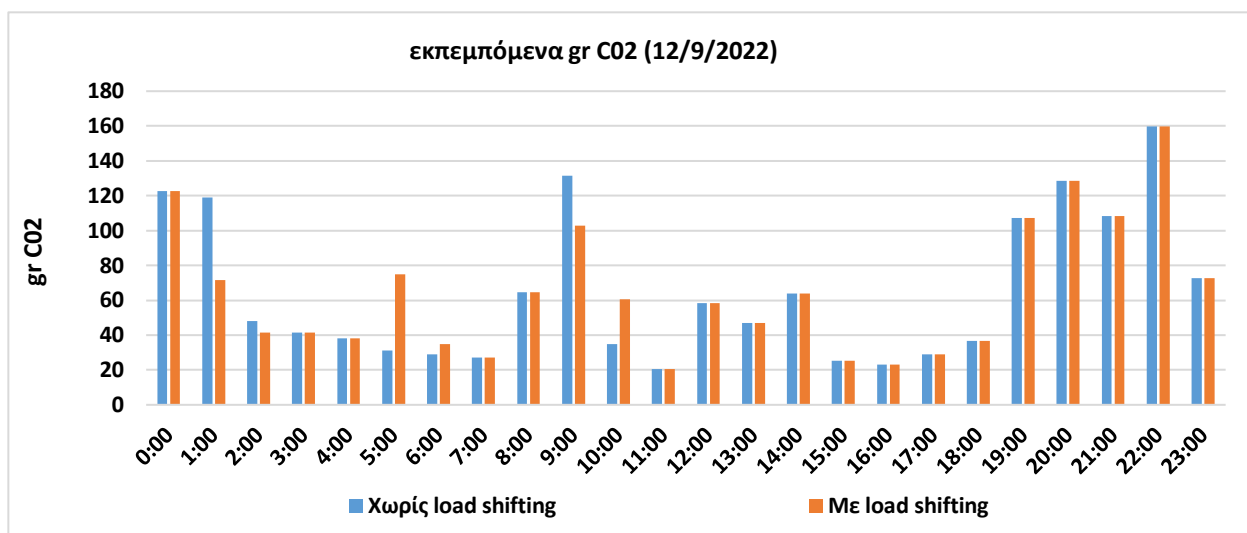
Διάγραμμα 4.17 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (9/9/2022)



Διάγραμμα 4.18 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (10/9/2022)



Διάγραμμα 4.19 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (11/9/2022)

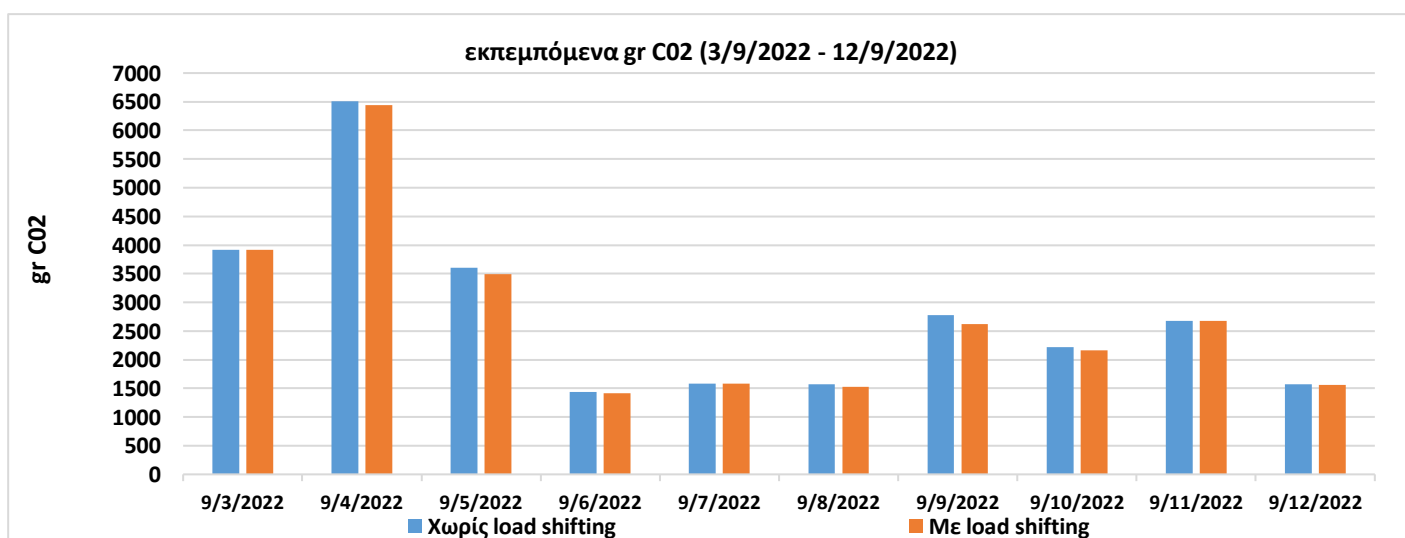


Διάγραμμα 4. 20 Εκπομπές CO2 με και χωρίς load shifting (12/9/2022)

Ο Πίνακας 4.11 παρουσιάζει τη συνολική εκπομπή gr CO₂ για κάθε ημέρα και για τις δύο περιπτώσεις καθώς και τη μείωση που παρατηρείται. Το Διάγραμμα 4.21 παρουσιάζει σχηματικά τα αποτελέσματα.

Ημερομηνία	εκπεμπόμενα gr CO ₂ (χωρίς load shifting)	εκπεμπόμενα gr CO ₂ (με load shifting)	Μείωση (%)
3/9/2022	3920	3918	0,06
4/9/2022	6503	6438	0,99
5/9/2022	3602	3496	2,96
6/9/2022	1440	1421	1,36
7/9/2022	1586	1586	0
8/9/2022	1567	1526	2,63
9/9/2022	2774	2618	5,65
10/9/2022	2224	2167	2,60
11/9/2022	2682	2679	0,12
12/9/2022	1569	1561	0,49

Πίνακας 4. 11 Εκπομπές CO2 ανά ημέρα με και χωρίς load shifting



Διάγραμμα 4. 21 Συνολικές εκπομπές gr CO2 ανά ημέρα με και χωρίς load shifting

gr CO ₂ / kWh										
	3/9/2022	4/9/2022	5/9/2022	6/9/2022	7/9/2022	8/9/2022	9/9/2022	10/9/2022	11/9/2022	12/9/2022
00:00	635.17	607.34	571.20	358.98	282.78	325.27	514.16	513.73	435.97	398.73
01:00	680.17	625.61	597.17	318.97	270.21	325.94	546.97	443.68	472.80	402.24
02:00	670.55	662.91	608.20	290.58	262.24	319.82	590.79	453.36	481.93	421.69
03:00	677.72	679.14	625.35	301.31	271.97	332.53	592.78	531.82	491.31	435.05
04:00	687.12	690.10	597.28	294.29	264.41	323.12	592.29	521.13	483.90	423.51
05:00	685.58	696.46	569.15	289.03	271.54	319.24	580.62	484.44	464.86	370.66
06:00	672.95	669.81	539.43	305.05	271.88	321.98	572.04	484.35	464.33	354.25
07:00	626.01	647.38	436.15	292.91	253.25	306.47	534.39	472.76	443.92	330.59
08:00	557.21	576.79	395.91	277.22	234.07	283.04	467.55	405.22	393.09	306.35
09:00	488.97	482.39	375.39	253.17	211.35	253.75	395.53	345.91	322.24	270.05
10:00	452.05	415.55	319.23	226.60	191.89	224.36	356.47	306.28	272.88	242.55
11:00	428.46	353.79	296.25	199.67	172.06	198.78	340.39	282.24	243.46	231.65
12:00	410.32	367.70	265.47	161.23	162.23	193.87	329.06	265.52	227.92	237.16
13:00	398.49	365.42	252.19	156.14	155.58	203.24	323.29	257.46	211.50	242.98
14:00	402.34	371.03	242.71	157.86	157.33	231.77	329.56	255.01	213.34	248.45
15:00	429.33	382.63	256.13	164.13	163.56	263.26	347.33	260.33	226.47	257.38
16:00	454.36	418.20	259.58	186.27	189.09	292.85	368.23	289.18	256.05	270.87
17:00	485.19	445.52	278.97	210.76	215.09	336.36	403.29	318.75	312.98	291.84
18:00	569.22	519.29	343.00	253.82	264.57	414.61	483.62	401.64	397.33	357.72
19:00	520.41	475.56	332.31	252.49	259.07	387.64	448.93	353.82	352.96	343.28
20:00	486.39	467.70	319.83	250.59	260.74	375.65	427.86	347.32	328.52	326.36
21:00	505.49	484.90	321.65	249.28	267.86	413.65	436.71	347.78	321.34	336.26
22:00	533.08	504.98	333.20	260.99	287.45	438.50	452.91	373.36	344.84	354.99
23:00	566.18	532.92	347.14	271.58	306.51	461.93	475.99	394.63	374.39	398.34

Πίνακας 4.12 Πίνακας συντελεστών εκπομπής grCO₂/kWh για το δεκαήμερο μελέτης

Από τα διαγράμματα εκπομπών παρατηρείται ότι οι ώρες που δεν εμπλέκονται στη διαδικασία του load shifting δεν παρουσιάζουν μεταβολή στις εκπομπές. Όπως είναι λογικό, οι ώρες από τις οποίες μεταφέρεται η κατανάλωση των ευέλικτων φορτίων παρουσιάζουν μειωμένες εκπομπές και οι ώρες στις οποίες μεταφέρεται η κατανάλωσή τους παρουσιάζουν αυξημένες εκπομπές. Καθότι οι ώρες στις οποίες μεταφέρεται η κατανάλωση των ευέλικτων φορτίων έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου παρουσιάζουν μεγαλύτερη κάλυψη από ανανεώσιμες πηγές και υδροηλεκτρική παραγωγή, ο αντίστοιχος συντελεστής εκπομπών είναι μικρότερος σε σχέση με τις ώρες στις οποίες λειτουργούσαν πριν την εφαρμογή του μοντέλου, οπότε συνολικά για την κάθε ημέρα οι εκπομπές είναι μειωμένες (εξάίρεση η 7/9/2022 όπου η κατανομή λειτουργίας ήταν ήδη η οικονομικότερη δυνατή άρα δεν πραγματοποιήθηκε load shifting και κατ' επέκταση διαφοροποίηση στις εκπομπές).

4.2 Στοχαστικό μοντέλο

4.2.1 Εξοικονόμηση

Οι επόμενοι πίνακες [Πίνακας 4.13 – 4.22] παρουσιάζουν την εξοικονόμηση που προκύπτει κατά την εκτέλεση του στοχαστικού μοντέλου για τον καταναλωτή όταν τα φορτία λειτουργούν στις ώρες οι οποίες υποδεικνύονται από το μοντέλο, σε σχέση με τις ώρες που λειτουργούν στα δεδομένα, για τις διάφορες καταναλώσεις του δεκαήμερου μελέτης. Μελετούνται δηλαδή οι 10

διαφορετικές καταναλωτικές συμπεριφορές και συγκρίνεται η περίπτωση όπου ακολουθείται η κατανομή λειτουργίας των ευέλικτων συσκευών που υποδεικνύει το στοχαστικό μοντέλο και η περίπτωση που η κατανομή λειτουργίας είναι αυτή που υπάρχει στα δεδομένα.

3/9/2022			
Πλ. ρούχων	Q _{1,1} = 0,0377 kWh Q _{1,2} = 0,0892 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
Πλ. πιάτων	Q _{1,1} = 0.2467 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
			12:00 - 13:00
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.3995	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.3951	
Κέρδος [€] , [%]		0.0044	0.18 %

Πίνακας 4. 13 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 3/9/2022

4/9/2022			
1 ^η Λειτουργία Φούρνος κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 1.3764 kWh Q _{1,2} = 1.0009 kWh Q _{1,3} = 0.4692 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
2 ^η Λειτουργία Φούρνος κ.τ.λ.	Q _{2,1} = 0.7646 kWh Q _{2,2} = 0.1021 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
			22:00 – 23:00 22:00 – 23:00
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		3.5222	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		3.4176	
Κέρδος [€] , [%]		0.1046	2.97 %

Πίνακας 4. 14 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 4/9/2022

5/9/2022			
1 ^η λειτουργία φούρνος κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 0.3129 kWh Q _{1,2} = 0.0983 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
2 ^η λειτουργία φούρνος κ.τ.λ.	Q _{2,1} = 0.0319 kWh Q _{2,2} = 1.2676 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
			21:00 – 22:00 22:00 – 23:00
πλ. ρούχων	Q _{1,1} = 0.0007 kWh Q _{1,2} = 0.1143 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
			10:00 – 11:00 11:00 – 12:00

1 ^η λειτουργία Πλ. πιάτων	Q _{1,1} = 0.3228 kWh Q _{1,2} = 0.0679 kWh	9:00 – 10:00 10:00 – 11:00	Δεδομένα		Στοχαστικό Μοντέλο	
					Σενάριο ΑΠΕ 1	10:00 -11:00 11:00 – 12:00
					Σενάριο ΑΠΕ 2	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 3	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 4	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 5	10:00 -11:00 11:00 – 12:00
					Σενάριο ΑΠΕ 6	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 7	10:00 -11:00 11:00 – 12:00
					Σενάριο ΑΠΕ 8	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 9	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 10	11:00 - 12:00 12:00 – 13:00
					Για κάθε σενάριο MCP και ανελαστικής κατανάλωσης	
2 ^η λειτουργία Πλ. πιάτων	Q _{2,1} = 0.9014 kWh	12:00 – 13:00	Δεδομένα		Στοχαστικό Μοντέλο	
					Σενάριο ΑΠΕ 1	12:00 - 13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 2	13:00 - 14:00
					Σενάριο ΑΠΕ 3	13:00 - 14:00
					Σενάριο ΑΠΕ 4	13:00 - 14:00
					Σενάριο ΑΠΕ 5	12:00 -13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 6	13:00 - 14:00
					Σενάριο ΑΠΕ 7	12:00 -13:00
					Σενάριο ΑΠΕ 8	13:00 - 14:00
					Σενάριο ΑΠΕ 9	13:00 - 14:00
					Σενάριο ΑΠΕ 10	13:00 - 14:00
					Για κάθε σενάριο MCP και ανελαστικής κατανάλωσης	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		3.3950				
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		3.3285				
Κέρδος [€] , [%]		0.0665		1.96 %		

Πίνακας 4. 15 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 5/9/2022

6/9/2022					
πλ. ρούχων	Q _{1,1} = 0.0417 kWh Q _{1,2} = 0.0343 kWh	Δεδομένα		Στοχαστικό Μοντέλο	
		18:00 – 19:00 19:00 – 20:00		14:00 – 15:00 15:00 – 16:00	
φούρνος κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 0.6752 kWh Q _{1,2} = 0.2090 kWh	Δεδομένα		Στοχαστικό Μοντέλο	
		14:00 – 15:00 15:00 – 16:00		14:00 – 15:00 15:00 – 16:00	
		Δεδομένα		Στοχαστικό Μοντέλο	
				Σενάριο ΑΠΕ 1	14:00 -15:00 15:00 – 16:00
				Σενάριο ΑΠΕ 2	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
				Σενάριο ΑΠΕ 3	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00

Πλ. πιάτων	Q _{1,1} = 0.7570 kWh Q _{1,2} = 0.3527 kWh	15:00 – 16:00 16:00 – 17:00	Σενάριο ΑΠΕ 4	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 5	14:00 -15:00 15:00 – 16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 6	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 7	14:00 -15:00 15:00 – 16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 8	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 9	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 10	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.8482		
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.8180		
Κέρδος [€] , [%]		0.0302	1,06 %	

Πίνακας 4. 16 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 6/9/2022

7/9/2022			
		Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
1 ^η Λειτουργία Φούρνος κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 0.4408 kWh Q _{1,2} = 0.0386 kWh	14:00 – 15:00 15:00 – 16:00	14:00 – 15:00 15:00 – 16:00
2 ^η Λειτουργία Φούρνος κ.τ.λ.		Q _{2,1} = 0.4158 kWh	21:00 – 22:00
Πλ. ρούχων	Q _{1,1} = 0.5050 kWh	11:00 – 12:00	11:00 – 12:00
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.7409	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.7271	
Κέρδος [€] , [%]		0.0138	0.50 %

Πίνακας 4. 17 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 7/9/2022

8/9/2022			
		Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
φούρνος κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 0.2285 kWh	15:00 – 16:00	15:00 – 16:00
Πλ. πιάτων		Q _{1,1} = 0.1857 kWh Q _{1,2} = 0.4096 kWh	16:00 – 17:00 17:00 – 18:00

			15:00 – 16:00
		Σενάριο ΑΠΕ 6	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
		Σενάριο ΑΠΕ 7	14:00 -15:00 15:00 – 16:00
		Σενάριο ΑΠΕ 8	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
		Σενάριο ΑΠΕ 9	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
		Σενάριο ΑΠΕ 10	15:00 - 16:00 16:00 – 17:00
		Για κάθε σενάριο MCP και ανελαστικής κατανάλωσης	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.5847	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.5074	
Κέρδος [€] , [%]		0.0773	2.99 %

Πίνακας 4. 18 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 8/9/2022

9/9/2022				
1 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 0.3091 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο	
		00:00 – 1:00	00:00 – 1:00	
2 ^η λειτουργία φούρνου κ.τ.λ.	Q _{2,1} = 0.2603 kWh Q _{2,2} = 0.0524 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο	
		8:00 – 9:00 9:00 – 10:00	9:00 – 10:00 10:00 – 11:00	
Πλ. πιάτων	Q _{1,1} = 0.9978 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο	
		18:00 – 19:00	Σενάριο ΑΠΕ 1	15:00 – 16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 2	16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 3	16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 4	16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 5	15:00 – 16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 6	16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 7	15:00 – 16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 8	16:00 – 17:00
			Σενάριο ΑΠΕ 9	16:00 – 17:00
Σενάριο ΑΠΕ 10	16:00 – 17:00			
		Για κάθε σενάριο MCP και ανελαστικής κατανάλωσης		
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.9852		
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.8168		
Κέρδος [€] , [%]		0.1684	5.64 %	

Πίνακας 4. 19 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 9/9/2022

10/9/2022			
Φούρνος κ.τ.λ.	Q _{1,1} = 0.4571 kWh Q _{1,2} = 0.1109 kWh	Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
		14:00 – 15:00 15:00 – 16:00	14:00 -15:00 15:00 – 16:00

		Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
Πλ. ρούχων	Q _{1,1} = 0.2671 kWh Q _{1,2} = 0.3758 kWh	17:00 – 18:00 18:00 – 19:00	14:00 -15:00 15:00 – 16:00
Πλ. πιάτων	Q _{1,1} = 1.0890 kWh	15:00 – 16:00	15:00 – 16:00 <i>για όλα τα σενάρια τιμών και ανελαστικής κατανάλωσης</i>
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.9822	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.8754	
Κέρδος [€] , [%]		0.1068	3.58 %

Πίνακας 4. 20 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 10/9/2022

11/9/2022			
		Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο
Πλ. ρούχων	Q _{1,1} = 0.0434 kWh Q _{1,2} = 0.1170 kWh	10:00 – 11:00 11:00 – 12:00	11:00 – 12:00 12:00 – 13:00
Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]		2.3470	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]		2.3419	
Κέρδος [€] , [%]		0.0051	0.22 %

Πίνακας 4. 21 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 11/9/2022

12/9/2022				
		Δεδομένα	Στοχαστικό Μοντέλο	
1 ^η λειτουργία	Q _{1,1} = 0.1182 kWh Q _{1,2} = 0.0162 kWh	1:00 – 2:00	7:00 -8:00	
Πλ. ρούχων		2:00 – 3:00	8:00 -9:00	
2 ^η λειτουργία	Q _{2,1} = 0.1059 kWh			
Πλ. ρούχων		9:00 – 10:00	11:00 – 12:00	
3 ^η λειτουργία	Q _{3,1} = 0.0727 kWh			
Πλ. ρούχων		12:00 – 13:00	12:00 – 13:00	
Πλ. πιάτων	Q _{1,1} = 0.2710 kWh	22:00 – 23:00	Σενάριο ΑΠΕ 1	22:00
			Σενάριο ΑΠΕ 2	16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 3	16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 4	16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 5	23:00
			Σενάριο ΑΠΕ 6	16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 7	22:00
			Σενάριο ΑΠΕ 8	16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 9	16:00
			Σενάριο ΑΠΕ 10	16:00
			Για κάθε σενάριο MCP και ανελαστικής κατανάλωσης	

Κόστος με λειτουργία στις ώρες των δεδομένων[€]	2.5512	
Κόστος με λειτουργία στις ώρες που υποδεικνύει το μοντέλο [€]	2.4834	
Κέρδος [€] , [%]	0.0678	2.66 %

Πίνακας 4. 22 Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου για καταναλώσεις φορτίων στις 12/9/2022

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Morell Dameto, N., Chaves-Ávila, J. P., & Gómez San Román, T. (2020). Revisiting electricity network tariffs in a context of decarbonization, digitalization, and decentralization. *Energies*, 13(12), 3111. <https://doi.org/10.3390/en13123111>
- [2] Litos Strategic Communication. (n.d) . Retrieved March 26, 2023, from <https://www.litoss.com/the-smart-grid-an-introduction>
- [3] Paterakis, N. G., Erdinç, O., & Catalão, J. P. S. (2017). An overview of demand response: Key elements and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 871–891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.167>
- [4] Environmental Protection Agency. (n.d.). EPA. Retrieved March 26, 2023, from <https://www.epa.gov/energy/electricity-customers>
- [5] Albadi, M. H., & El-Saadany, E. F. (2008). A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1989–1996. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002>
- [6] Cato. (n.d.). Retrieved March 26, 2023, from <https://www.cato.org/regulation/fall-2017/moving-forward-electricity-tariff-reform>
- [7] O'Connell, N., Pinson, P., Madsen, H., & O'Malley, M. (2014). Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 686–699. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.098>
- [8] Eto, J. H., Nelson-Hoffman, J., Torres, C., Hirth, S., Yinger, B., Kueck, J., Kirby, B., Bernier, C., Wright, R., Barat, A., & Watson, D. S. (2007). Demand response spinning reserve demonstration. <https://doi.org/10.2172/925589>
- [9] Managing variability final July 2009 - assets.wwf.org.uk. (n.d.). Retrieved May 1, 2023, from http://assets.wwf.org.uk/downloads/managing__variability_report.pdf
- [10] Hao, H., Middelkoop, T., Barooah, P., & Meyn, S. (2012). How demand response from commercial buildings will provide the regulation needs of the grid. 2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). <https://doi.org/10.1109/allerton.2012.6483455>
- [11] Mathieu, J. L., Gadgil, A. J., Callaway, D. S., Price, P. N., & Kiliccote, S. (2010). Characterizing the response of commercial and industrial facilities to dynamic pricing signals from the utility. *ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability*, Volume 1. <https://doi.org/10.1115/es2010-90266>
- [12] Goel, L., Qiuwei Wu, & Peng Wang. (2006). Reliability enhancement of a deregulated power system considering demand response. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1708965>
- [13] Mohagheghi, S., Yang, F., & Falahati, B. (2011). Impact of demand response on distribution system reliability. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. <https://doi.org/10.1109/pes.2011.6039365>
- [14] US Department of Energy. (2006). Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for achieving them: A Report to the United States Congress pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/report-lbnl-1252d.pdf>
- [15] Corradi, O., Ochsenfeld, H., Madsen, H., & Pinson, P. (2013). Controlling electricity consumption by forecasting its response to varying prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1), 421–429. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2197027>
- [16] Allcott, H. (2011). Rethinking real-time electricity pricing. *Resource and Energy Economics*, 33(4), 820–842. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2011.06.003>
- [17] Demand side flexibility for power sector transformation. (2019, December 1). Retrieved March 29, 2023, from <https://prod-cd.irena.org/Publications/2019/Dec/Demand-side-flexibility-for-power-sector-transformation>

- [18] Iea. (n.d.). The clean energy transition requires action on electricity demand – analysis. IEA. Retrieved March 28, 2023, from <https://www.iea.org/commentaries/the-clean-energy-transition-requires-action-on-electricity-demand>
- [19] Faruqui, A., Sergici, S., & Warner, C. (2017). Arcturus 2.0 : A meta-analysis of time-varying rates for electricity. *The Electricity Journal*, 30(10), 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.003>
- [20] Service – GOV.UK. (n.d.) .Retrieved March 26, 2023, from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48552/5756-demand-side-response-in-the-domestic-sector-a-lit.pdf
- [21] Bazydło, G., & Wermiński, S. (2018). Demand side management through Home Area Network Systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 97, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.026>
- [22] Costanzo, G. T., Zhu, G., Anjos, M. F., & Savard, G. (2012). A system architecture for autonomous demand side load management in Smart Buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 2157–2165. <https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2217358>
- [23] Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential demand side management model, optimization and future perspective: A Review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.300>
- [24] Althaher, S., Mancarella, P., & Mutale, J. (2015). Automated demand response from Home Energy Management System under dynamic pricing and power and comfort constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1874–1883. <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2388357>
- [25] Faruqui, A., & Sergici, S. (2010). Household response to dynamic pricing of electricity - A survey of the empirical evidence. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1134132>
- [26] Beaudin, M., & Zareipour, H. (2015). Home Energy Management Systems: A review of modelling and complexity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 318–335. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.046>
- [27] Siano, P. (2014). Demand response and smart grids—a survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 461–478. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022>
- [28] Kärkkäinen, S., & Oy, E. (2012). Task XVII: Integration of demand side management, distributed generation, renewable energy sources and energy storages – Subtask 5, Report No. 5: Smart metering. http://www.ieadsm.org/wp/files/Exco%20File%20Library/Key%20Publications/SmartMetering_final.
- [29] Rashed Mohassel, R., Fung, A., Mohammadi, F., & Raahemifar, K. (2014). A survey on advanced metering infrastructure. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.025>
- [30] Zafar, U., Bayhan, S., & Sanfilippo, A. (2020). Home Energy Management System Concepts, configurations, and technologies for the smart grid. *IEEE Access*, 8, 119271–119286. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3005244>
- [31] Iea. (n.d.). Demand response – analysis. IEA. Retrieved March 25, 2023, from <https://www.iea.org/reports/demand-response>
- [32] Iea. (n.d.). Innovation needs in the Sustainable Development Scenario – Clean Energy Innovation – analysis. IEA. Retrieved March 25, 2023, from <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation/innovation-needs-in-the-sustainable-development-scenario>
- [33] Golshannavaz, S. (2018). Cooperation of electric vehicle and Energy Storage in reactive power compensation: An Optimal Home Energy Management System considering PV presence. *Sustainable Cities and Society*, 39, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.018>
- [34] Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M., & Rahman, S. (2012). An algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 2166–2173. <https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2201182>

- [35] Chen, Z., Wu, L., & Fu, Y. (2012). Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1822–1831. <https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2212729>
- [36] Li, X. H., & Hong, S. H. (2014). User-expected price-based demand response algorithm for a home-to-grid system. *Energy*, 64, 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.049>
- [37] Zhao, J., Kucuksari, S., Mazhari, E., & Son, Y.-J. (2013). Integrated analysis of high-penetration PV and PHEV with energy storage and demand response. *Applied Energy*, 112, 35–51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.070>
- [38] Rastegar, M., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2014). Optimal charge scheduling of PHEV in a multi-carrier Energy Home. 2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering. <https://doi.org/10.1109/eeeic.2014.6835863>
- [39] Erdinc, O., Paterakis, N. G., Mendes, T. D., Bakirtzis, A. G., & P. S. Catalao, J. (2015). Smart Household Operation Considering bi-directional EV and ESS utilization by real-time pricing-based dr. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(3), 1281–1291. <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2352650>
- [40] Paterakis, N. G., Erdinc, O., Bakirtzis, A. G., & Catalao, J. P. (2015). Optimal household appliances scheduling under day-ahead pricing and load-shaping demand response strategies. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(6), 1509–1519. <https://doi.org/10.1109/tii.2015.2438534>
- [41] Kurucz, C. N., Brandt, D., & Sim, S. (1996). A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(4), 1817–1824. <https://doi.org/10.1109/59.544648>
- [42] Mazidi, M., Zakariazadeh, A., Jadid, S., & Siano, P. (2014). Integrated scheduling of Renewable Generation and demand response programs in a microgrid. *Energy Conversion and Management*, 86, 1118–1127. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.078>
- [43] Ng, K.-H., & Sheble, G. B. (1998). Direct load control—a profit-based load management using linear programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(2), 688–694. <https://doi.org/10.1109/59.667401>
- [44] Parvania, M., Fotuhi-Firuzabad, M., & Shahidehpour, M. (2013). Optimal demand response aggregation in wholesale electricity markets. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(4), 1957–1965. <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2257894>
- [45] Henriquez, R., Wenzel, G., Olivares, D. E., & Negrete-Pincetic, M. (2018). Participation of demand response aggregators in electricity markets: Optimal Portfolio Management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 4861–4871. <https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2673783>
- [46] Aghaei, J., & Alizadeh, M.-I. (2013). Multi-objective self-scheduling of CHP (combined heat and power)-based microgrids considering demand response programs and esss (Energy Storage Systems). *Energy*, 55, 1044–1054. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.048>
- [47] Alipour, M., Zare, K., & Abapour, M. (2018). MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(1), 79–88. <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2730440>
- [48] Helal, S. A., Najee, R. J., Hanna, M. O., Shaaban, M. F., Osman, A. H., & Hassan, M. S. (2017). An energy management system for hybrid microgrids in remote communities. 2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). <https://doi.org/10.1109/ccece.2017.7946775>
- [49] Wen-Chen Chu, Bin-Kwie Chen, & Chun-Kuei Fu. (1993). Scheduling of direct load control to minimize load reduction for a utility suffering from generation shortage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(4), 1525–1530. <https://doi.org/10.1109/59.260955>
- [50] Cohen, A. I., & Wang, C. C. (1988). An optimization method for load management scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2), 612–618. <https://doi.org/10.1109/59.192913>
- [51] Yuan-Yih Hsu, & Chung-Ching Su. (1991). Dispatch of direct load control using dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3), 1056–1061. <https://doi.org/10.1109/59.119246>

- [52] Trovato, V., Teng, F., & Strbac, G. (2018). Role and benefits of flexible thermostatically controlled loads in future low-carbon systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 5067–5079. <https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2679133>
- [53] Samadi, P., Mohsenian-Rad, H., Wong, V. W., & Schober, R. (2014). Real-time pricing for demand response based on stochastic approximation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 789–798. <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2293131>
- [54] Sun, S., Dong, M., & Liang, B. (2016). Distributed real-time power balancing in renewable-integrated power grids with storage and flexible loads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5), 2337–2349. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2445794>
- [55] Khaloie, H., Anvari-Moghaddam, A., Hatziargyriou, N., & Contreras, J. (2021). Risk-constrained self-scheduling of a hybrid power plant considering interval-based intraday demand response exchange market prices. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125344>
- [56] Vahedipour-Dahraie, M., Rashidzadeh-Kermani, H., Anvari-Moghaddam, A., Siano, P., & Catalão, J. P. S. (2022). Short-term reliability and economic evaluation of resilient microgrids under incentive-based demand response programs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 138, 107918. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107918>
- [57] Vahedipour-Dahraie, M., Rashidzadeh-Kermani, H., Najafi, H. R., Anvari-Moghaddam, A., & Guerrero, J. M. (2017). Stochastic security and risk-constrained scheduling for an autonomous microgrid with demand response and renewable energy resources. *IET Renewable Power Generation*, 11(14), 1812–1821. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0168>
- [58] Majidi, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Anvari-Moghaddam, A. (2019). Optimal robust operation of combined heat and power systems with demand response programs. *Applied Thermal Engineering*, 149, 1359–1369. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.088>
- [59] Meng, F.-L., & Zeng, X.-J. (2016). A profit maximization approach to demand response management with customers behavior learning in Smart Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1516–1529. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2462083>
- [60] Pedrasa, M., Spooner, T. D., & MacGill, I. F. (2009). Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1173–1181. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2021219>
- [61] Faria, P., Soares, J., Vale, Z., Morais, H., & Sousa, T. (2014). Modified particle swarm optimization applied to integrated demand response and DG Resources Scheduling. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition. <https://doi.org/10.1109/tdc.2014.6863207>
- [62] Carrasqueira, P., Alves, M. J., & Antunes, C. H. (2017). Bi-level particle swarm optimization and evolutionary algorithm approaches for residential demand response with different user profiles. *Information Sciences*, 418–419, 405–420. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.08.019>
- [63] Hu, W., Chen, Z., Bak-Jensen, B., & Hu, Y. (2014). Fuzzy adaptive particle swarm optimisation for power loss minimisation in distribution systems using optimal load response. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0745>
- [64] Rahman, M. M., Arefi, A., Shafiullah, G. M., & Hettiwatte, S. (2018). A new approach to voltage management in unbalanced low voltage networks using demand response and OLTC considering consumer preference. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.034>
- [65] Qian, L. P., Zhang, Y. J., Huang, J., & Wu, Y. (2013). Demand response management via real-time electricity price control in smart grids. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(7), 1268–1280. <https://doi.org/10.1109/jsac.2013.130710>
- [66] Tiansong Cui, Goudarzi, H., Hatami, S., Nazarian, S., & Pedram, M. (2012). Concurrent optimization of Consumer's Electrical Energy Bill and producer's power generation cost under a dynamic pricing model. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). <https://doi.org/10.1109/isgt.2012.6175810>

- [67] Bharathi, C., Rekha, D., & Vijayakumar, V. (2017). Genetic algorithm based demand side management for smart grid. *Wireless Personal Communications*, 93(2), 481–502. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-3959-z>
- [68] Jayadev, V., & Swarup, K. S. (2013). Optimization of microgrid with demand side management using genetic algorithm. *IET Conference on Power in Unity: a Whole System Approach*. <https://doi.org/10.1049/ic.2013.0124>
- [69] Hazra, J., Das, K., & Seetharam, D. P. (2012). Smart Grid congestion management through demand response. *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. <https://doi.org/10.1109/smartgridcomm.2012.6485968>
- [70] Liu, B., Kang, J., Jiang, N., & Jing, Y. (2011). Cost control of the transmission congestion management in electricity systems based on Ant Colony algorithm. *Energy and Power Engineering*, 03(01), 17–23. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.31003>
- [71] Zhang, J., Wu, Y., Guo, Y., Wang, B., Wang, H., & Liu, H. (2016). A hybrid harmony search algorithm with differential evolution for day-ahead scheduling problem of a microgrid with consideration of power flow constraints. *Applied Energy*, 183, 791–804. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.035>
- [72] Kim, B.-G., Ren, S., van der Schaar, M., & Lee, J.-W. (2013). Bidirectional energy trading for residential load scheduling and electric vehicles. *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. <https://doi.org/10.1109/infcom.2013.6566842>
- [73] Sheikhi, A., Rayati, M., Bahrami, S., & Mohammad Ranjbar, A. (2015). Integrated demand side management game in Smart Energy Hubs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 675–683. <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2377020>
- [74] Aghaei, J., & Alizadeh, M.-I. (2013). Multi-objective self-scheduling of CHP (combined heat and power)-based microgrids considering demand response programs and esss (Energy Storage Systems). *Energy*, 55, 1044–1054. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.048>
- [75] Martins, A. G., Coelho, D., Antunes, H., & Climaco, J. (1996). A multiple objective linear programming approach to power generation planning with demand-side management (DSM). *International Transactions in Operational Research*, 3(3-4), 305–317. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1996.tb00055.x>
- [76] Monemi Bidgoli, M., Karimi, H., Jadid, S., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). Stochastic Electrical and thermal energy management of energy hubs integrated with demand response programs and renewable energy: A prioritized multi-objective framework. *Electric Power Systems Research*, 196, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107183>
- [77] Logenthiran, T., Srinivasan, D., & Shun, T. Z. (2012). Demand side management in smart grid using heuristic optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1244–1252. <https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2195686>
- [78] Shafie-Khah, M., & Siano, P. (2018). A Stochastic Home Energy Management System considering satisfaction cost and response fatigue. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(2), 629–638. <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2728803>
- [79] Li, T., & Dong, M. (2018). Real-time residential-side Joint Energy Storage Management and load scheduling with Renewable Integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 283–298. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2550500>
- [80] Guo, Y., Pan, M., Fang, Y., & Khargonekar, P. P. (2013). Decentralized coordination of energy utilization for residential households in the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1341–1350. <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2268581>
- [81] Andersen, P. V., Georg, S., Gram-Hanssen, K., Heiselberg, P. K., Horsbøl, A., Johansen, K., Johra, H., Marszal-Pomianowska, A., & Møller, E. S. (2019). Using residential buildings to manage flexibility in the District Heating Network: Perspectives and future visions from sector professionals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 352(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012032>
- [82] IRENA – International Renewable Energy Agency. (n.d) .Retrieved March 26, 2023, from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_ToU_tariffs_2019.pdf

[83] Internet standards come to the advanced metering infrastructure. *Electric Energy Online*. (n.d.). Retrieved March 26, 2023, from <https://electricenergyonline.com/energy/magazine/525/article/InternetStandards-Come-to-the-Advanced-Metering-Infrastructure.htm>

[84] Zhou, B., Li, W., Chan, K. W., Cao, Y., Kuang, Y., Liu, X., & Wang, X. (2016). Smart Home Energy Management Systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.047>

[85] Issi, F., & Kaplan, O. (2018). The determination of load profiles and power consumptions of Home Appliances. *Energies*, 11(3), 607. <https://doi.org/10.3390/en11030607>

ΠΗΓΕΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διαγράμματα

Κεφάλαιο 1

Διάγραμμα 1.1

IEA, Renewables share of power generation in the Net Zero Scenario, 2010-2030, IEA, Paris
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewables-share-of-power-generation-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>, IEA.

Διάγραμμα 1.2

Residential solar PV capacity growth for selected countries/regions – Charts – Data & Statistics - IEA.
IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/residential-solar-pv-capacity-growth-for-selected-countries-regions-2013-2024>

Διάγραμμα 1.3

Global stock of digitally enabled Automated Devices, 2010-2021 – charts – Data & Statistics. IEA.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-stock-of-digitally-enabled-automated-devices-2010-2021>

Διάγραμμα 1.4

IEA, Investments in digital electricity infrastructure and software, 2014-2016, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/investments-in-digital-electricity-infrastructure-and-software-2014-2016>, IEA

Διάγραμμα 1.5

World electricity final consumption by sector, 1974-2017 – charts – Data & Statistics. IEA.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2019>

Διάγραμμα 1.6

[81] Andersen, P. V., Georg, S., Gram-Hanssen, K., Heiselberg, P. K., Horsbøl, A., Johansen, K., Johra, H., Marszal-Pomianowska, A., & Møller, E. S. (2019). Using residential buildings to manage flexibility in the District Heating Network: Perspectives and future visions from sector professionals. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 352(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012032>

Διάγραμμα 1.7

[19] Faruqui, A., Sergici, S., & Warner, C. (2017). Arcturus 2.0 : A meta-analysis of time-varying rates for electricity. The Electricity Journal, 30(10), 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.003>

Διάγραμμα 1.8

[19] Faruqui, A., Sergici, S., & Warner, C. (2017). Arcturus 2.0 : A meta-analysis of time-varying rates for electricity. The Electricity Journal, 30(10), 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.003>

Διάγραμμα 1.9

IEA, Demand response availability at times of highest flexibility needs and share in total flexibility provision in the Net Zero Scenario, 2020 and 2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/demand-response-availability-at-times-of-highest-flexibility-needs-and-share-in-total-flexibility-provision-in-the-net-zero-scenario-2020-and-2030>, IEA.

Διάγραμμα 1.10

IEA, Demand response potential in the Sustainable Development Scenario, 2018-2040, IEA, Paris
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/demand-response-potential-in-the-sustainable-development-scenario-2018-2040>, IEA.

Κεφάλαιο 3

Διάγραμμα 3.2

[85] Issi, F., & Kaplan, O. (2018). The determination of load profiles and power consumptions of Home Appliances. Energies, 11(3), 607. <https://doi.org/10.3390/en11030607>

Πίνακες

Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1.1

[82] IRENA – International Renewable Energy Agency. (n.d) .Retrieved March 26, 2023, from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_ToU_tariffs_2019.pdf

Πίνακας 1.2

[23] Kärkkäinen, S., & Oy, E. (2012). Task XVII: Integration of demand side management, distributed generation, renewable energy sources and energy storages – Subtask 5, Report No. 5: Smart metering. http://www.ieadsm.org/wp/files/Exco%20File%20Library/Key%20Publications/SmartMetering_final

Πίνακας 1.3

[23] Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential demand side management model, optimization and future perspective: A Review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.300>

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1

[23] Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential demand side management model, optimization and future perspective: A Review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.300>

Σχήματα

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1

[23] Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential demand side management model, optimization and future perspective: A Review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.300>

Σχήμα 1.2

[5] Albadi, M. H., & El-Saadany, E. F. (2008). A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1989–1996. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002>

Σχήμα 1.3

[5] Albadi, M. H., & El-Saadany, E. F. (2008). A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1989–1996. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002>

Σχήμα 1.4

[5] Albadi, M. H., & El-Saadany, E. F. (2008). A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1989–1996. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002>

Σχήμα 1.5

[83] Internet standards come to the advanced metering infrastructure. *Electric Energy Online*. (n.d.). Retrieved March 26, 2023, from <https://electricenergyonline.com/energy/magazine/525/article/InternetStandards-Come-to-the-Advanced-Metering-Infrastructure.htm>

Σχήμα 1.6

[84] Zhou, B., Li, W., Chan, K. W., Cao, Y., Kuang, Y., Liu, X., & Wang, X. (2016). Smart Home Energy Management Systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.047>

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1

[23] Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential demand side management model, optimization and future perspective: A Review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.300>