



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΜΙΑ  
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ:  
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Μ. Λαΐτσος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος, Φεβρουάριος 2021





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΜΙΑ**

**ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ:**

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ**

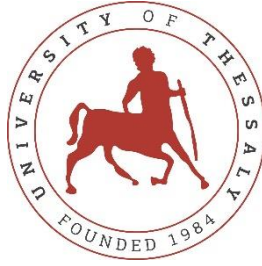
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Μ. Λαΐτσος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος, Φεβρουάριος 2021





**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**THE MODERN POWER SYSTEM FROM A DIFFERENT  
APPROACH:  
IMPACT OF DEMAND SIDE MANAGEMENT METHODS**

MSc Thesis

Vasileios M. Laitos

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

Volos, February 2021

v



Εγκρίνεται από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Επιβλέπων **Μπαργιώτας Δημήτριος**

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Τσουκαλάς Ελευθέριος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης:





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα για την εμπιστοσύνη που έδειξε και για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου που με στήριξαν και με στηρίζουν σε κάθε προσπάθεια της ζωής μου.



## ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

(Υπογραφή)

Βασίλειος Λαΐτσος

08/01/2021



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια μελέτης και ανάλυσης ενός πεδίου που αντικαθιστά τις παλιές και διαμορφώνει νέες αντιλήψεις σχετικά με την αποδοτική και οικονομική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο ονομάζεται “Διαχείριση της Πλευράς της Ζήτησης” (Demand Side Management). Ο συγκεκριμένος όρος αποτελείται από προηγμένες δραστηριότητες σχεδιασμού, εφαρμογής και παρακολούθησης των δραστηριοτήτων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή έως την κατανάλωση και την θέσπιση ικανών υπηρεσιών και προγραμμάτων με σκοπό την παροχή κινήτρων στους καταναλωτές ώστε να τροποποιήσουν το επίπεδο και τον τρόπο χρήσης της ηλεκτρικής τους ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στα Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας, παρουσιάζεται η “Διαχείριση της Πλευράς της Ζήτησης” και αναλύονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο ρόλος της ενεργειακής διαχείρισης στα Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εισαγωγή στην έννοια του όρου της Διαχείρισης της Πλευράς της Ζήτησης. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται λεπτομερώς οι κατηγορίες και οι μέθοδοι αυτού του τομέα. Στο Κεφάλαιο 5 κατασκευάζεται ένα μοντέλο Απόκρισης στη Ζήτηση με στόχο να δοθεί μία πιο παραστατική εικόνα των όσων θα αναφερθούν και τέλος, στο Κεφάλαιο 6 εξάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα και αναφέρονται μελλοντικές μελέτες που θα ισχυροποιήσουν ακόμη περισσότερο την ενεργειακή διαχείριση της πλευράς των καταναλωτών.

**Λέξεις- κλειδιά:** Διαχείριση της Πλευράς της Ζήτησης, Ανταπόκριση στη Ζήτηση, Ευφυές Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ενεργειακή Απόδοση, Χρόνος Χρήσης, Στρεφόμενη Εφεδρεία, Μετατόπιση Φορτίου, Μείωση Αιχμής Φορτίου



## ABSTRACT

### **The Modern Power System from a Different Approach: Impact of Demand Side Management Methods**

This thesis is an attempt to study and analyze a field that replaces the old and forms new ideas about the efficient and economical use of electricity, which is called "Demand Side Management". This term consists of advanced activities of planning, implementation and monitoring of electricity transmission and distribution activities from generation to consumption and the establishment of competent services and programs in order to motivate consumers to modify the level and manner use of their electricity.

In Chapter 1, an introduction is made to the Smart Grid Energy Systems, the "Demand Side Management" is presented and its most important advantages are analyzed. Chapter 2 presents the role of energy management in Smart Grid Systems. Then, in Chapter 3, the concept of the demand side is introduced. Chapter 4 then details the categories and methods in this area. Chapter 5 builds a Demand Response model in order to give a more vivid picture of what will be mentioned and finally, in Chapter 6 some key conclusions are drawn and future studies are reported that will further strengthen the energy management of the consumer side.

Vasileios Laitos

[vasilislait@gmail.com](mailto:vasilislait@gmail.com)

Volos, February 2021

**Keywords:** Demand Side Management, Demand Response, Smart Grid Energy System, Energy Efficiency, Time of Use, Spinning Reserve, Load Shifting, Peak Load Reduction





## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Κίνητρα και Περιγραφή του Θέματος .....	1
1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	3
2.1 Εισαγωγή .....	3
2.2 Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Smart Grid Energy Systems).....	5
2.3 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας .....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	16
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	16
3.1 Ορισμός και Βασικοί Στόχοι .....	16
3.2 Αναγκαιότητα του Demand Side Management.....	17
3.3 Διαχείριση Ζήτησης και Τεχνολογίες Ευφύων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	23
ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	23
4.1 Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency).....	24
4.2 Χρόνος Χρήσης (Time Of Use) .....	26
4.2.1 Εισαγωγή στην Τιμολόγηση Χρόνου Χρήσης .....	26
4.2.2 Παράδειγμα Εφαρμογής Προγράμματος Χρόνου Χρήσης .....	28
4.2.3 Μεθοδολογία Ανάπτυξης Τιμών Χρόνου Χρήσης (Time Of Use Rates) .....	30
4.3 Ανταπόκριση στη Ζήτηση.....	33
4.3.1 Εισαγωγή στα Προγράμματα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση.....	33

4.3.2 Βασικότερα Πλεονεκτήματα της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση .....	35
4.3.3 Γιατί το Demand Response είναι τόσο σημαντικό;.....	38
4.3.4 Πρωτόκολλα και Πρότυπα των Προγραμμάτων Demand Response.....	40
4.3.5 Κατηγοριοποίηση του Demand Response .....	43
4.3.6 Ανάλυση της Κάθε Στρατηγικής Μεμονωμένα.....	46
4.3.7 Συμμετοχή των Προγραμμάτων Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στην Χονδρική Αγορά Ενέργειας.....	57
4.3.8 Δομή των Προγραμμάτων Demand Response στην Αγορά Ενέργειας.....	60
4.4 Στρεφόμενη Εφεδρεία (Spinning Reserve) .....	61
4.4.1 Εισαγωγή στην Έννοια της Στρεφόμενης Εφεδρείας.....	61
4.4.2 Έλεγχος και Αποκατάσταση της Συχνότητας του Συστήματος .....	63
4.5 Μηχανισμοί του Demand Side Management.....	65
4.5.1 Μετατόπιση Φορτίου (Load Shift Effect) .....	65
4.5.2 Αποκοπή Αιχμής (Peak Clipping Effect).....	66
4.5.3 Διατήρηση φορτίου (Conservation Effect).....	67
4.5.4 Ανάπτυξη Φορτίου (Load Building Effect).....	68
4.5.5 Πλήρωση Κοιλάδων (Valley Filling) .....	68
4.5.6 Ευελιξία Φορτίου (Flexible Load) .....	69
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>71</b>
<b>ΘΕΣΠΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ DEMAND RESPONSE ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΡΑ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ .....</b>	<b>71</b>
5.1 Περιγραφή Υλοποίησης.....	71
5.2 Στρατηγική Διαμόρφωσης Μαθηματικών Μοντέλων και Μοντελοποίησης Προγράμματος Απόκρισης στη Ζήτηση .....	73
5.2.1 Ορισμός και λειτουργία του Μικροδικτύου .....	73
5.2.2 Μαθηματική Μοντέλο φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	74

5.2.3	Μαθηματικό Μοντέλο Ανεμογεννήτριας .....	75
5.2.4	Κόστος Μεταφερόμενης Ισχύος μεταξύ Κυρίως Δικτύου- Μικροδικτύου .....	76
5.2.5	Κόστος Παραγωγής της Ηλεκτρικής Ενέργειας του Μικροδικτύου .....	77
5.2.6	Σχεδιασμός Συμβολαίου Χρέωσης των Καταναλωτών.....	80
5.2.7	Πρόγραμμα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response Program) .....	80
5.3	Στρατηγική Επίλυσης Προβλήματος .....	84
5.4	Επιλογή Δεδομένων.....	84
5.4.1	Δεδομένα Πρόβλεψης Ισχύος Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας .....	84
5.4.2	Δεδομένα Πρόβλεψης Ισχύος Ανεμογεννήτριας.....	85
5.4.3	Δεδομένα Αρχικής Ζήτησης Καταναλωτών.....	86
5.4.4	Ωριαίες Τιμές του συντελεστή $\lambda$ .....	86
5.4.5	Δεδομένα Συμβατικής Γεννήτριας Diesel.....	87
5.4.6	Δεδομένα Εμπορικών Καταναλωτών .....	87
5.4.7	Κόστος Μεταφερόμενης Ενέργειας μεταξύ Κυρίως Δικτύου - Μικροδικτύου	88
5.5	Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.....	89
5.5.1	Συμβατική Γεννήτρια Παραγωγής.....	89
5.5.2	Μεταφερόμενη Ισχύς μεταξύ Κυρίως Δικτύου- Μικροδικτύου .....	90
5.5.3	Αιολική Ισχύς Παραγωγής.....	91
5.5.4	Ηλιακή Ισχύς Παραγωγής .....	92
5.5.5	Βέλτιστη Ωριαία Ισχύς Μείωσης των Καταναλωτών.....	92
5.5.6	Ωριαία πληρωμή κινήτρων για τους δύο καταναλωτές .....	94
5.6	Ερμηνεία Αποτελεσμάτων και Αξιολόγηση Αλγοριθμικού Μοντέλου .....	95
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	98
	ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	98
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	99



## Λίστα Εικόνων

<b>Εικόνα 1:</b>	Σύστημα Διαχείρισης Ισχύος από Πλευράς Ζήτησης.....	4
<b>Εικόνα 2:</b>	Ευφυές Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	5
<b>Εικόνα 3:</b>	Η χρήση διαφορετικών προφίλ τιμολόγησης δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας προγραμμάτων που μπορούν να εξομαλύνουν την ημερήσια καμπύλη ζήτησης μετατοπίζοντας τις αιχμές κατανάλωσης σε χρονικά διαστήματα με χαμηλότερη ζήτηση.....	8
<b>Εικόνα 4:</b>	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας με επίκεντρο τον καταναλωτή.....	13
<b>Εικόνα 5:</b>	Στρατηγική και Στάδια της Ενεργειακής Διαχείρισης.....	14
<b>Εικόνα 6:</b>	Επενδύσεις στον τομέα Διαχείρισης της Ζήτησης στις ΗΠΑ.....	19
<b>Εικόνα 7:</b>	Σύστημα Προηγμένων Υποδομών Μέτρησης Ευφυούς Δικτύου.....	20
<b>Εικόνα 8:</b>	Αριθμός και Δαπάνες των Έξυπνων Μετρητών το διάστημα 2017.....	21
<b>Εικόνα 9:</b>	Κατηγορίες του τομέα Διαχείρισης Ζήτησης.....	23
<b>Εικόνα 10:</b>	Διαδικτυακό Σύστημα Πληροφοριών Ενέργειας .....	25
<b>Εικόνα 11:</b>	Τιμολόγηση Προγράμματος Χρόνου Χρήσης Καταναλωτών.....	27
<b>Εικόνα 12:</b>	Παράδειγμα Εφαρμογής Προγράμματος Χρόνου Χρήσης.....	29
<b>Εικόνα 13:</b>	Πραγματική και Μέση Ζήτηση Κατανάλωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	30
<b>Εικόνα 14:</b>	Επίδραση της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στην Συνολική Καμπύλη Ζήτησης των Καταναλωτών.....	34
<b>Εικόνα 15:</b>	Επίδραση της Ενεργειακή Απόδοσης σε σχέση με την Ανταπόκριση στη Ζήτηση.....	35
<b>Εικόνα 16:</b>	Αριθμός δημοσιεύσεων πάνω στον τομέα της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση κατά την περίοδο 1990- 2012.....	39
<b>Εικόνα 17:</b>	Δομή του συστήματος OpenADR.....	40

<b>Εικόνα 18:</b>	Η ενεργειακή δια- λειτουργικότητα του OASIS χρησιμεύει ως άμεση απόκριση και πρωτόκολλο επικοινωνίας αγοράς για αλληλεπιδράσεις μεταξύ τομέων.....	42
<b>Εικόνα 19:</b>	Διαδικασία συναλλαγών στην ενεργειακή δια- λειτουργικότητα.....	43
<b>Εικόνα 20:</b>	Κατηγοριοποίηση προγραμμάτων Ανταπόκρισης στη Ζήτηση.....	44
<b>Εικόνα 21:</b>	Παράδειγμα Υποβολής Προσφοράς.....	55
<b>Εικόνα 22:</b>	Κατηγοριοποίηση εμπορικών και βιομηχανικών προγραμμάτων των Η.Π.Α.....	57
<b>Εικόνα 23:</b>	Παράδειγμα Επίδρασης της Ανταπόκρισης της Ζήτησης στις τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	58
<b>Εικόνα 24:</b>	Επίδραση της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στις τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	59
<b>Εικόνα 25:</b>	Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων σε DR πρόγραμμα.....	60
<b>Εικόνα 26: :</b>	A cooperative consumer backs off when grid frequency decreases.....	62
<b>Εικόνα 27:</b>	Σύστημα σταθεροποίησης συχνότητας.....	63
<b>Εικόνα 28:</b>	Η ακολουθία ενεργοποίησης των τριών επιπέδων ελέγχου.....	64
<b>Εικόνα 29:</b>	Ο γενικός χρόνος απόκρισης κάθε επιπέδου ελέγχου.....	64
<b>Εικόνα 30:</b>	Μέθοδος Μετατόπισης Φορτίου .....	66
<b>Εικόνα 31:</b>	Μέθοδος Αποκοπής Αιχμής Φορτίου .....	67
<b>Εικόνα 32:</b>	Μέθοδος Διατήρησης Φορτίου .....	67
<b>Εικόνα 33:</b>	Μέθοδος Ανάπτυξης Φορτίου .....	68
<b>Εικόνα 34:</b>	Μέθοδος Πλήρωσης Κοιλιάδων .....	69
<b>Εικόνα 35:</b>	Ευελιξία Φορτίου .....	69

<b>Εικόνα 36:</b>	Απλοποιημένο μοντέλο μικροδικτύου συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο και με την παρουσία προγράμματος Απόκρισης της Ζήτησης για τους καταναλωτές.....	72
<b>Εικόνα 37:</b>	Απλοποιημένη αναπαράσταση ενός μικροδικτύου.....	73





## Λίστα Πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b>	Δεδομένα πρόβλεψης ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	85
<b>Πίνακας 2:</b>	Δεδομένα πρόβλεψης ισχύος εξόδου ανεμογεννήτριας.....	85
<b>Πίνακας 3:</b>	Σύνολο αρχικής ωριαίας ζήτησης φορτίου των δύο καταναλωτών.....	86
<b>Πίνακας 4:</b>	Ωριαίες τιμές του συντελεστή λ.....	86
<b>Πίνακας 5:</b>	Δεδομένα γεννήτριας diesel.....	87
<b>Πίνακας 6:</b>	Τύπος πελάτη, Ημερήσια όρια διακοψιμότητας ισχύος, συντελεστές κόστους για κάθε καταναλωτή.....	87
<b>Πίνακας 7:</b>	Βέλτιστη ωριαία ισχύς παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας του μικροδικτύου.....	89
<b>Πίνακας 8:</b>	Βέλτιστη ωριαία μεταφερόμενη ισχύς μεταξύ κυρίως δικτύου-μικροδικτύου.....	90
<b>Πίνακας 9:</b>	Βέλτιστη ωριαία ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας.....	91
<b>Πίνακας 10:</b>	Βέλτιστη ωριαία ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	92
<b>Πίνακας 11:</b>	Η ωριαία ποσότητα μείωσης της ισχύος του πρώτου καταναλωτή.....	93
<b>Πίνακας 12:</b>	Η ωριαία ποσότητα μείωσης της ισχύος του δεύτερου καταναλωτή.....	93
<b>Πίνακας 13:</b>	Αποζημίωση του πρώτου καταναλωτή.....	94
<b>Πίνακας 14:</b>	Αποζημίωση του δεύτερου καταναλωτή.....	94
<b>Πίνακας 15:</b>	Αποζημίωση του δεύτερου καταναλωτή.....	96



## Λίστα Γραφημάτων

<b>Γράφημα 1:</b>	Αρχική καμπύλη ζήτησης των δύο εμπορικών καταναλωτών.....	89
<b>Γράφημα 2:</b>	Βέλτιστη ωριαία ισχύς παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας.....	90
<b>Γράφημα 3:</b>	Βέλτιστη ωριαία μεταφερόμενη ισχύς μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου.....	91
<b>Γράφημα 4:</b>	Βέλτιστη ωριαία ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας.....	91
<b>Γράφημα 5:</b>	Βέλτιστη Ηλιακή Ροή Ισχύος.....	92
<b>Γράφημα 6:</b>	Ωριαία μεταβολή της ισχύος μείωσης για κάθε καταναλωτή.....	93
<b>Γράφημα 7:</b>	Διακύμανση της πληρωμής των πελατών.....	94
<b>Γράφημα 8:</b>	Αιολική ισχύς, ηλιακή ισχύς, ισχύς εξόδου γεννήτριας και μεταφερόμενη ισχύς μεταξύ κυρίως δικτύου και μικροδικτύου.....	95



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Κίνητρα και Περιγραφή του Θέματος

Η αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα οι απαιτήσεις κάλυψης των αιχμών φορτίου, δημιουργεί νέες προκλήσεις σχετικά με την ασφάλεια και αξιοπιστία των δικτύων, καθώς επίσης διαμορφώνει νέες ανάγκες σχετικά με την δημιουργία νέων εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι πολλές φορές απαιτούνται μόνο για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης, αλλά ταυτόχρονα απαιτούν και τεράστια οικονομικά ποσά επένδυσης για την κατασκευή τους αλλά και μεγάλα χρονικά διαστήματα για την ολοκλήρωσή τους. Επίσης, η έλλειψη ουσιαστικής επικοινωνίας μεταξύ των καταναλωτών και των διαχειριστών των δικτύων μεταφοράς και διανομής είναι ένας επιπλέον παράγοντας που συμβάλλει κάποιες φορές στην κακή εκτίμηση του φορτίου και ευθύνεται για πολλά λειτουργικά προβλήματα.

Αν για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών και ειδικότερα εκείνου της κάλυψης της αιχμής χρησιμοποιούνταν άλλοι τρόποι, προηγμένοι τεχνολογικά και πιο αποτελεσματικοί οικονομικά από τις πανάκριβες νέες επενδύσεις σε εγκαταστάσεις και εξοπλισμό, που θα υιοθετούσαν σύγχρονα αλγοριθμικά μοντέλα, όπως αυτά της Τεχνητής Νοημοσύνης, τότε ο χαρακτήρας των συμβατικών δικτύων θα μετατρέποταν σε προηγμένο ευφυές σύστημα και τα προβλήματα που αντιμετώπιζε θα εξαλείφονταν. Η Διαχείριση της Πλευράς της Ζήτησης (Demand Side Management) αποτελεί τομέα ο οποίος εναρμονίζει αποτελεσματικά τα σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα της θεωρίας των υπολογιστών με τις αρχές και θεωρίες του πεδίου των Ηλεκτρικών Συστημάτων και έχει ως στόχο της θέσπιση νέων αξιών και ιδεών στη διαχείριση πολύπλοκων ηλεκτρικών δικτύων, ελαχιστοποιώντας το οικονομικό κόστος και μεγιστοποιώντας την απόδοση λειτουργίας. Οι κατηγορίες και οι μέθοδοί του θα ερευνηθούν και θα παρουσιαστούν παρακάτω με στόχο να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο αυτό το δημοφιλές αλλά ταυτόχρονα και άγνωστο πεδίο των ηλεκτρικών συστημάτων.

## 1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής

Η διπλωματική εργασία οργανώνεται ως εξής:

- Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται εισαγωγή στα ευφυή συστήματα διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματά τους.
- Το **Κεφάλαιο 3** αποτελεί μία εισαγωγή στην έννοια του τομέα της Διαχείρισης της Πλευράς της Ζήτησης.
- Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες του αναλύονται λεπτομερώς στο **Κεφάλαιο 4**, όπου η γίνεται αναφορά σε κάθε κατηγορία, με μεγαλύτερη έμφαση στο πεδίο της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση και αναφέρονται τόσο τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν όσο και οι λόγοι αναγκαιότητάς τους στα ηλεκτρικά συστήματα. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται επίσης οι τεχνικές με τις οποίες τα προγράμματα Διαχείρισης της Ζήτησης ελέγχουν την καμπύλη των καταναλωτών με σκοπό την βέλτιστη εξυπηρέτηση του τελικού φορτίου.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός προγράμματος Ανταπόκρισης στη Ζήτηση βασισμένο στα κίνητρα των καταναλωτών (Incentive-Based Demand Response Program) έτσι ώστε να γίνει σε κατανοητό πώς οι καταναλωτές και οι διαχειριστές των προγραμμάτων αλληλοεπιδρούν με στόχο την εξυπηρέτηση του φορτίου, όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά.
- Τέλος, το **Κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, όπου τονίζεται και η αναγκαιότητα της μελλοντικής μελέτης του θέματος που παρουσιάζεται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ

#### ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

##### 2.1 Εισαγωγή

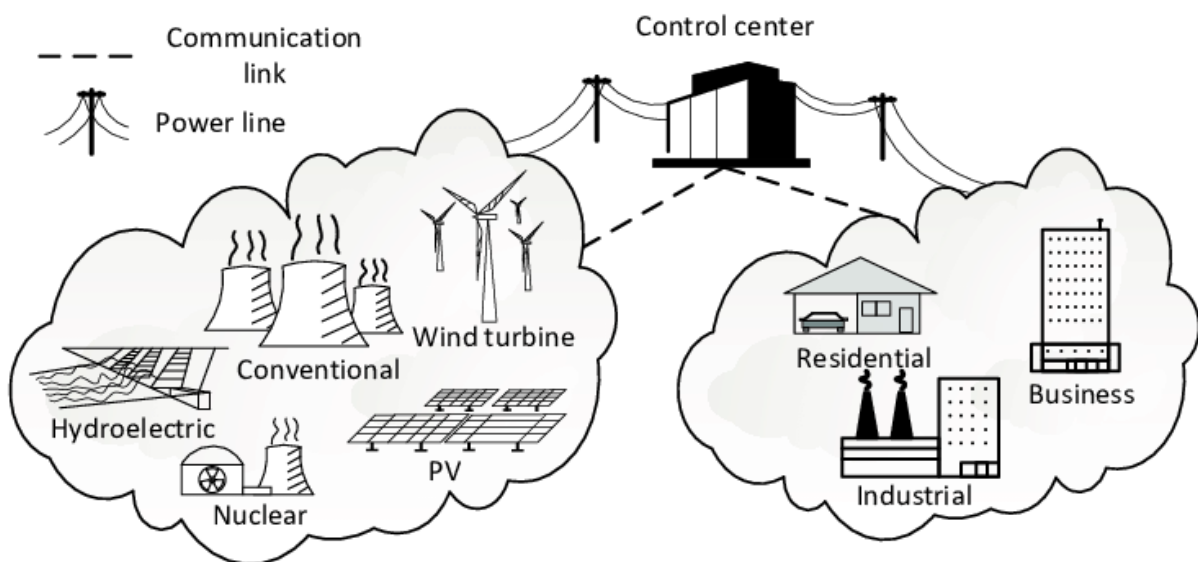
Οι απαιτήσεις στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο συνεχώς αυξάνονται. Παράγοντες όπως η αύξηση του πληθυσμού της γης, η παγκόσμια κλιματική αλλαγή, προβλήματα αστοχίας υλικών λόγω γήρανσης και φθοράς μηχανικών μερών των ηλεκτρικών συστημάτων (γραμμές μεταφοράς και διανομής), προβλήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μείωση των ορυκτών καυσίμων, νέες ανάγκες για αμφίδρομη ροή ισχύος αλλά και περιορισμοί στην παραγωγική ικανότητα και ευελιξία των υφισταμένων δικτύων, καθιστούν τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανίκανα να ακολουθήσουν τις απαιτήσεις, αντιμετωπίζοντας δυσκολίες στο να ανταποκριθούν στις ανάγκες ζήτησης και αξιοπιστίας που απαιτούνται στις μέρες μας. Η αργή απόκρισή τους εξαιτίας μηχανικών διακοπών, η μονόδρομη επικοινωνία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος και η χαμηλού επιπέδου επεξεργασία πληροφοριών, είναι κάποια από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν [1].

Οι ολοένα και συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις οδηγούν στην αναγκαιότητα εύρεσης νέων τεχνικών διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες προσδίδουν ευελιξία στα συστήματα μεταφοράς και διανομής και μετατρέπουν τον συμβατικό τους χαρακτήρα από χαρακτήρα παραδοσιακής μορφής σε χαρακτήρα ευφυούς δικτύου (smart grid), παρέχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο για τους παραγωγούς όσο και για τους καταναλωτές και αποτελώντας ικανή λύση σε όλα τα προβλήματα που έχουν δημιουργηθεί.

Η ραγδαία εξέλιξη στον τεχνολογικό τομέα έχει συμβάλει σημαντικότερα στην επανάσταση σε τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες. Οι τηλεπικοινωνίες αποτελούν έναν προηγμένο τομέα ο οποίος μπορεί να προσφέρει το απαραίτητο υπόβαθρο στον αποδοτικό μετασχηματισμό των συμβατικών ηλεκτρικών δικτύων σε δίκτυα όπου όλα τα

συμμετέχοντα μέλη θα έχουν άμεση και εύκολη πρόσβαση σε πληροφορίες, σε ανταλλαγή σημάτων, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοση και τη δυνατότητα θέσπισης νέων προγραμμάτων, που θα βασίζονται σε αυτό ακριβώς τον παράγοντα, στην πραγματικού χρόνου (real time) επικοινωνία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.

Ένας σύγχρονος τομέας, ο οποίος έχει αρχίσει να ερευνάται περισσότερο τα τελευταία έτη είναι η Διαχείριση της Ζήτησης (Demand Side Management). Ουσιαστικά πρόκειται για τεχνολογίες που εφαρμόζονται στην πλευρά των καταναλωτών -και όχι στην πλευρά της ζήτησης όπως στα παλιά συμβατικά συστήματα- και παρέχουν ισχυρά κίνητρα στους καταναλωτές ώστε να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση της ηλεκτρικής τους ενέργειας. Η Εικόνα 1 παρουσιάζει την απλοποιημένη μορφή ενός συστήματος διαχείρισης της ζήτησης των καταναλωτών.



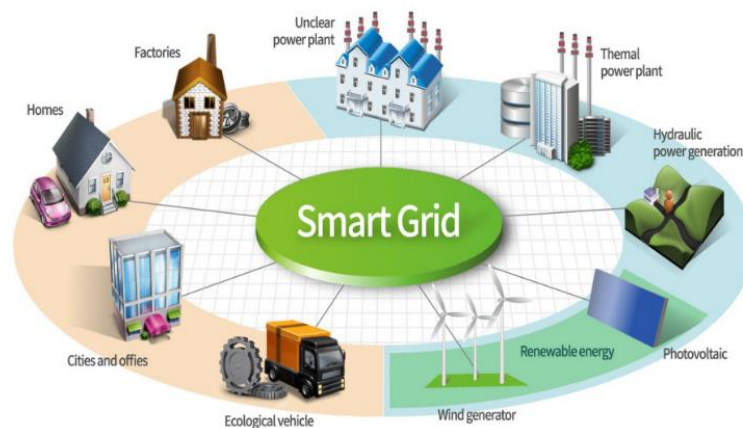
Εικόνα 1: Σύστημα Διαχείρισης Ισχύος από Πλευράς Ζήτησης [2]

Οι μέθοδοι υλοποίησης της Διαχείρισης της πλευράς της Ζήτησης δίνουν το πλεονέκτημα στους καταναλωτές της δυναμικής διαχείρισης της ενεργειακής τους κατανάλωσης, με άμεσο οικονομικό όφελος τόσο για τους ίδιους όσο και για τις εταιρείες παραγωγής ισχύος. Η καταγραφή δεδομένων ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά πλέον νόημα και συμβάλλει στην δημιουργία προηγμένων ευφυών ηλεκτρικών δικτύων, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



## 2.2 Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Smart Grid Energy Systems)

Κάθε ηλεκτρολόγος μηχανικός έχει ακούσει τον όρο “Ευφύες ή Έξυπνο Δίκτυο”. Τι είναι όμως ένα τέτοιο δίκτυο και τι συμβάλλει ώστε να διαφοροποιείται από τα συμβατικά δίκτυα; Όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 2*, πρόκειται ουσιαστικά για μία ενοποίηση όλων των μορφών ενέργειας που οδηγεί σε αναβάθμιση των συμβατικών δικτύων παλιάς μορφής, η οποία βασίζεται στην διείδυση των τηλεπικοινωνιών και της ψηφιακής τεχνολογίας και επιτρέπει την αμφίδρομη ροή πληροφοριών μεταξύ καταναλωτών και παραγωγών. Ο όρος “Έξυπνο Δίκτυο” χαρακτηρίζει ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο εναρμονίζει τις ψηφιακές τεχνολογίες με τα μεγάλα δίκτυα διανομής με σκοπό την βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Έχει την δυνατότητα ανιχνευσιμότητας τιμών σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες σφαλμάτων σε όλο το μήκος των γραμμών μεταφοράς του (sensing along the transmission lines). Η ενοποίηση όλων των σύγχρονων τεχνολογιών είναι αυτή που καθιστά το έξυπνο δίκτυο ικανό να καλύψει τις αυξημένες απαιτήσεις της ταχέως μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής ζήτησης [3].



*Εικόνα 2: Ευφύες Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας [4]*

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα ενός Έξυπνου Δικτύου είναι τα παρακάτω [5]:

1. Άμεση αποκατάσταση της ευστάθειας ενός συστήματος έπειτα από εξωτερικές διαταραχές, με το σύστημα να αποκτά ευρωστία και σταθερότητα.

## 2. Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω μείωσης της κατανάλωσης

- Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα ενός έξυπνου δικτύου είναι η δυνατότητά του να ενημερώνει ανά πάσα στιγμή τους καταναλωτές για τη συνολική πραγματική κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, με τη συνεχή παρακολούθηση της κατανάλωσης, δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης της συνολικής ισχύος ώστε να ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες των καταναλωτών.

## 3. Καλύτερη εξυπηρέτηση πελατών με όφελος στις χρεώσεις των λογαριασμών

- Άλλο ένα σημαντικό των ευφυών δικτύων είναι ότι οι λογαριασμοί χρέωσης των καταναλωτών αντικατοπτρίζουν την πραγματική καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια για κάθε μήνα, με την βοήθεια συστημάτων τηλεχειρισμού, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το κόστος των παλαιών συστημάτων μετρήσεως της ενέργειας. Σε συνδυασμό με την εξ' αποστάσεως πρόσβαση σε πληροφορίες του συστήματος κάθε χρονική στιγμή, η διάγνωση και η επίλυση προβλημάτων γίνεται ευκολότερη, βελτιώνοντας έτσι την συνολική εξυπηρέτηση των πελατών.

## 4. Ανίχνευση εξωτερικών απειλών

- Τα συστήματα τηλεχειρισμού μπορούν να εντοπίζουν εξωγενείς απάτες με μεγάλη ακρίβεια, καθώς οι μονάδες ελέγχου που χρησιμοποιούν δεν περιέχουν πολλά μηχανικά μέρη που υπόκεινται σε μηχανικές φθορές. Επίσης, οι νέες τεχνολογίες μετρητές ενέργειας, χρησιμοποιώντας στα συστήματα επικοινωνίας τους Λογικούς Προγραμματιζόμενους Ελεγκτές (Programmable Logic Controllers ή PLC), έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύουν εξωτερικές επιδράσεις σε όλο το εύρος μιας εγκατάστασης ή και ακόμη ενός ολόκληρου συστήματος μεταφοράς και διανομής ενέργειας. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση αισθητήρων θέσης και απόστασης, οι οποίοι επιστρέφουν πιθανά σήματα κινδύνου σε περίπτωση κάποιας εξωγενούς επίδρασης. Ακόμη, οι μονάδες PLC,

έχουν την ικανότητα ελέγχου ισοζυγίου ενέργειας. Το σύστημα ελέγχου αθροίζει όλες τις τιμές μετρούμενης ενέργειας από τους εγκατεστημένους μετρητές ενέργειας και συγκρίνει το συνολικό ποσό με την μέτρηση που πραγματοποιεί ένας αθροιστής στην αρχή της γραμμής τροφοδοσίας. Με αυτή τη μέθοδο ελέγχεται αν υπάρχουν απώλειες ισχύος ή κλοπή ηλεκτρικής ενέργειας σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου και συμβάλλει στην διατήρηση της ισορροπίας και της σταθερότητας του συστήματος.

#### 5. Μειωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

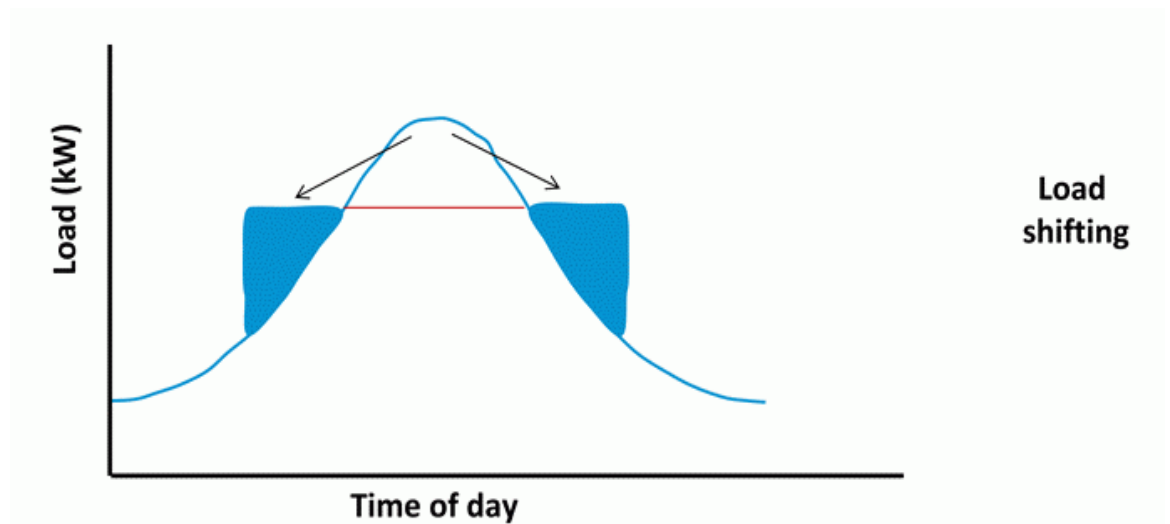
- Ένα Έξυπνο Δίκτυο έχει την δυνατότητα να συλλέγει πολύ μεγαλύτερο όγκο δεδομένων από τα μη αυτοματοποιημένα συστήματα καταγραφής ενέργειας. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την χρήση σύγχρονων τεχνικών ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων, με σκοπό την πρόβλεψη με εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό επιτυχίας τις ανάγκες ζήτησης των καταναλωτών. Έτσι δημιουργείται η δυνατότητα πραγματοποίησης του βέλτιστου προγραμματισμού της παραγωγής (για παράδειγμα η ανάγκη ή όχι ενεργοποίησης γεννητριών με υψηλά λειτουργικά κόστη) και η παροχή κατάλληλων τιμών στα κατάλληλα χρονικά διαστήματα προς όφελος των καταναλωτών.

#### 6. Αυξημένος ανταγωνισμός τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας

- Η δυνατότητα συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων δίνει στις εταιρείες πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας να γνωρίζουν τις ανάγκες των καταναλωτών και να προσαρμόζουν τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τις πραγματικές ανάγκες των καταναλωτών. Η γνώση επομένως των αναγκών των καταναλωτών μέσω σύγχρονων μεθόδων πρόβλεψης, δίνει την δυνατότητα την ύπαρξη πιο ανταγωνιστικών τιμών στην αγορά δίνοντας οικονομικά οφέλη στους πελάτες.

## 7. Μείωση αιχμών καμπύλης ζήτησης καταναλωτών

- Μέσω της χρήσης δυναμικών προφίλ τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας, δίνεται επίσης η δυνατότητα απόκτησης μιας αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών και να εφαρμοστούν προγράμματα εξισορρόπησης της ημερήσιας καμπύλης ζήτησης, μετατοπίζοντας τις αιχμές κατανάλωσης σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3*. Η εξισορρόπηση της καμπύλης ζήτησης δίνει το πλεονέκτημα στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να αποφεύγουν να ενεργοποιούν και να απενεργοποιούν γεννήτριες παραγωγής, μειώνοντας έτσι τα λειτουργικά και τα κόστη συντήρησης αντίστοιχα. Σκοπός αυτών των προγραμμάτων, είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης του δικτύου με οφέλη τόσο για την πλευρά της παραγωγής όσο και για αυτήν της ζήτηση της ηλεκτρικής ισχύος. Όλα αυτά τα προγράμματα ανήκουν στην έννοια του Demand Side Management, τον οποίο θα αναλύσουμε και θα μελετήσουμε στην συνέχεια.



*Εικόνα 3: Η χρήση διαφορετικών προφίλ τιμολόγησης δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας προγραμμάτων που μπορούν να εξομαλύνουν την ημερήσια καμπύλη ζήτησης μετατοπίζοντας τις αιχμές κατανάλωσης σε χρονικά διαστήματα με χαμηλότερη ζήτηση*

[6]

## 8. Μείωση εκπομπών άνθρακα και μόλυνσης του περιβάλλοντος

- Η συνύπαρξη των παραπάνω παραγόντων συνεπάγεται την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Το περιβάλλον αποκτά ισχυρό βαθμό βιωσιμότητας, γεγονός που θα ανοίξει το πεδίο της διεύρυνσης της ηλεκτροκίνησης και της ενσωμάτωσης των συστημάτων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο προσεχές μέλλον.

### 2.3 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί η έννοια των Συστημάτων Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Systems ή EMS) στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και θα γίνει προσπάθεια να συνδεθεί με τα Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Η αποδοτική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα των φιλόδοξων στόχων της Ευρώπης για βιώσιμη ανάπτυξη και δραστηριότητες που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή. Ωστόσο, ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες το δίκτυο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της νότιας Ευρώπης λειτουργεί υπό εξαιρετικά υψηλά φορτία. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, μία σειρά λύσεων για την αποδοτική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, την παραγωγή της από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και την υλοποίηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων διαχείρισης και ελέγχου της έχουν ληφθεί υπόψη, με μερικές από αυτές να έχουν προωθηθεί μέσω κανονισμών σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Ένα παράδειγμα αποτελεί η Ισπανία, όπου το 2007 προχώρησε στην αντικατάσταση όλων των μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να επιτρέπεται η καταγραφή των ωριαίων τιμών ενέργειας με τέτοιο τρόπο, ώστε οι χρήστες να μπορούν να βελτιώσουν τα καταναλωτικά τους πρότυπα και να ταυτοχρονιστούν με τις χαμηλότερες χρεώσεις που παρέχονταν συγκεκριμένες ώρες της ημέρας μέσω βοηθητικών προγραμμάτων (Time of Use).

Λόγω της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> και μακροχρόνια να προκαλείται υπερθέρμανση του πλανήτη, η Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency) αποτελεί πρωταρχικό στόχο για την

ανάπτυξη δραστηριοτήτων βιωσιμότητας. Προκειμένου λοιπόν να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, οι εφαρμογές της Διαχείρισης Ενέργειας προτείνουν ποικίλες λύσεις, οι οποίες θα επηρεάσουν την τελική ζήτηση των καταναλωτών [3].

Το EMS είναι ένα έξυπνο, αυτόματου ελέγχου δίκτυο το οποίο αναγνωρίζει και απομνημονεύει με δυναμικό τρόπο την συμπεριφορά των καταναλωτών. Έχει την ικανότητα να αναλύει και να προβλέπει μελλοντικές συμπεριφορές μέσω της διαδικασίας της εκμάθησης και προγραμματίζει και ελέγχει την λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών σε σχέση με την κατάσταση και τις συνθήκες φόρτισης του δικτύου. Επίκεντρο του συστήματος αποτελούν οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, το ενεργειακό καταναλωτικό προφίλ των οποίων διαμορφώνεται με βάση τις καθημερινές τους συνήθειες και δραστηριότητές, για την πραγματοποίηση των οποίων απαιτείται ηλεκτρική ισχύς. Επομένως, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης με σκοπό την διαμόρφωση καταναλωτικών προτύπων είναι επιτακτικός παράγοντας της βέλτιστης λειτουργίας αυτών των δικτύων.

Για να μπορέσει να καταστεί δυνατή η “εκμάθηση” των καμπυλών φορτίου, το EMS συγκρίνει την πραγματικά μετρούμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με τα διαμορφωμένα καταναλωτικά μοντέλα των πελατών, τα οποία βασίζονται στην παρακολούθηση και καταγραφή ιστορικών δεδομένων κατανάλωσης. Ακολουθώντας μία περίοδο εκπαίδευσης και διαμόρφωσης της δομής δυναμικών μοντέλων, το σύστημα συνεχίζει να λαμβάνει πληροφορίες κατανάλωσης, ενισχύοντας την δυνατότητα εκτίμησης μελλοντικών δεδομένων για τους καταναλωτές.

Ο κύριος στόχος του EMS είναι ο σχεδιασμός του προγράμματος λειτουργίας (scheduling) των συσκευών μιας οικίας με βάση την τρέχουσα καταναλωτική δραστηριότητα, τα αιτήματα για λειτουργία ή όχι των συσκευών, τα σήματα επικοινωνίας του δικτύου και τους όρους εξυπηρέτησης των πελατών [7].

- *Συμπεριφορά καταναλωτών:* Η συμπεριφορά και οι δραστηριότητες των ανθρώπων εμφανίζουν ιεραρχική δομή σύμφωνα με τους στόχους και τις συνήθειες τους [8]. Σε έναν οικιακό καταναλωτή, οι καθημερινές ανάγκες είναι αυτές που ορίζουν ποιες συσκευές θα βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας και ποιες όχι. Συνειδητοποιώντας

την σημασία της αποκωδικοποίησης της ανθρώπινης συμπεριφοράς, τα συστήματα EMS διαμορφώνουν μοντέλα μελέτης και ανάλυσης των εξαρτήσεων μεταξύ μεμονωμένων δραστηριοτήτων και ηλεκτρικών συσκευών. Αυτό που επιτυγχάνεται δηλαδή είναι η απλοποίηση της οικιακής συμπεριφοράς των καταναλωτών σε ακολουθίες καταστάσεων δραστηριότητας. Για παράδειγμα, δραστηριότητες όπως το καθημερινό μαγείρεμα, το πλύσιμο των πιάτων, η υγιεινή και ο καθαρισμός του σπιτιού, έχουν διαφορετική επίδραση τόσο στην καμπύλη του ημερήσιου φορτίου ζήτησης όσο και στο ποια οικιακή συσκευή θα πρέπει να ενεργοποιηθεί. Μια σειρά διαφορετικών ακολουθιών δραστηριοτήτων διαμορφώνουν το καθημερινό πρόγραμμα των καταναλωτών και παρέχουν μια βάση για την κατασκευή χαρακτηρισμών των διαφορετικών καταναλωτικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται από το EMS με σκοπό την ανάλυση της καθημερινής συμπεριφοράς των τελικών χρηστών ηλεκτρικής ενέργειας και την λήψη κατάλληλων αποφάσεων προγραμματισμού [9].

- *Λειτουργία Ηλεκτρικών Συσκευών:* Κάθε καταναλωτική συμπεριφορά επηρεάζει σε άμεσο βαθμό την επιλογή της συσκευής που θα βρίσκεται σε λειτουργία. Για παράδειγμα, κατά το μαγείρεμα στο σπίτι χρησιμοποιείται ο οικιακός ηλεκτρικός φούρνος. Με μια δεδομένη λίστα οικιακών συσκευών, καταγράφονται οι σχέσεις εξάρτησης ομαδοποιώντας τις μικρές οικιακές συσκευές ανάλογα με την πιο πιθανή δραστηριότητά τους. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την ομαδοποίηση της κατάστασης αυτών των συσκευών σε καταστάσεις λειτουργίας ή μη: "on- off". Μεγαλύτερης ισχύος συσκευές, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη περίοδο λειτουργίας διαχωρίζονται είτε σε "μετακινούμενες" (shiftable) είτε σε "μη-μετακινούμενες" (non-shiftable), ανεξάρτητες ή μη [9].

Ουσιαστικά, το EMS επιδιώκει να ελέγξει και να προγραμματίσει κυρίως τις συσκευές υψηλής ισχύος, λόγω της πολύ υψηλότερης επίδρασης που ασκούν σε σχέση με τις υπόλοιπες συσκευές στην διαμόρφωση της καμπύλης φορτίου των καταναλωτών.

- *Επικοινωνία με το δίκτυο:* Οι περιορισμοί στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) λαμβάνονται ως είσοδοι στο σύστημα ελέγχου (control agent) απευθείας από το HMI (Human Machine Interface). Τέτοιου είδους περιορισμοί εκφράζονται είτε με

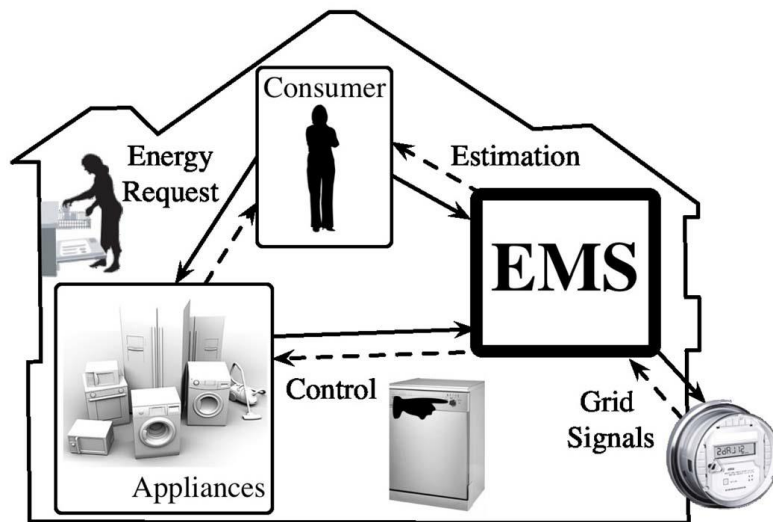
την μορφή σημάτων ειδοποίησης, είτε ως συνάρτηση του χρόνου χρήσης μια συσκευής (Time Of Use), είτε ως περιορισμοί προγραμμάτων δυναμικής τιμολόγησης (Dynamic Pricing). Έτσι το EMS, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς των καταναλωτών, προχωράει στις κατάλληλες αποφάσεις για τον βέλτιστο προγραμματισμό της κατανάλωσης [9].

- *Εξυπηρέτηση Πελατών:* Ένας καταναλωτής, μπορεί να θέσει κάποιο αίτημα εξυπηρέτησης με σκοπό τον καλύτερο προγραμματισμό των καταναλωτικών του συνηθειών. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης μιας συσκευής με δυνατότητα μετατόπισης (shiftable) σε περιπτώσεις που οι όροι και οι περιορισμοί του δικτύου δεν είναι αρκετά αυστηροί, αποτελεί μια τέτοια περίπτωση. Οι καταναλωτικοί περιορισμοί επιτρέπουν στους χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας να έχουν κάποιο βαθμό ελευθερίας σχετικά με τον προγραμματισμό των συσκευών τους, χωρίς ωστόσο να παρακάμπτεται η λειτουργία του EMS [9].

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την αλληλεπίδραση της δραστηριότητας των καταναλωτών, των ηλεκτρικών συσκευών, της επικοινωνίας μεταξύ δικτύου και καταναλωτών και της εξυπηρέτησης πελατών στο EMS, εξετάζουμε την περίπτωση όπου ένας κάτοικος υποβάλει ένα αίτημα για την ενεργοποίηση μιας ηλεκτρικής συσκευής με δυνατότητα μετατόπισης στο χρόνο (shiftable). Στην *Εικόνα 4* παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με επίκεντρο τον καταναλωτή. Μόλις ο καταναλωτής στείλει το αίτημα, το EMS ανακτά την συνολική στιγμιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος από τα Συστήματα Υποδομών Έξυπνων Μετρητών (Advanced Metering Infrastructure - AMI). Με δεδομένο πως μέσω των μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης η καταλληλότερη ακολουθιακή συμπεριφορά των καταναλωτών έχει εντοπιστεί, το EMS μπορεί να προβλέψει μελλοντικές καταστάσεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με βάση παρελθοντικές καταναλώσεις φορτίου και να συγκρίνει αυτές τις καταστάσεις με τα σήματα επικοινωνίας του δικτύου. Το EMS στη συνέχεια υπολογίζει την πιθανότητα όπου το επιπλέον φορτίο που απαιτεί ο χρήστης οδηγεί σε οικιακή κατανάλωση όπου οι περιορισμοί του δικτύου υπερβαίνονται. Εάν η πιθανότητα υπέρβασης του σήματος του



δικτύου βρίσκεται εντός των ορίων μιας πρόσθετης παραμέτρου, η οποία ορίζεται από τον χρήστη, η συσκευή θα προγραμματιστεί να μπει σε λειτουργία. Εάν όχι, η λειτουργία του φορτίου αναβάλλεται καθώς το σύστημα περιμένει την επόμενη διαθέσιμη χρονική περίοδο δοκιμής μέσω του συστήματος παρακολούθησης της καταναλισκόμενης ισχύς από το AMI [9].



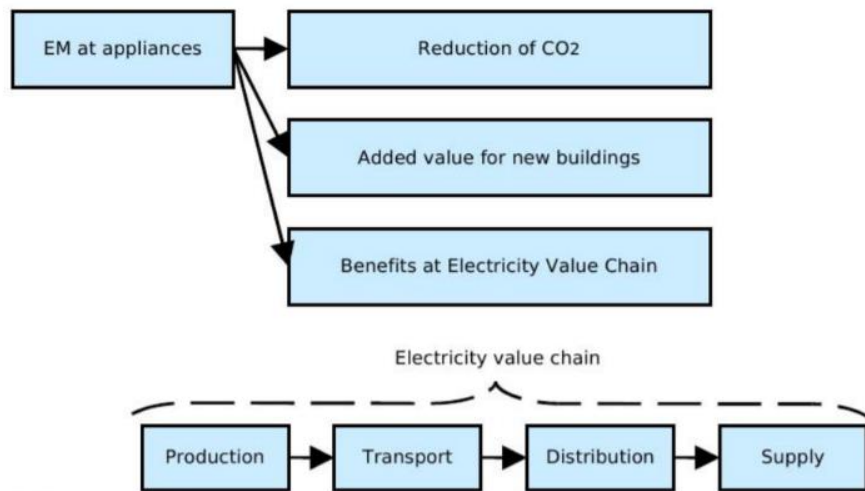
Εικόνα 4: Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας με επίκεντρο τον καταναλωτή [9]

Οι βασικοί στόχοι οι οποίοι επιδιώκονται με την Διαχείριση της Ενέργειας είναι οι εξής [3]:

- Η δυνατότητα πραγματοποίησης ανάλυσης κέρδους από την μείωση του κόστους για ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε τομείς όπως η θέρμανση, η ψύξη και ο φωτισμός. Η καταγραφή ιστορικών δεδομένων κατανάλωσης και εύκολη πρόσβαση ανά πάσα στιγμή σε αυτά μέσω των κεντρικών βάσεων δεδομένων, διευκολύνει τους καταναλωτές στο να προγραμματίσουν ευκολότερα την χρήση της ηλεκτρικής τους ενέργειας με βάση παράγοντες όπως η εποχή και οι καιρικές συνθήκες
- Ο ποσοτικός προσδιορισμός της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> που επιτυγχάνει η βέλτιστη κατανάλωση και η διαχείριση του φορτίου αποτελεί βασικότατο παράγοντα προστασίας του περιβάλλοντος.

- Η αναβάθμιση των υπηρεσιών παροχής ενός ηλεκτρικού συστήματος προσφέρει ευελιξία και αξιοπιστία σχετικά με την συνεργασία όλων των μερών που το συνθέτουν, δίνοντας κίνητρο σε όλο και περισσότερους πελάτες να συμμετέχουν σε αυτή την προηγμένη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην *Εικόνα 5* παρουσιάζεται η στρατηγική της μεθόδου Διαχείρισης της Ενέργειας. Έκολα γίνεται κατανοητό πως όλα τα στάδια της αλυσίδας της ενεργειακής διαχείρισης πρέπει να ληφθούν υπόψη.



*Εικόνα 5: Στρατηγική και Στάδια της Ενεργειακής Διαχείρισης [3]*

Ένα επιπλέον στοιχείο που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι πως οι καθημερινές δραστηριότητες των ανθρώπων που λαμβάνουν χώρα σε κάθε σπίτι, επηρεάζουν μεμονωμένα τη συνολική κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργώντας ξεχωριστά πρότυπα κατανάλωσης. Ως αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης, είναι ο συγχρονισμός πολλών νοικοκυριών - που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά καταναλωτικά πρότυπα τα οποία όμως συνδέονται σε κοινή πηγή- είναι η αύξηση της στιγμιαίας ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου με αρνητικές συνέπειες σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού της ηλεκτρικής ενέργειας (από ενεργητική, περιβαλλοντική και οικονομική πλευρά). Αυτό οφείλεται κυρίως στην παρουσία αιχμών ζήτησης, οι οποίες αυξάνουν το ενεργό ρεύμα των γραμμών μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου και προκαλούν υψηλές απώλειες ισχύος (για παράδειγμα λόγω του φαινομένου Joule). Επιπλέον, ένα ακόμη στοιχείο που καλείται να λύσει η Διαχείριση της Ενέργειας, είναι η ανομοιομορφία που παρατηρείται στο προφίλ

των καταναλωτών μεταξύ των ωρών κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το επιθυμητό προφίλ ισχύος των καταναλωτών, το οποίο περιέχει μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου και το οποίο επιδιώκουν να πετύχουν τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Απαιτείται δηλαδή μια όσο το δυνατόν επίπεδη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την επίτευξη καλύτερης εκμετάλλευσης των πρωτογενών πηγών ενέργειας [3].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ

#### 3.1 Ορισμός και Βασικοί Στόχοι

Τα προγράμματα Διαχείρισης της Πλευράς της Ζήτησης (ή Διαχείρισης Ζήτησης) (Demand Side Management - DSM) αποτελούν ως σύνολο μια συστηματική προσπάθεια αντιμετώπισης της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Εφαρμόζονται για τον έλεγχο της ενεργειακής κατανάλωσης από την πλευρά των καταναλωτών και αναγνωρίζονται ως πρωταρχικό στοιχείο ανάπτυξης των μελλοντικών ευφυών δικτύων [10].

Η έννοια της Διαχείρισης της Ζήτησης πρωτοεμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 ως προσπάθεια απάντησης στην αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και έχοντας την λογική την εξοικονόμησή της [11]. Ουσιαστικά, αποτελεί τον σχεδιασμό, την εφαρμογή και την παρακολούθηση όλων των δραστηριοτήτων, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να επηρεάσουν τους πελάτες ως προς την κατανάλωση της ηλεκτρικής τους ενέργειας με τελικό σκοπό την εμφάνιση σημαντικών πλεονεκτικών αλλαγών στην καμπύλη φορτίου. Περιλαμβάνει κάθε ενέργεια και δραστηριότητα που γίνεται από την πλευρά της ζήτησης σε ένα ενεργειακό σύστημα και περιλαμβάνει εφαρμογές οι οποίες καλύπτουν τομείς όπως η αντικατάσταση των παλαιών λαμπών πυρακτώσεως με νέας τεχνολογίας συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (CFL), η εγκατάσταση ενός εξελιγμένου δυναμικού συστήματος διαχείρισης φορτίου και η θέσπιση υπηρεσιών οικονομικού οφέλους τόσο για την πλευρά της παραγωγής όσο και της ζήτησης. Ενώ αρχικά οι εφαρμογές του τομέα Διαχείρισης της Ζήτησης αποτελούσαν βοηθητικά προγράμματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, θα μπορούσε πλέον να θεωρηθεί ως ένας τομέας "πελατο- κεντρικού" χαρακτήρα, με έμμεσο στόχο την τροποποίηση και αναβάθμιση των καταναλωτικών μας συνηθειών.

Αυτό που ενδιαφέρει τους οικιακούς καταναλωτές είναι αρχικά η όσο το δυνατόν χαμηλότερη χρέωση χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας και σε δεύτερο βαθμό η προστασία του περιβάλλοντος με την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Για να επιτευχθεί αυτό, οι στρατηγικές των προγραμμάτων Διαχείρισης της Ζήτησης επικεντρώνονται στους εξής δύο βασικούς στόχους [3]:

1. Μείωση Αιχμών Ζήτησης (Peak Shaving) σε επίπεδο μιας ολόκληρης χώρας. Τα βοηθητικά προγράμματα διαχειρίζονται τις ενεργειακές καταναλώσεις ολόκληρων ομάδων σπιτιών με σκοπό την μείωση των απωλειών ισχύος κατά την μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με την παραγωγή και την ποιότητα της ενέργειας.
2. Εξομάλυνση Ισχύος (Power Levelling), η οποία εφαρμόζεται σε κάθε οικία ξεχωριστά. Ένας μεμονωμένος διαχειριστής – πρόγραμμα εξυπηρέτησης φορτίου για κάθε σπίτι, έχει ως στόχο την διατήρηση της ισχύος κάτω από ένα ορισμένο όριο κατωφλίου. Αυτό το πετυχαίνει με την μετατόπιση (shifting) της λειτουργίας κάποιων οικιακών συσκευών σε περιόδους με φθηνότερο ενεργειακό κόστος και τη διατήρηση του στιγμιαίου φορτίου στα επιθυμητά όρια. Ο προτεινόμενος έλεγχος της εξομάλυνσης ισχύος περιλαμβάνει τόσο την άμεση διαχείριση του φορτίου (load management) όσο και τις λειτουργίες της έμμεσης διαχείρισης του ενεργειακού κόστους, οι οποίες σχετίζονται και με την επιστήμη των οικονομικών.

### **3.2 Αναγκαιότητα του Demand Side Management**

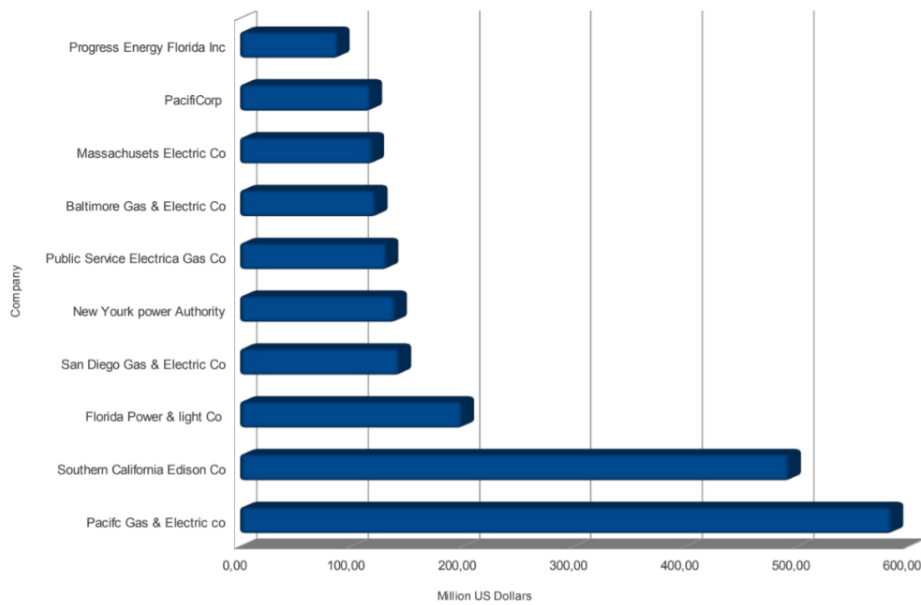
Τα καταναλωτικά πρότυπα ηλεκτρικής ενέργειας στα σύγχρονα συστήματα ισχύος τροποποιούνται με βάση την Διαχείριση της Πλευράς της Ζήτησης (DSM) με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής διαμόρφωσης της καμπύλης ζήτησης φορτίου. Η αξιοποίηση τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας, οικονομικά κίνητρα, οι λογαριασμοί χρέωσης, με τη μείωση της ζήτησης του φορτίου αιχμής αντί της ενίσχυσης της ικανότητας του δικτύου παραγωγής, διανομής και μετάδοσης αποτελούν τα κύρια θέματα μελέτης των προγραμμάτων Διαχείρισης της Ζήτησης. Χρησιμοποιώντας κατάλληλο τεχνολογικό εξοπλισμό σε συνδυασμό με την κατάλληλη μεθοδολογία, οι περίοδοι αιχμών (peak periods) της καμπύλης φορτίου του συστήματος διανομής μπορούν με

αποτελεσματικότητα να επαναπρογραμματιστούν με αποτέλεσμα την εξάλειψη της αστάθειας του συστήματος λόγω των υψηλών φορτίων κάλυψης [12].

Τα κύρια πλεονεκτήματα που καθιστούν αυτόν τον τομέα αναγκαίο στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα είναι τα εξής [12], [13]:

1. Μείωση του συνολικού κόστους: Κάποιες φορές, για την κάλυψη της υπερβολικής ζήτησης του ηλεκτρικού φορτίου, ορισμένες ειδικού τύπου γεννήτριες με πολύ υψηλές ονομαστικές τιμές και υψηλό κόστος, καλούνται να μπουν σε λειτουργία με σκοπό την κάλυψη των αυξημένων απαιτήσεων. Εάν το φορτίο αιχμής μετατοπιστεί σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης (non peak zone) τότε το σύστημα θα είναι λιγότερο φορτωμένο με συνέπεια να μην απαιτείται η ανάγκη ενεργοποίησης γεννητριών με υψηλό λειτουργικό κόστος και έτσι το τελικό συνολικό κόστος να μην αυξάνεται. Αν εφαρμόζεται δυναμικό σύστημα τιμολόγησης τότε η ελαχιστοποίηση του λόγου της μέγιστης προς την μέση ισχύ κατανάλωσης (Peak to Average Ratio ή PAR) μπορεί επίσης να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Ακόμη, η Διαχείριση της Ζήτησης διαδραματίζει έναν καθοριστικότατο ρόλο στην μείωση των δαπανών για την κατασκευή υποδομών παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι εναέριες γραμμές μεταφοράς και οι υποσταθμοί [12], [14].
2. Περιβαλλοντικά οφέλη: Με τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών συσκευών μπορούν να μειωθούν σε σημαντικό βαθμό οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς και η μέγιστη ζήτηση ισχύος να είναι μικρότερη με αποτέλεσμα την μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> και έτσι την μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
3. Αξιοπιστία και σταθερότητα δικτύου: Το DSM προσφέρει διάφορες βελτιώσεις με στόχο να διατηρήσει την αξιοπιστία και ευρωστία του συστήματος με την ελαχιστοποίηση της περιόδου ζήτησης του φορτίου αιχμής. Τεχνολογίες που συνεισφέρουν στην «αυτό-θεραπεία» του δικτύου συμβάλουν στην ομαλή εξάλειψη πιθανών διαταραχών και εξασφαλίζουν σταθερότητα στο σύστημα παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας [12], [15].

Στην Εικόνα 6, παρουσιάζονται τα ποσά που επένδυσαν τα τελευταία χρόνια οι μεγαλύτερες ενεργειακές εταιρείες των ΗΠΑ σε εκατομμύρια δολάρια. Αυτό που γίνεται εύκολα εμφανές είναι πως τα προγράμματα DSM κερδίζουν και θα κερδίζουν όλο και μεγαλύτερη παρουσία στα ηλεκτρικά συστήματα στο άμεσο μέλλον.



Εικόνα 6: Επενδύσεις στον τομέα Διαχείρισης της Ζήτησης στις ΗΠΑ [3]

### 3.3 Διαχείριση Ζήτησης και Τεχνολογίες Ευφύων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

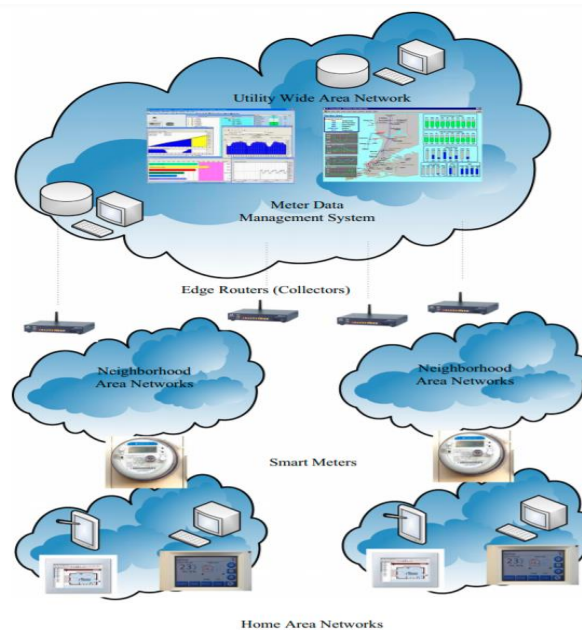
Όπως τονίστηκε και παραπάνω, τα τελευταία χρόνια οι επενδύσεις σε προηγμένες τεχνολογίες Ευφύων Δικτύων αυξήθηκαν σημαντικά. Στις ΗΠΑ, 9 δισεκατομμύρια δολάρια επενδύθηκαν σε υποδομές ευφύων δικτύων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νόμο Ανάκαμψης και Επανεπένδυσης (American Recovery and Reinvestment Act of 2009). Αυτή η ενέργεια, έστρεψε τα βλέμματα πάνω στα προηγμένα ηλεκτρικά συστήματα και αποτέλεσε έναυσμα στην πραγματοποίηση περισσότερων ερευνών πάνω στα Ευφυή Δίκτυα στα οφέλη τους για τη ζωή των ανθρώπων. Εφαρμόστηκαν πολλά πιλοτικά προγράμματα, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν πως πέτυχαν 25% -37% μείωση στην αιχμή ζήτησης [16].

Περαιτέρω αναλυτικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο να ποσοτικοποιήσουν τις δυνατότητες των Έξυπνων Δικτύων και να υλοποιήσουν μοντέλα για την εξοικονόμηση της ενέργειας. Για παράδειγμα, η μελέτη [17] προτείνει μία στρατηγική μετατόπισης φορτίου

που υλοποιείται με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης, ο οποίος επιτρέπει την διαχείριση μεγάλου αριθμού διαφορετικού τύπου ηλεκτρικών συσκευών με την μέγιστη απόδοση. Μία τεχνολογία που αξίζει να υπογραμμισθεί, είναι τα Προηγμένα Συστήματα Υποδομών Μέτρησης και Ελέγχου που χρησιμοποιούνται στα Έξυπνα Δίκτυα.

Ανάμεσα σε όλες τις συνιστώσες που δομούν ένα σύστημα, οι Έξυπνοι Μετρητές (Smart Meters) και οι Προηγμένες Υποδομές Μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure) αποτελούν κομμάτια ζωτικής σημασίας για την υλοποίηση των διαφόρων στρατηγικών του Demand Side Management.

Οι Προηγμένες Υποδομές Μέτρησης (AMI) είναι διαφορετικές από τους παραδοσιακούς αυτοματοποιημένους μετρητές (Automated Meter Reading, AMR) και των συστημάτων αυτόματης διαχείρισης μετρητών (Automatic Meter Management, AMM), με τα τελευταία να θεωρούνται ως υποσυστήματα των AMI. Ένα τέτοιο δίκτυο αποτελείται από μία σειρά ενσωματωμένων εφαρμογών και τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων δικτύων ευρείας ζώνης (WAN), οικιακών ή τοπικών δικτύων (HANs) συστημάτων διαχείρισης δεδομένων μετρήσεων (MDMS), συστήματα ενσωμάτωσης δεδομένων σε πλατφόρμες εφαρμογών λογισμικού και δίκτυα γειτονικών περιοχών (NANs), σύμφωνα με την *Εικόνα 7* [18].



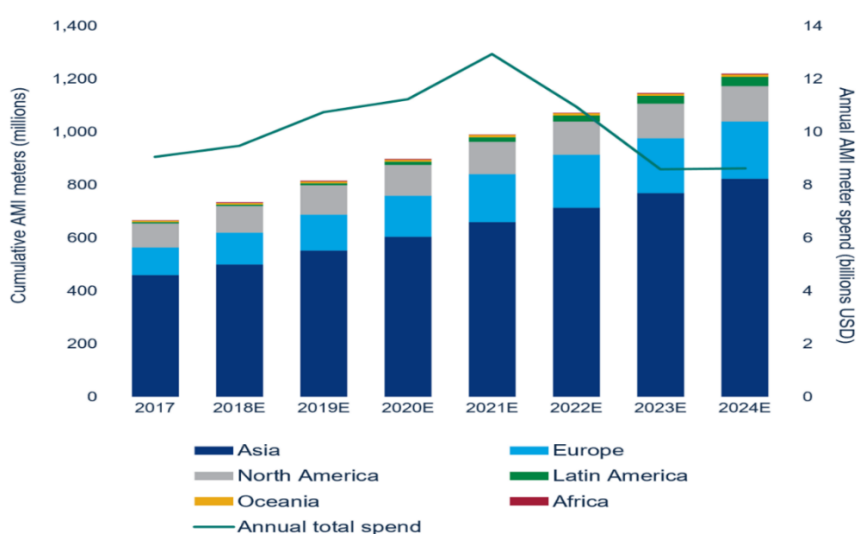
*Εικόνα 7: Σύστημα Προηγμένων Υποδομών Μέτρησης Ευφυούς Δικτύου [19]*



Ουσιαστικά το AMI υποδηλώνει ένα σύστημα το οποίο, κατόπιν αιτήματος ή βάσει προκαθορισμένου προγράμματος, μετράει και αναλύει τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας δεδομένα από συσκευές μέτρησης (Έξυπνοι Μετρητές) και χρησιμοποιώντας διάφορα μέσα επικοινωνίας [19].

Οι Έξυπνοι Μετρητές αποτελούν νέας γενιάς ηλεκτρονικές συσκευές καταγραφής, οι οποίοι επιτρέπουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των φορέων εξυπηρέτησης του φορτίου (LSE) – καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν σήματα επικοινωνίας κάθε χρονική στιγμή από την πλευρά της προμήθειας ενέργειας, όπως ποιο είναι το μέγιστο όριο προμήθειας της ισχύος για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα και ποιες είναι οι δυναμικές τιμές που διαμορφώνονται για την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας [19].

Εκτιμάται πως ο αριθμός των έξυπνων Μετρητών σε παγκόσμιο επίπεδο θα διπλασιαστεί σε σχέση με τα επίπεδα του 2017, δημιουργώντας έτσι νέες ευκαιρίες και προκλήσεις για έλεγχο από την πλευρά των καταναλωτών. Από τα 665,1 εκατομμύρια που ήταν το 2017, θα φτάσουν τα 1,2 δισεκατομμύρια το τέλος του 2024. Συνέπεια αυτής ραγδαίας αύξησης, οι συνολικές δαπάνες για τις νέες υποδομές θα διπλασιαστούν σχεδόν και από 73 δισεκατομμύρια δολάρια που ήταν το 2017 θα φτάσουν τα 145,8 το 2024. Στην *Εικόνα 8* βλέπουμε τις προβλέψεις αύξησης των έξυπνων μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας και τις συνολικές δαπάνες για το χρονικό διάστημα 2017- 2024 [20].



*Εικόνα 8: Αριθμός και Δαπάνες των Έξυπνων Μετρητών το διάστημα 2017- 2024 [20]*

Σε επίπεδο καταναλωτή, οι έξυπνοι μετρητές επικοινωνούν και ανταλλάσσουν δεδομένα τόσο με την πλευρά των χρηστών, όσο και με τους παρόχους υπηρεσιών. Το Οικιακό Δίκτυο (HAN) συλλέγει αυτόματα δεδομένα από τις διάφορες οικιακές συσκευές και τα μεταφέρει σε μία ενδιάμεση βάση δεδομένων, η οποία ανήκει στα δίκτυα των γειτονικών περιοχών (NANs), τα οποία χρησιμοποιούνται για την συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών. Στη συνέχεια, αυτά τα δεδομένα μεταφέρονται σε μία κεντρική βάση δεδομένων και χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς. Ο σκοπός των εταιρειών παροχής υπηρεσιών εξυπηρέτησης στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ανάλυση των συλλεγμένων δεδομένων με σκοπό την βελτιστοποίηση των λειτουργιών και του ενεργειακού κόστους των καταναλωτών. Ένα οικιακό δίκτυο (HAN), με την σύνδεση των έξυπνων μετρητών σε διάφορες ελεγχόμενες ηλεκτρικές συσκευές εφαρμόζει την ενεργειακή διαχείριση με χρήση συσκευών όπως οι προγραμματιζόμενοι θερμοστάτες επικοινωνίας και οι εσωτερικές οθόνες παρακολούθησης, οι οποίες αποτελούν ένα προηγμένο σύστημα διασύνδεσης των καταναλωτών με την αγορά [19].

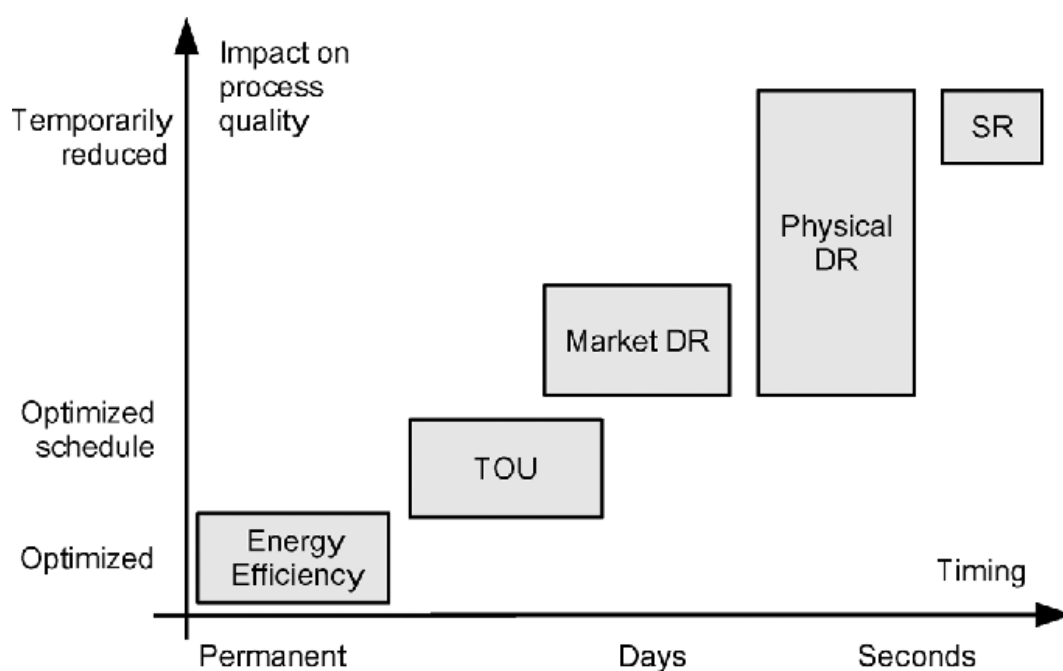
Ένα σύστημα Διαχείρισης των Δεδομένων Μέτρησης (Meter Data Management System) είναι μία βάση δεδομένων η οποία, χρησιμοποιώντας προηγμένα λογισμικά ανάλυσης, επικυρώνει και επεξεργάζεται τα δεδομένα προκειμένου αυτά να είναι πλήρη και ακριβή για τους καταναλωτές. Χρησιμοποιεί επίσης εργαλεία όπως αισθητήρες μέτρησης, αυτοματοποιημένα συστήματα διανομής και κατανεμημένα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών [19].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Ανάλογα με το χρονοδιάγραμμα και την επίδραση των εφαρμοζόμενων μέτρων στις λειτουργίες των φορτίων, το DSM μπορεί να ταξινομηθεί στις παρακάτω κατηγορίες, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 9* [21]:

- a) Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency - EE)
- b) Χρόνος Χρήσης (Time Of Use - TOU)
- c) Ανταπόκριση στη Ζήτηση (Demand Response - DR)
- d) Στρεφόμενη Εφεδρεία (Spinning Reserve - SR)



*Εικόνα 9: Κατηγορίες του τομέα Διαχείρισης Ζήτησης [21]*

#### 4.1 Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency)

Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 9*, στη χαμηλότερη κατηγορία του φάσματος του DSM βρίσκονται τα μέτρα που λαμβάνει ένας καταναλωτής, ή η εταιρεία διαχείρισης μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιτευχθεί η Ενεργειακή Απόδοση. Αυτός ο τομέας περιλαμβάνει όλες τις μόνιμες αλλαγές που υφίσταται ο εξοπλισμός, όπως η αντικατάσταση ενός παλιού και χαμηλής απόδοσης συστήματος εξαερισμού με νέο, πιο σύγχρονο ή βελτιώσεις στα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος (για παράδειγμα η προσθήκη επιπλέον μόνωσης σε ένα κτίριο) που στόχο έχουν να εξαλείψουν τις απώλειες και αν αυξήσουν την συνολική απόδοση. Τέτοιου είδους μέτρα οδηγούν σε άμεση και μόνιμη εξοικονόμηση ενέργειας, εκπομπών αερίου και επομένως αποτελούν μία αποδοτική μέθοδο εξοικονόμησης τεχνικών και οικονομικών πόρων [21].

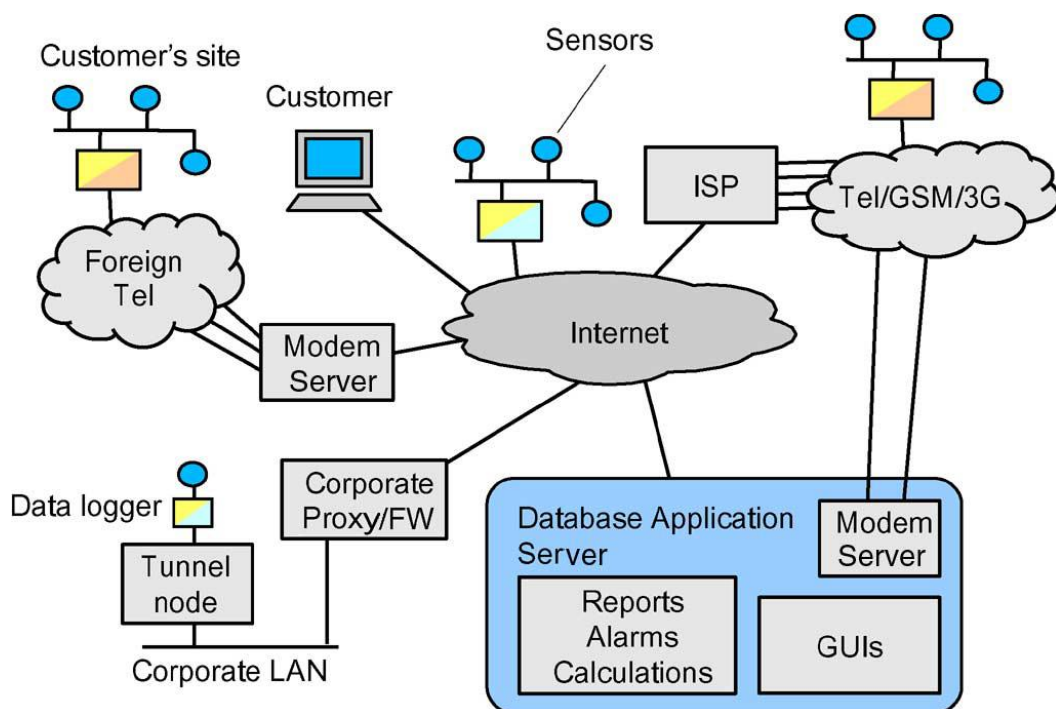
Η διαδικασία βελτίωσης της Ενεργειακής Απόδοσης κτιρίων ή βιομηχανικών εγκαταστάσεων ξεκινάει με την συλλογή πληροφοριών και γνώσης για τα προβλήματα και τις ανάγκες που αντιμετωπίζει ο κάθε πελάτης. Στην πραγματικότητα, κάθε εγκατάσταση έχει κρυμμένα προβλήματα τα οποία και συμβάλλουν στη σπατάλη ενέργειας. Διαρροές πεπιεσμένου αέρα, λανθασμένες ρυθμίσεις ελέγχου, σφάλματα σε εξοπλισμό είναι κάποια από τα διάφορα προβλήματα που μπορεί να υφίστανται σε μία εγκατάσταση [21].

Πολλές φορές τέτοιου είδους προβλήματα παραλείπονται, εκτός αν χρησιμοποιείται ένα Σύστημα Ανάλυσης Πληροφοριών (Energy Information System), το οποίο περιέχει μηχανισμούς και υποδομές απόκτησης δεδομένων όπως αισθητήρες και συστήματα καταγραφής. Ένας εξυπηρετής εφαρμογών (application server) λειτουργεί ως βάση δεδομένων (database), χρησιμοποιώντας αλγορίθμους και διαδικασίες υπολογισμών και αναλύσεων, σήματα προειδοποίησης και αναφοράς. Οι συνηθέστεροι υπολογισμοί που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής [21]:

- Σύγκριση του φορτίου βάσης (Baseline) με το φορτίο αιχμής (Peak Load): Το υψηλό φορτίο βάσης μπορεί να προέρχεται από την ισχύ αναμονής, η οποία οφείλεται στην ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν πολλές ηλεκτρονικές συσκευές πελατών όταν είναι απενεργοποιημένες αλλά εξακολουθούν να είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο ή από παλιό και κακό εξοπλισμό.

- Εβδομαδιαία σύγκριση χρονοσειρών δεδομένων: συχνά ο φωτισμός ή ο εξαερισμός λανθασμένα βρίσκονται σε λειτουργία τις βραδινές ώρες αλλά και τα σαββατοκύριακα.
- Συγκρίσεις/Αξιολογήσεις: Συγκρίνεται η συμπεριφορά ενός καταναλωτή με άλλους, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για πολύπλευρους καταναλωτές όπως οι αλυσίδες των σούπερ μάρκετ.
- Ανάπτυξη Διαδικασιών Συσχετίσεων: Διαμορφώνει έντονα τον συσχετισμό της κατανάλωσης ενέργειας ενός καταναλωτή με παραμέτρους όπως η εξωτερική θερμοκρασία ή το ηλιακό κέρδος (solar gains).

Επίσης, είναι εγκατεστημένα σημεία διασύνδεσης χρηστών (User Interfaces) για δυνατότητα οπτικοποίησης και παραμετροποίησης των δεδομένων. Η *Εικόνα 10* αποτελεί μία σχηματική αναπαράσταση ενός Διαδικτυακού Συστήματος Ανάλυσης Πληροφοριών (web-based energy information system):



*Εικόνα 10: Διαδικτυακό Σύστημα Πληροφοριών Ενέργειας [22]*

Εκτός από τα στοιχεία στατικής απόδοσης που αναφέρθηκαν παραπάνω για την μείωση του φορτίου, ένα ακόμη χαρακτηριστικό που γίνεται εμφανές είναι η δυναμική που παρέχεται στους χρήστες. Ένας έμπειρος ελεγκτής ή ένας προηγμένος αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να ερμηνεύσει τα καταναλωτικά πρότυπα και να εξάγει μεθόδους μείωσης των φορτίων αιχμής. Για παράδειγμα, εάν οι συμβάσεις παροχής ενέργειας επιβάλουν ποινές στους καταναλωτές για την δημιουργία αιχμών ζήτησης, θα ήταν ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

## 4.2 Χρόνος Χρήσης (Time Of Use)

### 4.2.1 Εισαγωγή στην Τιμολόγηση Χρόνου Χρήσης

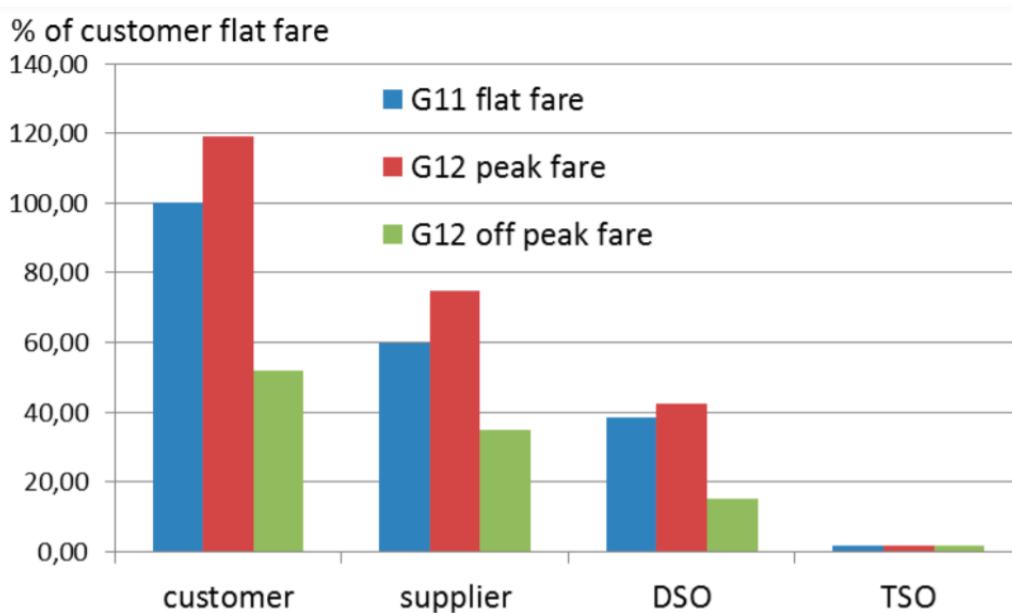
Ο Χρόνος Χρήσης (*Time of Use*) αποτελεί μία μέθοδο διαχείρισης φορτίου η οποία προτείνει τη μέτρηση και τη χρέωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των πελατών με βάση το χρονικό διάστημα που εκείνη πραγματοποιείται, δηλαδή το πότε εκείνη χρησιμοποιείται [23].

Οι χρεώσεις της ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη χρονική ζώνη όπου εκείνη καταναλώνεται (*Time of use zonal tariffs*) αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο ελέγχου της ζήτησης των καταναλωτών. Βασικά η τιμή θα είναι ακριβή σε περιόδους με υψηλές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και φθηνή σε περιόδους με χαμηλή ζήτηση. Οι τιμές γι' αυτές τις περιόδους είναι προκαθορισμένες και γνωστοποιούνται στους καταναλωτές εκ των προτέρων με σκοπό εκείνοι να προσαρμόσουν τις καθημερινές τους συνήθειες και τον τρόπο χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τις εκάστοτε χρεώσεις [24].

Στην *Εικόνα 11*, παρουσιάζονται οι σχέσεις τιμών ενός προγράμματος TOU 2 τιμολογιακών ζωνών χρέωσης της ηλεκτρικής ενέργειας "G12" (two zone tariff) για οικιακούς καταναλωτές σε σύγκριση με την σταθερή τιμή χρέωσής της "G11" (flat tariff) που προτεινόταν στους πελάτες της βορειοδυτικής Πολωνίας το 2013.

Αυτές οι χρεώσεις αποτελούνται από την τιμή παροχής της ενέργειας και τα τέλη μεταφοράς και διανομής του δικτύου, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με τις χρονικές ζώνες. Σύμφωνα με την ίδια εικόνα, οι συμμετέχοντες πελάτες επιβαρύνονται με βάση τις τιμές του προγράμματος Χρόνου Χρήσης (TOU) δύο ζωνών σε σχέση με την

σταθερή τιμολόγηση. Ένα μέρος των χρημάτων αντιστοιχούν σε έσοδα για την πλευρά της παραγωγής (supplier) και το υπόλοιπο μέρος αντιστοιχεί σε τέλη διανομής και μεταφοράς για τον Διαχειριστή του Συστήματος Διανομής (Distribution System Operator - DSO) και τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς (Transmission System Operator - TSO) της Ηλεκτρικής Ενέργειας αντίστοιχα [24].



Εικόνα 11: Τιμολόγηση Προγράμματος Χρόνου Χρήσης Καταναλωτών [24]

Ο βασικός σκοπός αυτού του είδους τιμολογίων είναι να επηρεάσουν τις καταναλωτικές συνήθειες, ενθαρρύνοντας τους πελάτες στο να μετατοπίσουν ένα μέρος του φορτίου τους εκτός των ζωνών αιχμής, γεγονός που θα διευκολύνει την παραγωγή ενέργειας και θα συμβάλλει στην καλύτερη χρήση και συντήρηση του εξοπλισμού. Η διαφοροποίηση των κομίστρων για κάθε τιμολογιακή ζώνη θα πρέπει να αντικατοπτρίζει και τα αναμενόμενα οφέλη που προκύπτουν από όλα τα μέρη που συμβάλλουν στην παραγωγή και διανομή της απαραίτητης ενέργειας.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της εφαρμογής του Χρόνου Χρήσης (TOU) αποτελεί η ευκαιρία να ικανοποιούνται ανάγκες υψηλής ζήτησης ενέργειας (όπως η θέρμανση) σε περιόδους χαμηλής ζήτησης φορτίου (off-peak), όπου είναι οι τιμές στην αγορά είναι

χαμηλότερες από τον μέσο όρο και το οποίο δίνει την ευκαιρία στην τιμή της ενέργειας να λάβει ανταγωνιστικές τιμές και να συγκριθεί με άλλες μορφές θέρμανσης.

Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (TSO) θα πρέπει να έχει ουσιαστική συμβολή στην προώθηση των τιμών των διαστημάτων αιχμής και κατώτατης ζήτησης αντίστοιχα. Η εισαγωγή διαφορετικών τιμών για κάθε χρονική ζώνη διαδραματίζει καθοριστική σημασία στη μείωση του αναμενόμενου φορτίου αιχμής και στην ισορροπία του ηλεκτρικού συστήματος.

Για την περίπτωση του Διαχειριστή του Συστήματος Διανομής (DSO) δεν μπορούμε να μιλήσουμε για τα πλεονεκτήματα της μείωσης του φορτίου αιχμής, λόγω της έλλειψης διαφοροποίησης τοπικών τιμών που δίνει τη δυνατότητα περιορισμού του φορτίου αιχμής σε ορισμένες περιοχές του δικτύου DSO [24].

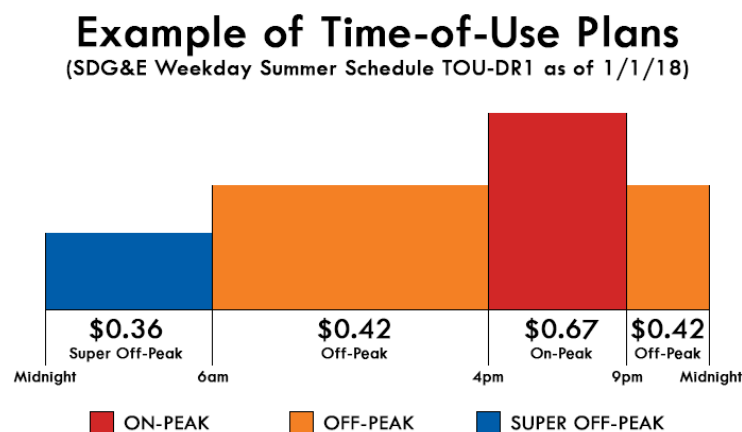
#### 4.2.2 Παράδειγμα Εφαρμογής Προγράμματος Χρόνου Χρήσης

Προσπαθώντας να εξηγήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα τη λειτουργία αυτών των προγραμμάτων, θα αναφέρουμε ένα παράδειγμα της αμερικάνικης εταιρείας “ San Diego Gas & Electric”. Οι εταιρείες παροχής υπηρεσιών κοινής ωφέλειας παρέχουν μεγαλύτερη χρέωσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη σε σχέση με τις βραδινές ώρες και οι δείκτες τιμών που παρέχει η μέθοδος ΤΟΥ διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιοχή και τη χρησιμότητα. Σύμφωνα με την αρχή της προσφοράς και της ζήτησης, αν αυξηθεί η τιμή της προσφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, τότε η ζήτηση θα μειωθεί και το αντίθετο. Σύμφωνα με την *Εικόνα 12*, κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας (1/1/2018), εφαρμόστηκαν 3 διαφορετικές τιμές χρέωσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε \$/kWh ως εξής [23]:

- Περίοδος αιχμής ζήτησης (On- Peak): Από τις 4 μ.μ. – 9 μ.μ. η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η υψηλότερη, γεγονός που οφείλεται στην πολύ υψηλή ζήτηση από την πλευρά των καταναλωτών. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού όπως οι εργαζόμενοι επιστρέφουν στα σπίτια τους. Καθημερινές συνήθειες όπως το πλύσιμο των πιάτων, η παρακολούθηση τηλεοπτικών προγραμμάτων συμβάλλουν στην αυξημένη ζήτηση ισχύος για την κάλυψή τους.



- Περίοδος μειωμένης ζήτησης (Off- Peak): Αφορά τα διαστήματα 6 π.μ. – 4 μ.μ. και 9 μ.μ. – 12 μ.μ., όπου η τιμολόγηση της ενέργειας είναι χαμηλότερη. Τις συγκεκριμένες ώρες μεγάλο μέρος του πληθυσμού όπως οι εργαζόμενοι και οι μαθητές βρίσκονται στους χώρους εργασίας και μελέτης τους αντίστοιχα ή σε διάφορες εξωτερικές δραστηριότητες. Η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος είναι αρκετά χαμηλή, με αποτέλεσμα να προσφέρεται και μείωση στην τιμή της.
- Περίοδος κατώτατης ζήτησης (Supper Off - Peak): Από τις 12 π.μ. -6 π.μ., όπου το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού κοιμάται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ελάχιστη, γεγονός που οδηγεί στην μειωμένη στο ελάχιστο τιμολόγηση της προσφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 12: Παράδειγμα Εφαρμογής Προγράμματος Χρόνου Χρήσης [23]

Σύμφωνα δηλαδή με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται κατανοητό πως αν ένας πελάτης – καταναλωτής θα χρειαστεί να καταναλώσει για την κάλυψη τις ίδιες kWh σε δύο διαφορετικής τιμολόγησης διαστήματα, θα πληρώσει και διαφορετικά ποσά. Ουσιαστικά, για την κάλυψη της ίδιας ανάγκης η χρέωση θα είναι διαφορετική, ανάλογα με την ώρα της ημέρας όπου αυτή πραγματοποιείται. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ο Χρόνος Χρήσης (Time Of Use) συμβάλλει στην μείωση ή αντίθετα στην αύξηση του τελικού λογαριασμού χρέωσης ενός καταναλωτή και αποτελεί τόσο σημαντικό παράγοντα στην οικονομική κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας.

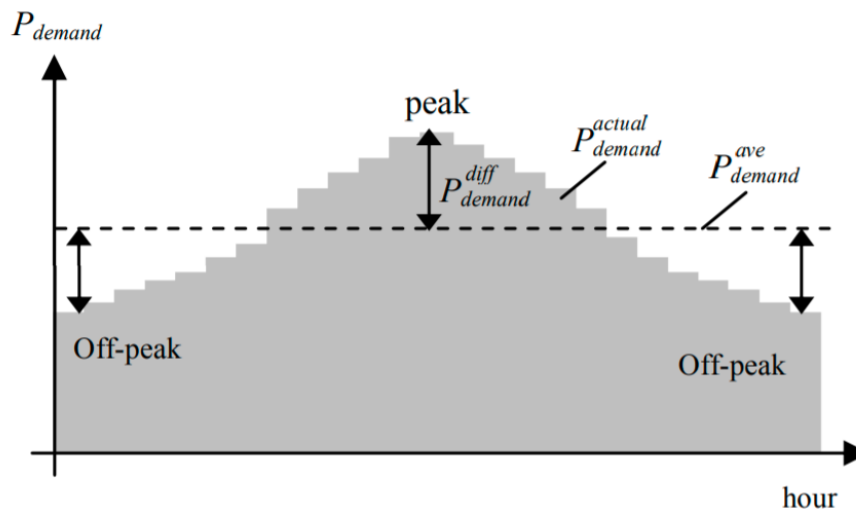
#### 4.2.3 Μεθοδολογία Ανάπτυξης Τιμών Χρόνου Χρήσης (Time Of Use Rates)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σκοπός του Χρόνου Χρήσης είναι να μεταβάλλει τα καταναλωτικά πρότυπα ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να μειωθούν οι αιχμές και η καμπύλη ζήτησης να αποκτήσει όσο το δυνατόν σταθερή μορφή. Παρατηρώντας την *Εικόνα 13*, η σκιασμένη περιοχή παριστά την πραγματική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας  $P_{d^{actual}}$ . Παρατηρούμε στο μέσο του γραφήματος πως η ζήτηση βρίσκεται στο σημείο αιχμής της. Η μέση τιμή της πραγματικής ζήτησης  $P_{d^{ave}}$  αντιπροσωπεύεται με την διακεκομμένη γραμμή, είναι ουσιαστικά το επιθυμητό προφίλ φορτίου και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση [25]:

$$P_{d^{ave}} = 1/24 \sum_{hour\ i=1}^{24} P_{d, hour\ i}^{actual} \quad (1)$$

Για κάθε ώρα  $i$  η διαφορά μεταξύ της πραγματικής ζήτησης και της μέσης τιμής της δίνεται από την σχέση:

$$P_{d, hour\ i}^{diff} = P_{d, hour\ i}^{actual} - P_{d^{ave}} \quad (2)$$



*Εικόνα 13: Πραγματική και Μέση Ζήτηση Κατανάλωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας [25]*

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής και της μέσης ζήτησης. Με δεδομένο ότι οι τιμές της διαφοράς σε κάποιες ώρες  $i$  μπορεί να λάβουν

αρνητικό πρόσημο, σε περίπτωση που η πραγματική ζήτηση είναι χαμηλότερη από τη μέση, στην μέθοδο που παρουσιάζεται η διαφορά είναι υψωμένη στο τετράγωνο.

Η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Min} \left\{ \sum_{\text{hour } i=1}^{24} (P_{d,\text{hour } i}^{\text{actual}} - P_{d,\text{ave}})^2 \right\} \quad (3)$$

Η ελαστικότητα τιμής για την ώρα  $i$  εκφράζεται ως:

$$\varepsilon_{\text{hour } i} = \frac{\% \Delta P_{d,\text{hour } i}}{\% \Delta \text{Price}_{\text{hour } i}} = \frac{\Delta P_{d,\text{hour } i} / P_{d,\text{hour } i}}{\Delta \text{Price}_{\text{hour } i} / \text{Price}_{\text{hour } i}} \quad (4)$$

$$\Delta P_{d,\text{hour } i} = \frac{\Delta \text{Price}_{\text{hour } i}}{E_{\text{hour } i}} \quad (5)$$

$$\text{Όπου } E_{\text{hour } i} = \frac{\text{Price}_{\text{hour } i}}{\varepsilon_{\text{hour } i} \times P_{d,\text{hour } i}}$$

Σε αυτήν την περίπτωση η μεταβολή στην τιμή είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής Time of Use για μια συγκεκριμένη ώρα και του σταθερού κόστους τιμής (fixed tariff). Οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας θα αντιδράσουν στην μεταβολή της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος από τη τρέχουσα σταθερή τιμή. Έτσι, η μεταβολή στην τιμή για την ώρα  $i$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta \text{Price}_{\text{hour } i} = \text{TOU}_{\text{hour } i} - \text{fixed tariff} \quad (6)$$

Υποθέτοντας ότι η πραγματική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται, καθώς εισάγεται ο Χρόνος Χρήσης (TOU), προκύπτουν τα παρακάτω:

$$P_{d,\text{hour } i}^{\text{actual}} = P_{d,\text{hour } i}^{\text{actual,old}} - \Delta P_{d,\text{hour } i} \quad (7)$$

$$P_{d,hour\ i}^{actual} = P_{d,hour\ i}^{actual,old} - \frac{\Delta Price_{hour\ i}}{E_{hour\ i}} \quad (8)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (8) στην (3) προκύπτει:

$$Min \left\{ \sum_{hour\ i=1}^{24} \alpha + \beta \Delta P_{d,hour\ i} + \gamma (\Delta P_{d,hour\ i})^2 \right\} \quad (9)$$

Όπου

$$\alpha = (P_{d,hour\ i}^{actual,old} - P_d^{ave})^2 \quad (10)$$

$$\beta = 2(P_{d,hour\ i}^{actual,old} - P_d^{ave}) / E_{hour\ i} \quad (11)$$

$$\gamma = \left( \frac{1}{E_{hour\ i}} \right)^2 \quad (12)$$

Για την διασφάλιση της δίκαιης τιμολόγησης Χρόνου Χρήσης (Time Of Use) το σύνολο της αύξησης της τιμής ενέργειας θα πρέπει να ισούται με το σύνολο της μείωσης. Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται από τον ακόλουθο περιορισμό:

$$\sum_{hour\ i=1}^{24} \Delta Price_{hour\ i} = 0 \quad (13)$$

Λύνοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\lambda = \frac{\sum_{hour\ i=1}^{24} \beta / 2\gamma}{\sum_{hour\ i=1}^{24} 1 / 2\gamma} \quad (14)$$

$$\Delta Price_{hour\ i} = \frac{\lambda - \beta}{2\gamma} \quad (15)$$

### 4.3 Ανταπόκριση στη Ζήτηση

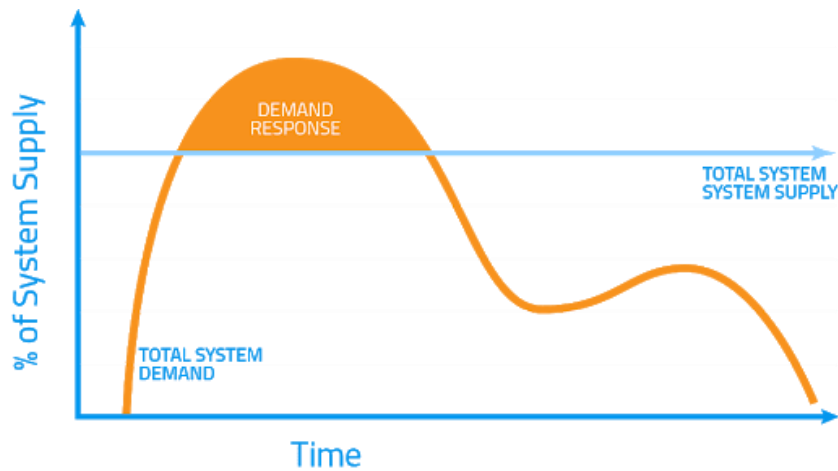
#### 4.3.1 Εισαγωγή στα Προγράμματα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση

Η Ανταπόκριση στη Ζήτηση (Demand Response) αποτελούσε κάποτε ένα νέο θεμελιώδη τρόπο ώστε να διατηρηθεί η ικανότητα και η χρησιμότητα του δικτύου στην βέλτιστη δυνατή της κατάσταση. Αντί ο διαχειριστής του συστήματος να ενεργοποιήσει πρόσθετες βιομηχανικές πηγές παραγωγής ενέργειας προκειμένου να καλύψει τις αυξημένες απαιτήσεις αιχμών φορτίου, η αντιστάθμιση της ζήτησης έρχεται από την πλευρά των καταναλωτών. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, οι διαχειριστές των δικτύων κοινής ωφέλειας, έχουν την δυνατότητα να αξιοποιήσουν τους βιομηχανικούς, εμπορικούς και οικιακούς καταναλωτές προς όφελος της ομαλής λειτουργίας και αξιοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος [26].

Σήμερα, οι νέες τεχνολογίες Demand Response μεταβάλλουν και διαμορφώνουν τα πρότυπα της τελικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας προσεγγίζοντας όσο το δυνατόν καλύτερα συνθήκες πραγματικού χρόνου (real time), ώστε να ανταποκρίνονται άμεσα σε σήματα τιμών ή οποιεσδήποτε άλλες ειδοποιήσεις από τις επιχειρήσεις μεταφοράς και διανομής του συστήματος. Ο βασικός λόγος για τον οποίο αυτά τα προγράμματα ονομάζονται “demand response” είναι το γεγονός ότι εμφανίζονται ως απάντηση σε ένα αίτημα για τον περιορισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με βάση αλλαγές στην τιμολόγηση ή σε περιόδους όπου οι τιμές της χονδρικής αγοράς είναι υψηλές ή τίθεται σε κίνδυνο η αξιοπιστία του συστήματος. Το Demand Response αποτελεί επίσης έναν σύγχρονο τρόπο ώστε οι τοπικά εγκατεστημένοι ενεργειακοί πόροι να προσθέσουν αμφίδρομη αξία τόσο στο ενεργειακό δίκτυο όσο και στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας [26].

Ουσιαστικά, ο συγκεκριμένος όρος αποσκοπεί στην εθελοντική μείωση κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να γίνεται κάποια άλλη τροποποίηση στην πλευρά των καταναλωτών. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 14*, η επίδραση ενός προγράμματος Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στην καμπύλη των καταναλωτών έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται η ισορροπία του συστήματος κάθε χρονική στιγμή, παρέχοντας στους

καταναλωτές ισχυρά κίνητρα ώστε να μετατοπίσουν τη ζήτησή τους κατά την περίοδο αιχμής.



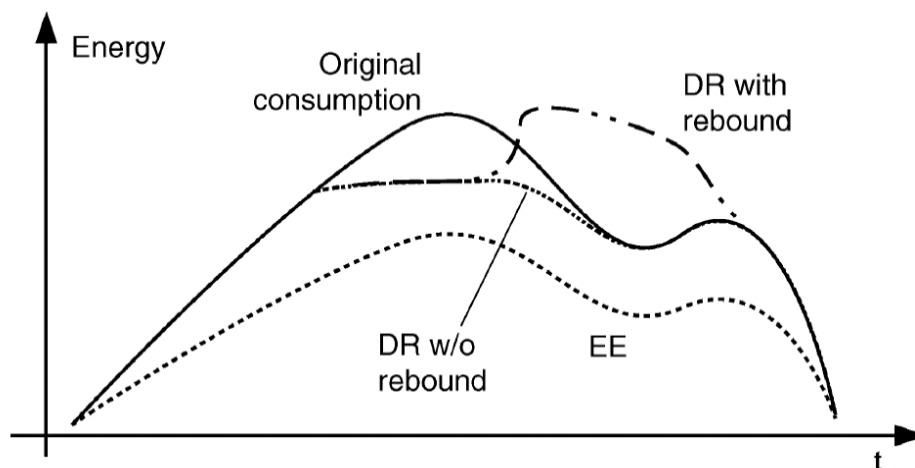
*Εικόνα 14: Επίδραση της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στην Συνολική Καμπύλη Ζήτησης των Καταναλωτών [26]*

Η μείωση – μετατόπιση της ζήτησης στις περιόδους αιχμής, βασισμένη στην ανταπόκριση των καταναλωτών έχει δημιουργήσει ποικίλες εφαρμογές και προγράμματα, όπως θα δούμε και στις ενότητες που ακολουθούν. Η συγκεκριμένη κατηγορία γίνεται όλο και πιο δημοφιλής και απαραίτητη για την σύγχρονη χονδρική και λιανική αγορά των ενεργειακών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των πλεονεκτημάτων και της ευελιξίας που εγγυάται [27].

Τα δυναμικά προγράμματα του DSM δεν μειώνουν απαραίτητα την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριος σκοπός τους είναι η τροποποίηση και διαμόρφωση των καταναλωτικών προτύπων με όφελος τόσο των καταναλωτών όσο των παραγωγών. Εάν διακοπεί η διαδικασία κατανάλωσης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θα μπορεί να συνεχιστεί σε κάποιο άλλο χρονικό σημείο για το οποίο οι συνθήκες θα το επιτρέπουν.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της μη μείωσης της τελικής κατανάλωσης αποτελεί το σύστημα άντλησης νερού, το οποίο μπορεί – λόγω των δεξαμενών αποθήκευσής του- να αποστραγγιστεί εύκολα μέσα σε χρονικό διάστημα 30 λεπτών. Μετά τη διαδικασία αποστράγγισης, το χαμένο νερό θα πρέπει και πάλι να αναπληρωθεί. Η συγκεκριμένη διαδικασία, ονομάζεται φαινόμενο ανάκαμψης και οδηγεί σε μη εξοικονόμηση της ενέργειας με αποτέλεσμα την δημιουργία νέας αιχμής ζήτησης, όπως παρουσιάζεται στην

παρακάτω εικόνα. Μερικές φορές το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί, αλλά να οδηγήσει με μειωμένη ποιότητα διεργασίας. Εάν ένα τέτοιο ιδεατό σύστημα “ξυρίσματος αιχμής” (peak shaving) εφαρμοζόταν σε σύστημα εξαερισμού, θα σήμαινε πως αν υπό κανονικές συνθήκες δούλευε στο 50 % και για την παραπάνω μισή ώρα που αναφέρθηκε είχαμε διακοπή λειτουργίας, θα απαγορευόταν η αντιστάθμιση αυτού του νεκρού χρόνου λειτουργίας με μισή ώρα στο 100 % λειτουργίας για την αποφυγή αιχμής ισχύος στην καμπύλη φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση, η επίδραση της Ενεργειακής Αναβάθμισης στον εξοπλισμό του συστήματος μέσω της χρήσης πιο αποδοτικού και ταυτόχρονα οικονομικού εξοπλισμού θα οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζεται και στην *Εικόνα 15* [21].



*Εικόνα 15: Επίδραση της Ενεργειακής Απόδοσης σε σχέση με την Ανταπόκριση στη Ζήτηση*  
[21]

#### **4.3.2 Βασικότερα Πλεονεκτήματα της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση**

Η Ανταπόκριση στη Ζήτηση δημιουργεί οφέλη κυρίως από την εξοικονόμηση πόρων που βελτιώνουν αισθητά την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι βασικό να εντοπιστεί η ροή αυτών των πλεονεκτημάτων μέσω της αγοράς ώστε να εξακριβωθεί ποιος κερδίζει και πόσο. Είναι επομένως σημαντικό να εντοπιστούν τα *βασικότερα πλεονεκτήματα* που προσφέρουν αυτά τα προγράμματα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω [18]:

1. Χαμηλότερα λειτουργικά κόστη και εξοικονόμηση στους λογαριασμούς χρέωσης των πελατών: Ίσως το μεγαλύτερο όφελος τόσο για την πλευρά της παραγωγής όσο και για τους καταναλωτές αποτελούν τα οικονομικά οφέλη που αποκομίζουν από την εφαρμογή των ανάλογων προγραμμάτων. Οι διαχειριστές των ενεργειακών συστημάτων παρέχοντας κατάλληλα κίνητρα στους συμμετέχοντες καταναλωτές, τους ενθαρρύνουν ώστε να μειώσουν τη ζήτησή τους όταν είναι αναγκαίο, έχοντας ως αποτέλεσμα την αποφυγή αύξησης της ισχύος παραγωγής τους, ώστε να καλύψουν τις απαιτούμενες αιχμές του φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζονται τόσο τα λειτουργικά τους κόστη και τα κόστη συντήρησης των εγκαταστάσεών τους, όσο και η τελική χρέωση των πελατών.
2. Εξοικονόμηση λογαριασμών πληρωμής άλλων πελατών: Οι χαμηλότερες τιμές στην χονδρική αγορά (wholesale market) που προκύπτουν από την Ανταπόκριση στη Ζήτηση (Demand Response) των καταναλωτών μεταφράζονται σε μειωμένο κόστος προσφοράς για τους πωλητές λιανικής (retailers), με συνέπεια όλοι σχεδόν οι πελάτες λιανικής να επωφελούνται συνήθως από την εξοικονόμηση των λογαριασμών τους.
3. Μεγαλύτερη σταθερότητα και ευρωστία του ηλεκτρικού δικτύου: Αξιοσημείωτο είναι το παράδειγμα των Η.Π.Α., όπου περίπου το 10 % του συστήματος παροχής ηλεκτρικής ισχύος έχει κατασκευαστεί με σκοπό να καλύψει τις συνθήκες αιχμής στη ζήτηση του φορτίου, οι οποίες αφορούν μόλις το 1 % των ωρών ενός έτους. Τα προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση επιτρέπουν στους διαχειριστές του δικτύου να αποδεσμεύουν μονάδες κάλυψης αιχμών, να εξοικονομούν κεφάλαια και με μικρότερο κόστος να αυξάνουν την δυνατότητα και αξιοπιστία ολόκληρου του δικτύου.
4. Βιωσιμότητα: Κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων αιχμής, το ηλεκτρικό δίκτυο κινδυνεύει από διακοπές και αστοχίες τροφοδοσίας (blackout) με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάγκη επαναφοράς μερικών από τους παλαιότερους και λιγότερο φιλικούς για το περιβάλλον σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Με την μετατόπιση (load shedding) των φορτίων κατά τη διάρκεια της αιχμής και τη



διατήρηση της λειτουργίας του δικτύου σε σταθερή κατάσταση, τα προγράμματα Demand Response συνεισφέρουν στην προστασία του συστήματος μέσω της διαχείρισης της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο (real-time), στην επίτευξη της μέγιστης απόδοσης του δικτύου και στην εξασφάλιση συνθηκών εφεδρείας [26]. Η εφαρμογή προγραμμάτων Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας προσδίδει αξιοπιστία, διότι σε ένα καλά σχεδιασμένο πρόγραμμα οι συμμετέχοντες βοηθούν στην μείωση του κινδύνου της έκθεσης του συστήματος σε αναγκαστικές διακοπές λειτουργίας, που δημιουργούν καταστάσεις αστάθειας και μειώνουν την απόδοση του συνολικού συστήματος.

5. Περιβαλλοντολογικά οφέλη: Τα περιβαλλοντολογικά οφέλη των προγραμμάτων DR είναι πολυάριθμα και περιλαμβάνουν καλύτερη αξιοποίηση της γης, ως απόρροια της αποφυγής εγκατάστασης νέων υποδομών παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι εναέριες γραμμές μεταφοράς και η βελτίωση της ποιότητας του νερού και του αέρα ως αποτέλεσμα της φιλικής προς το περιβάλλον αξιοποίησης των φυσικών πόρων [28].

Η Ανταπόκριση στη Ζήτηση επίσης προσφέρει και άλλα πλεονεκτήματα, τα οποία δεν είναι εύκολο να υπολογιστούν ή να ανιχνευτούν, αλλά μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σημαντικότερα από αυτά περιλαμβάνουν [29]:

1. Απόδοση της Αγοράς: Τα προγράμματα της Ανταπόκρισης της Ζήτησης δρουν ως αποτρεπτικός παράγοντας στην χρήση ισχύος στην αγορά η οποία προέρχεται από συμβατικές γεννήτριες παλαιού τύπου.
2. Βελτιωμένες επιλογές πελατών: Οι πελάτες έχουν περισσότερες επιλογές σχετικά με την διαχείριση της καταναλωτικής τους συμπεριφοράς και του κόστους
3. Ασφάλεια του Συστήματος: Μέσω των τεχνολογιών των προγραμμάτων Απόκρισης της Ζήτησης, οι διαχειριστές του ηλεκτρικού συστήματος έχουν μεγαλύτερη ικανότητα και ευελιξία στην αντιμετώπιση απρόβλεπτων καταστάσεων.

### 4.3.3 Γιατί το Demand Response είναι τόσο σημαντικό;

Τα προγράμματα Demand Response προσφέρουν μία μεγάλη ποικιλία οικονομικών και λειτουργικών οφελών, τόσο σε φορείς όπως οι διαχειριστές παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και για ολοκληρωμένες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αλλά και για τους ίδιους τους καταναλωτές.

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να επικρατούν τρία βασικά χαρακτηριστικά [30]:

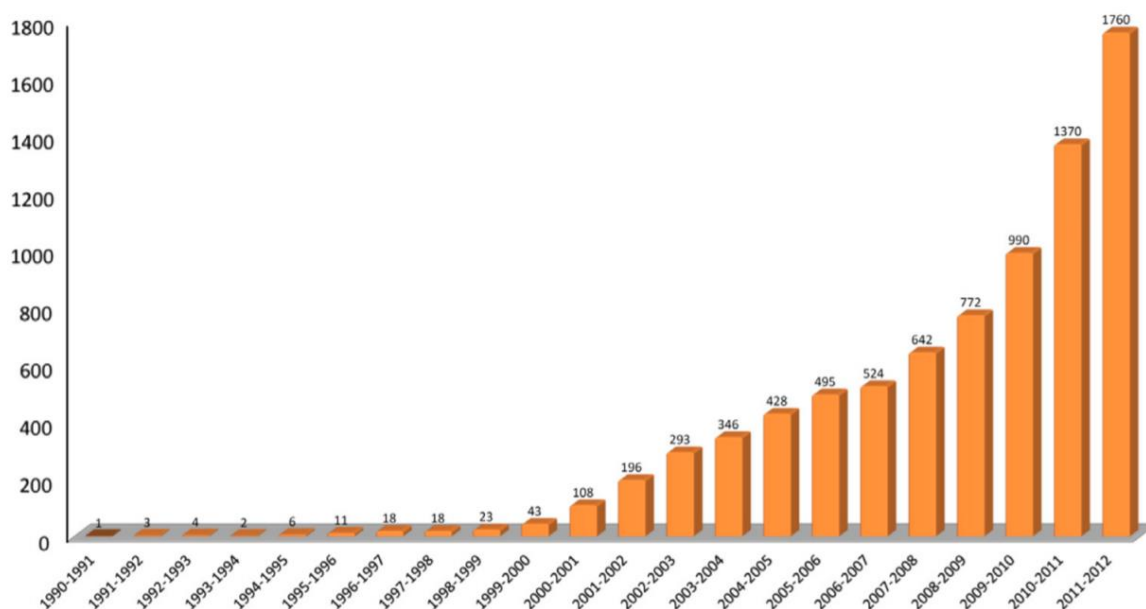
- *Πρώτον*, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί με οικονομικό τρόπο, θα πρέπει να υπάρχει πλήρης ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησής της.
- *Δεύτερον*, οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να μεταβληθούν στιγμιαία. Οι συνθήκες ζήτησης μπορούν επίσης να μεταβληθούν απροσδόκητα με αποτέλεσμα να προκύψουν ανισορροπίες μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, οι οποίες θα δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα σε όλο το δίκτυο.
- *Τρίτον*, οι επενδύσεις που γίνονται σε όλη την έκταση ενός ηλεκτρικού δικτύου, απαιτούν μεγάλα ποσά κεφαλαίων για να υλοποιηθούν και η ολοκλήρωσή τους απαιτεί συχνά μεγάλα χρονικά διαστήματα για να ολοκληρωθεί.

Γίνεται εύκολα κατανοητό πως το Demand Response επιδρά σε όλα αυτά τα χαρακτηριστικά διευκολύνοντας την εκτίμησή τους, τον προγραμματισμό τους και καθιστώντας το δίκτυο ικανό να λειτουργεί αδιάλειπτα, με αξιοπιστία σε πραγματικό χρόνο και χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Στην πραγματική αγορά, ο υψηλός ανταγωνισμός που επικρατεί αναγκάζει τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ή τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας του λιανικού εμπορίου να αγοράζουν ή να κατασκευάζουν περίπου το 60–95 % της ηλεκτρικής ενέργειας εκ των προτέρων, με την προοπτική ότι θα είναι σε θέση στο μέλλον να εξυπηρετήσουν την απαιτούμενη ποσότητα στην αγορά ικανοποιώντας όλα τους τα αιτήματα σε πραγματικό χρόνο.

Τέτοιου είδους προκλήσεις κάνουν την Ανταπόκριση στη Ζήτηση πολύτιμη, με τα προγράμματα της να προσφέρουν ευελιξία και δυνατότητα λήψης σωστών αποφάσεων με σχετικά χαμηλό κόστος. Οργανισμοί όπως ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Ηλεκτρικής

Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και άλλες οντότητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα προγράμματα αυτά για να περιορίσουν ή να μετατοπίσουν φορτία αντί να καταφύγουν σε παραδοσιακούς τρόπους διαχείρισης, όπως η αγορά νέων γεννητριών. Η σωστά δομημένη τιμολόγηση που προτείνουν τέτοια προγράμματα, είναι σε θέση να προσελκύσει νέους πελάτες, οι οποίοι με τη σειρά τους θα επωφελούνται από την εξοικονόμηση στο κόστος πληρωμής και τις αναβαθμισμένες υπηρεσίες παροχής.

Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται με το θέμα της διεύθυνσης των εφαρμογών DR στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με την *Εικόνα 16*, από το 2000 και έπειτα, σημειώνεται ραγδαία αύξηση των δημοσιεύσεων σχετικά με αυτό το θέμα.



*Εικόνα 16: Αριθμός δημοσιεύσεων πάνω στον τομέα της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση κατά την περίοδο 1990- 2012 [30]*

Η χρήση του DR τα τελευταία έτη, έχει διαδραματίσει σημαντικότατο ρόλο στην διαμόρφωση των τιμών της χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αυτή η εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων, οδήγησαν σε εντατική έρευνα και ανάπτυξη σε διάφορους τομείς, όπως η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των καταναλωτών μέσω Τεχνητής Νοημοσύνης και ο βέλτιστος προγραμματισμός.

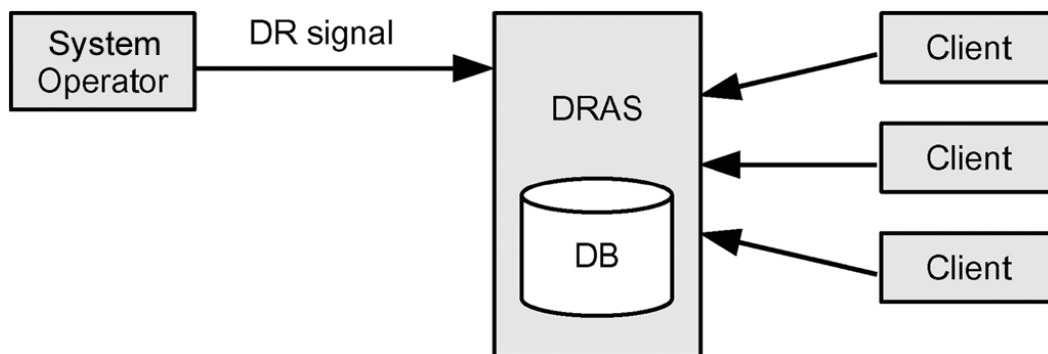
#### 4.3.4 Πρωτόκολλα και Πρότυπα των Προγραμμάτων Demand Response

Έχουν γίνει πολλές και συστηματικές προσπάθειες ώστε να δημιουργηθούν πρότυπα του Demand Response που σχετίζονται με τα Ευφυή Δίκτυα σε όλο τον κόσμο. Σύμφωνα με το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας της Αμερικής (NIST), έχουν διαμορφωθεί ρυθμιστικά πλαίσια εφαρμογής στα έξυπνα δίκτυα, με τη συμμετοχή φορέων από τον ακαδημαϊκό χώρο, τις επιχειρήσεις, την βιομηχανία και την κυβέρνηση.

Ένα σύγχρονο σύστημα αυτόματης Απόκρισης στη Ζήτηση αποτελεί το OpenADR, το οποίο αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Berkeley σε συνεργασία με επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας της Καλιφόρνια. Το OpenADR αποτελεί ένα σύστημα σχεδόν ανοιχτού βρόχου, το οποίο δεν χρησιμοποιεί σήματα ανάδρασης (feedback signals), είναι προσανατολισμένο στο μοντέλο πελάτη – διακομιστή και επιτρέπει την επικοινωνία των τιμών σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (real-time price) ως μέρος ενός γενικότερου σήματος [21].

Τα βασικότερα δομικά του στοιχεία παρουσιάζονται στην *Εικόνα 17* [21]:

- Διακομιστής Αυτοματισμού της Απόκρισης της Ζήτησης (Demand Response Automation Server - DRAS)
- Πελάτες DRAS στην πλευρά των καταναλωτών
- Το Διαδίκτυο ως υποδομή επικοινωνίας



*Εικόνα 17: Δομή του συστήματος OpenADR [21]*

Η πλευρά του πελάτη, περιέχει συχνά μία βιβλιοθήκη επικοινωνίας, η οποία χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές ώστε να δώσουν στο προϊόν τους τα χαρακτηριστικά του OpenADR. Οι πελάτες μπορούν να εγγραφούν στα προγράμματα DR, όπως το Demand Bidding και ο Αυτόματος Διακομιστής (DRAS) δρα ως απλή πλατφόρμα αγοράς και διαχείρισης των συνδρομών. Διατηρεί ουσιαστικά μία βάση δεδομένων για κάθε πελάτη που συμμετέχει στο πρόγραμμα.

Για παράδειγμα, εάν ο διαχειριστής ενός προγράμματος έκτακτης ανάγκης (Emergency demand response program) εκδώσει σήμα κάποιου μηνύματος έκτακτης ανάγκης στο DRAS, τότε με τη σειρά του ο διακομιστής προωθεί το μήνυμα σε όλους τους πελάτες οι οποίοι συμμετέχουν στο πρόγραμμα. Όλες οι συναλλαγές πρέπει να καταγράφονται, διότι τα οικονομικά κίνητρα συνδέονται άμεσα με την αντίδραση ενός πελάτη σε τέτοια γεγονότα.

Το πρότυπο- κλειδί για την εφαρμογή του Demand Response στα Ευφυή Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το ενεργειακό εγχείρημα OASIS (OASIS Energy Interoperation), το οποίο θεσπίστηκε από τον Οργανισμό Προώθησης Προτύπων Δομημένων Πληροφοριών (Organization for the Advancement of Structured Information Standards) [31].

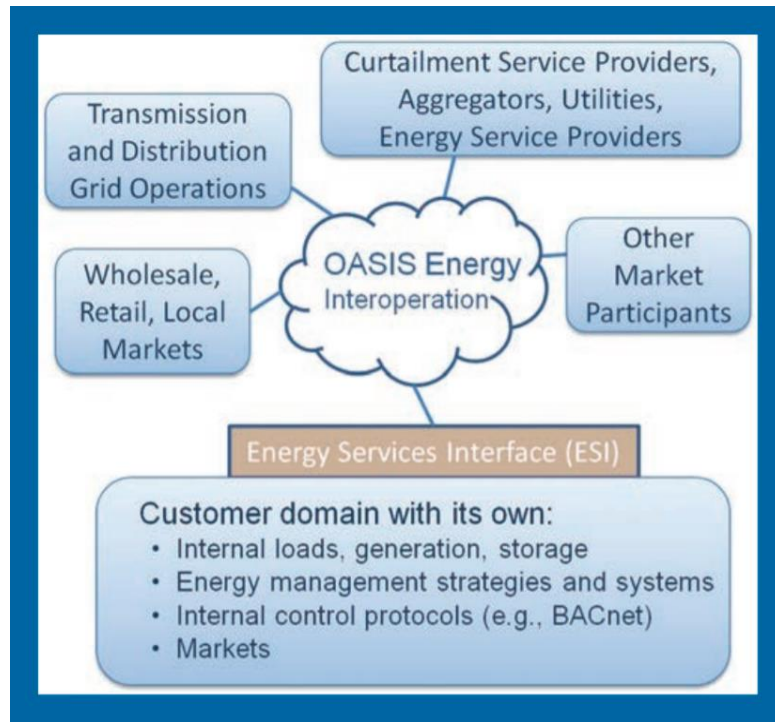
Το πρότυπο OASIS καθορίζει ένα μοντέλο πληροφοριών και μηνυμάτων τα οποία επιτρέπουν την τυπική επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, αλληλεπιδράσεις προσφορών και συμμετεχόντων στην αγορά και προβλέψεις (forecasting) για μελλοντική παραγωγή και πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στους συμμετέχοντες στα ενεργειακά προγράμματα. Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό εγγράφως του πεδίου εφαρμογής, της αρχιτεκτονικής του και τις υπηρεσίες που παρέχονται, συμπεριλαμβανομένων και Ενοποιημένων Γλωσσών Σχεδίασης Προτύπων (Unified Modeling Language), μαζί με περιγραφές υπηρεσιών σε σχήματα XML. Όλες οι τεχνικές προδιαγραφές και τα σχήματα είναι διαθέσιμα από το OASIS<sup>1</sup>.

Μία απλοποιημένη αναπαράσταση του προτύπου OASIS φαίνεται στην *Εικόνα 18*, όπου το OASIS δρα ως διαδικτυακό πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ των τελικών πελατών και των άλλων τομέων ενός Ευφυούς Δικτύου, όπως οι Διαχειριστές του δικτύου μεταφοράς

---

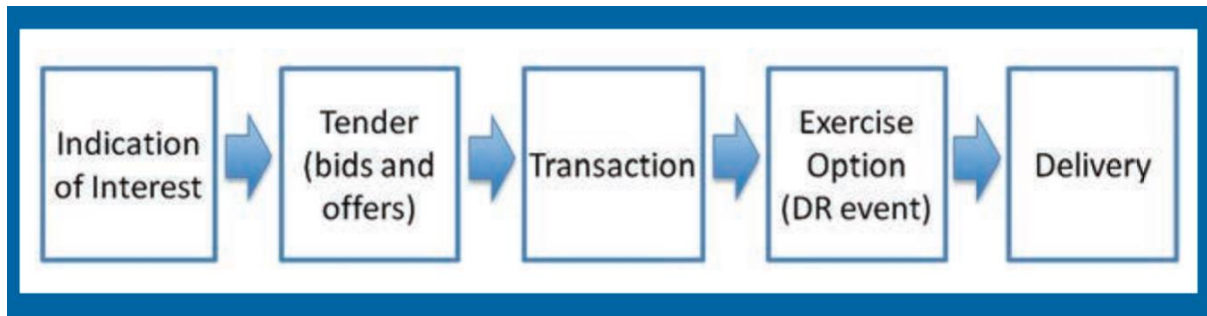
<sup>1</sup> <https://www.oasis-open.org/committees/>

και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (TSO & DSO), άλλοι πάροχοι υπηρεσιών ενέργειας και τομείς του λιανεμπορίου και τοπικών αγορών.



Εικόνα 18: Η ενεργειακή δια- λειτουργικότητα του OASIS χρησιμεύει ως άμεση απόκριση και πρωτόκολλο επικοινωνίας αγοράς για αλληλεπιδράσεις μεταξύ τομέων [31]

Η Ενεργειακή Δια-λειτουργικότητα (Energy Interoperation) αποτελείται από δύο βασικούς άξονες: τις επικοινωνίες για την Ανταπόκριση στη Ζήτηση (demand response communications) και τις αλληλεπιδράσεις της αγοράς (market interactions). Το παρακάτω διάγραμμα ροής της Εικόνας 19 αναπαριστά την τυπική διαδικασία αλληλεπιδράσεων της αγοράς και δείχνει σε ποιο στάδιο της διαδικασίας της συναλλαγής παρουσιάζεται η Ανταπόκριση στη Ζήτηση. Στην περίπτωση αυτή, ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης έχει μια προ- εκ τελεσθείσα εναλλακτική σύμβαση, σύμφωνα με την οποία ο ιδιοκτήτης συμφωνεί να προχωρήσει σε κάποια ενέργεια και να ασκήσει την επιλογή του όταν εμφανιστεί ένα γεγονός. Το συμβόλαιο έχει υπογραφθεί νωρίτερα, κατά την εγγραφή του πελάτη στο πρόγραμμα DR. Η παράδοση εκτελείται μόλις ο καταναλωτής προχωρήσει στην μετατόπιση του προβλεπόμενου φορτίου, όπως επαληθεύεται και από τον μετρητή της εγκατάστασης.



Εικόνα 19: Διαδικασία συναλλαγών στην ενεργειακή δια- λειτουργικότητα [31]

Οι περισσότερες από τις συναλλαγές που πραγματοποιούνται σήμερα στις ΗΠΑ πραγματοποιούνται στις αγορές χονδρικής πώλησης. Το συμβούλιο IRC<sup>2</sup> εργάστηκε στο να θεσπίσει μία κοινή προοπτική συνεργασίας μεταξύ των μελών για την ανταλλαγή των πληροφοριών που απαιτούνται για την υποστήριξη των επιχειρηματικών διαδικασιών των διαφορετικών εταιρειών διαχείρισης του Συστήματος Μεταφοράς και Διανομής (TSO & DSO) μαζί με τα DR προγράμματα της χονδρικής αγοράς και τις αλληλεπιδράσεις της. Στην πράξη, οι αγορές θα δημιουργούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών πλευρών με βάση κανονισμούς, οικονομικούς, πιστωτικούς και άλλους παράγοντες [31].

#### 4.3.5 Κατηγοριοποίηση του Demand Response

Τα προγράμματα Demand Response μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τύπο τους και τον τρόπο με τον οποίο οι συμμετέχοντες καταναλωτές ανταποκρίνονται σύμφωνα με το προφίλ του φορτίου τους.

##### **Ταξινόμηση Προγραμμάτων**

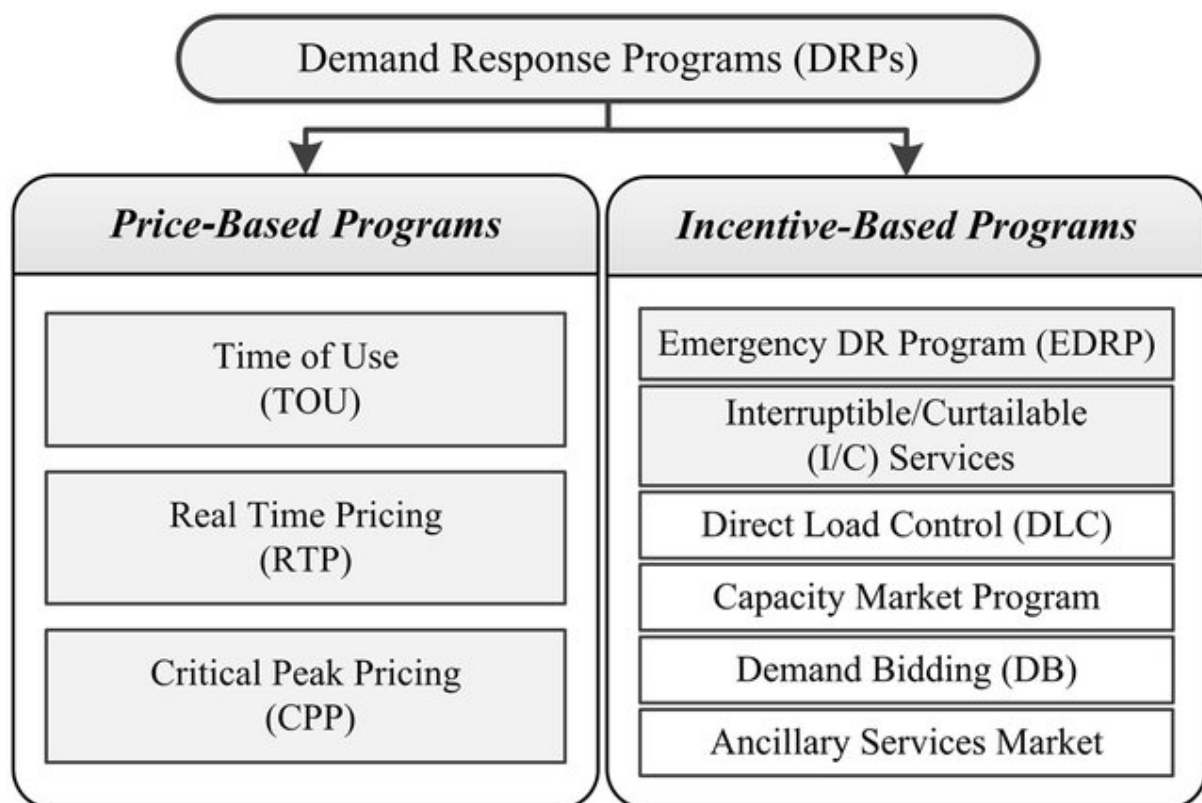
Σύμφωνα με τον τύπο τους, τα προγράμματα DR ταξινομούνται στις εξής δύο κατηγορίες [21]:

- a) Ως προγράμματα βασισμένα στις **Τιμές** (Price-Based DR)
- b) Ως προγράμματα βασισμένα σε **Κίνητρα** (Incentive-Based DR)

<sup>2</sup> <https://isorto.org/about-the-irc/>

Η βασική διάφορα μεταξύ των προγραμμάτων που ανήκουν σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες είναι πως στα προγράμματα που βασίζονται στα κίνητρα των καταναλωτών (Incentive-Based DR), προσφέρονται στους πελάτες πληρωμές για την επίτευξη της μείωσης ενός συγκεκριμένου ποσού φορτίου σε μία δεδομένη χρονική περίοδο, ενώ στα προγράμματα που βασίζονται στις τιμές (Price-Based DR) οι πελάτες ανταποκρίνονται εθελοντικά στη μείωση του φορτίου αντιδρώντας σε κάποια οικονομικά σήματα, ανάλογα με τις προσφερόμενες τιμές της αγοράς και δεν υπάρχει καθορισμένο ποσό φορτίου στο οποίο καλούνται να ανταποκριθούν [18].

Η κατηγοριοποίηση των προγραμμάτων Demand Response με βάση τον τύπο τους δίνεται στην *Εικόνα 20* (με τις επεξηγήσεις/περιγραφές που έπονται) και περιλαμβάνει τις εξής υποκατηγορίες [21]:



*Εικόνα 20: Κατηγοριοποίηση προγραμμάτων Ανταπόκρισης στη Ζήτηση [32]*



a) Προγράμματα βασισμένα στις **Τιμές** (Price-Based DR) [21]:

- **Τιμές Χρόνου Χρήσης (Time-Of-Use rates - TOU)**: όπου εφαρμόζεται ένα σταθερό πρόγραμμα τιμολόγησης ανάλογα με το χρονικό διάστημα κατανάλωσης
- **Τιμολόγηση σε Πραγματικό Χρόνο (Real-Time Pricing - RTP)**: όπου οι τελικοί καταναλωτές χρεώνονται με τιμές που ποικίλουν ανά σύντομα χρονικά διαστήματα
- **Κρίσιμη Τιμολόγηση Αιχμής (Critical Peak Pricing - CPP)**: όταν οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας προβλέπουν υψηλές τιμές στην χονδρική αγορά ή συνθήκες έκτακτης ανάγκης του συστήματος για κάποιες χρονικές περιόδους, προκαθορίζουν τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την αντιμετώπιση αυτών των καταστάσεων

b) Προγράμματα βασισμένα στα **Κίνητρα** (Incentive-Based DR) [21]:

- **Προγράμματα Απόκρισης σε έκτακτες ανάγκες (Emergency Demand Response Programs - EDRP)**: όπου οι συμμετέχοντες καταναλωτές ανταποκρίνονται εθελοντικά σε σήματα έκτακτης ανάγκης
- **Με δυνατότητα διακοπής/ περιορισμού τιμών (Interruptible/Curtailable rates – I/C)**: όπου οι πελάτες με αντάλλαγμα χαμηλότερες τιμές πρέπει να πρέπει να μειώσουν την ενεργειακή χρήση σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα, το οποίο αφορά συνήθως περιόδους υψηλής ζήτησης
- **Άμεσος Έλεγχος Φορτίου (Direct Load Control - DLC)**: όπου ο χειριστής ή η εταιρεία διανομής ισχύος έχει την δυνατότητα να ελέγχει ελεύθερα, να διακόπτει ή να αναβάλλει την κατανάλωση ενέργειας των πελατών με έναν τηλεχειριζόμενο διακόπτη
- **Προγράμματα Αγοράς Ισχύος (Capacity Market Programs)**: όπου οι πελάτες εγγυώνται να συνεισφέρουν στην κάλυψη των αναγκών του δικτύου όταν υπάρχει ανάγκη

- **Προγράμματα Υποβολής Προσφορών (Demand Bidding Programs - DB):** όπου οι πελάτες μπορούν να καταθέτουν προσφορές περιορισμών κατανάλωσης σε ελκυστικές τιμές
- **Βοηθητικές Υπηρεσίες Αγοράς (Ancillary Services Market):** Αποτελούν υπηρεσίες υποστήριξης του συστήματος ισχύος και είναι απαραίτητες για την διατήρηση της ποιότητας ισχύος και της αξιοπιστίας του δικτύου.

#### 4.3.6 Ανάλυση της Κάθε Στρατηγικής Μεμονωμένα

##### *α) Προγράμματα βασισμένα στις τιμές*

**Προγράμματα Τιμολόγησης με βάση τον χρόνο χρήσης (Time-of-use rates - TOU):** Όπως τονίστηκε και παραπάνω, η βασική ιδέα τιμολόγησης των τελικών χρηστών με βάση τον χρόνο χρήσης (TOU) της ηλεκτρικής ενέργειας είναι να αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά τις μεταβολές του κόστους παροχής της σε διαφορετικές περιόδους εντός μία ημέρας ή μίας ευρύτερης χρονικής περιόδου.

Δίκαιες και οικονομικές τιμές είναι ικανές να παρέχουν τα σωστά οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές για την επίτευξη της κατανομής των κοινωνικών πόρων. Ενώ το οριακό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται μέσα σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα, το μεγαλύτερο σύνολο των καταναλωτών χρεώνεται κατά γενικό επίπεδο με τις τιμές της λιανικής αγοράς ενέργειας που είναι σταθερές για μήνες ή και για χρόνια κάθε φορά, π.χ. οι αμετάβλητες σταθερές τιμές (flat rates) αντιπροσωπεύουν τον μέσο όρο του κόστους παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, οι σταθερές τιμές δεν λαμβάνουν υπόψη τους τη διαφορά κόστους τροφοδοσίας μεταξύ διαφορετικών χρονικών διαστημάτων, με αποτέλεσμα οι πελάτες με υψηλότερη αιχμή ζήτηση να ευνοούνται από εκείνους με την χαμηλότερη. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι προγραμμάτων TOU, όπως η τιμολόγηση peak/off-peak, η οποία διαμορφώνεται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, η εποχιακή τιμολόγηση, η οποία εξαρτάται από την εποχή, κ.λπ. Τις περισσότερες των περιπτώσεων, οι τιμές των προγραμμάτων TOU είναι προκαθορισμένες για περίοδο μηνών ή ακόμη και ετών. Στόχος είναι η προσέλκυση και η ενθάρρυνση των πελατών στη συμμετοχή των ανάλογων προγραμμάτων και η διαμόρφωση των κατάλληλων μοτίβων ζήτησης [18].

Διάφορες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για την Τιμολόγηση του Χρόνου Χρήσης των καταναλωτών, με τις σημαντικότερες από αυτές να προσανατολίζονται στις ακόλουθες πτυχές [35]:

- *Η απόκριση των πελατών στα προγράμματα ΤΟΥ.* Η διερεύνηση της νομοθεσίας σχετικά με την απόκριση των πελατών στα προγράμματα ΤΟΥ αποτελεί τον πυλώνα του καθορισμού λογικών τιμών και ταξινόμησης συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων. Ιστορικά στοιχεία της καμπύλης απόκρισης των πελατών καθορίζουν σημαντικότατο ρόλο στην ανάλυση της συμπεριφοράς των καταναλωτών. Με δεδομένο πως η ελαστικότητα της ζήτησης κρίνεται πιο κατάλληλη για ποσοτική ανάλυση, χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση προγραμμάτων DR. Για παράδειγμα, η ελαστικότητα των τιμών της ζήτησης που προέρχεται από την συνάρτηση υπερβατικού λογαριθμικού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας, η ελαστικότητα της συνολικής τιμής και η ελαστικότητα χρόνου- τιμής. Για να έχουμε μία μεγαλύτερης ακρίβειας εικόνα της συμπεριφοράς των πελατών σε ένα πρόγραμμα ΤΟΥ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πίνακας ελαστικότητας τιμών ζήτησης για να περιγράψει πιο ολοκληρωμένα τη συνολική ελαστικότητα της ζήτησης. Στον πίνακα αυτόν, η αυτό- ελαστικότητα και η διασταυρούμενη ελαστικότητα της ζήτησης χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά ενός πελάτη σε μία μεμονωμένη περίοδο ή σε πολλαπλές περιόδους [38].
- *Ο μηχανισμός εφαρμογής των προγραμμάτων ΤΟΥ.* Τα προγράμματα ΤΟΥ απαιτούν μετρητές οι οποίοι καταγράφουν την συνολική αθροιστική χρήση κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών διαστημάτων. Γενικά υπάρχουν δύο βασικοί μέθοδοι που σχεδιάζουν τις τιμές αυτών των προγραμμάτων. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στο κόστος παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας και η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση της απόκρισης του φορτίου [39], [40], [41].
  - Με βάση την πρώτη μέθοδο, η θεωρία τιμολόγησης της αιχμής του φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της τιμολόγησης αιχμής/ εκτός αιχμής (peak/off-peak) χρονικών περιόδων και η ανάλυση του οριακού κόστους για τον προσδιορισμό των επιπέδων τιμολόγησης των προγραμμάτων ΤΟΥ.

- Με βάση τη δεύτερη μέθοδο, ο πίνακας ελαστικότητας τιμών ζήτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση των προγραμμάτων ΤΟΥ. Η τιμή του οριακού κόστους και η ανάλυση της απόκρισης φορτίου συνδυάζονται με σκοπό να καθορίσουν τις τιμές των προγραμμάτων ΤΟΥ.
- *Η επίδραση των προγραμμάτων ΤΟΥ στα ηλεκτρικά συστήματα.* Μέσω του τρόπου λειτουργίας και τιμολόγησής τους, οι τιμές αυτών των προγραμμάτων προσδίδουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην αγορά ενέργειας και πλεονεκτήματα, όπως η μείωση των αιχμών ζήτησης. Στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αγοράζουν την ηλεκτρική ενέργεια στις μεταβαλλόμενες τιμές της χονδρικής αγοράς, ενώ την πωλούν σε σχετικά σταθερές τιμές στο λιανικό εμπόριο με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζουν το ρίσκο των οικονομικών συναλλαγών. Τα προγράμματα ΤΟΥ μπορούν να δημιουργήσουν μία αποτελεσματική και ομαλή σχέση μεταξύ των τιμών της χονδρικής και της λιανικής αγοράς και να βοηθήσουν τις επιχειρήσεις να διαχειριστούν αποτελεσματικά τους κινδύνους [35].

**Τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο (Real Time Pricing - RTP):** Η τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο (RTP) αποτελεί ένα σύστημα τιμολόγησης στο οποίο η τιμή χρέωσης της ηλεκτρικής ενέργειας ενημερώνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως ανά ώρα. Μέσω αυτών των προγραμμάτων οι πελάτες έχουν άμεση δυνατότητα γνώσης της διακύμανσης του κόστους στην χονδρική αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας ή σε μεταβολές της οριακής τιμής σε τοπικό επίπεδο.

Αυτή τη στιγμή, υπάρχουν δύο βασικά προγράμματα RTP για οικιακούς καταναλωτές στην αγορά των Η.Π.Α. Το ένα προσφέρεται από την PJM και το άλλο από την MISO (Midcontinent Independent System Operator). Και τα δύο προγράμματα ανακοινώνουν τις μελλοντικές τιμές τιμών της αγοράς μία ημέρα πριν από την πραγματική παράδοση της ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές. Παρόλα αυτά, η τιμολόγηση από καταναλωτή σε καταναλωτή παρουσιάζει διαφορές. Το πρόγραμμα της PJM, τιμολογεί τους καταναλωτές με βάση τιμές σε πραγματικό χρόνο, που διευθετούνται στο τέλος μιας ώρας η οποία

ανήκει στην πραγματική ημέρα διανομής της ισχύος και είναι οι μέσες τιμές ανά πεντάλεπτο εκείνης της ώρας. Από την άλλη πλευρά, το πρόγραμμα της MISO τιμολογεί τους χρήστες άμεσα και σύμφωνα με τις τιμές της επόμενης ημέρας [18].

**Προγράμματα κρίσιμης τιμολόγηση αιχμής (Critical peak pricing - CPP):** Τα προγράμματα της Κρίσιμης Τιμολόγησης Αιχμής (CPP) αποτελούν μία επικάλυψη των προγραμμάτων τιμολόγησης ΤΟΥ. Επιβάλλουν πολύ υψηλότερες χρεώσεις ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου στην οποία παρουσιάζεται η κρίσιμη αιχμή ζήτησης, κατά την οποία η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Σύμφωνα με τους όρους αυτών των προγραμμάτων, η στιγμή που θα εμφανιστεί και η χρονική διάρκεια μίας περιόδου αιχμής είναι προκαθορισμένη, όπως και ο μέγιστος αριθμός ημερών όπου εμφανίζονται τέτοιες κρίσιμες περιόδους κατά τη διάρκεια ενός έτους χωρίς όμως να προκαθορίζονται και οι συγκεκριμένες ημερομηνίες αυτών των γεγονότων.

Παρόλο που η τιμή χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ υψηλότερη κατά τη διάρκεια μίας κρίσιμης περιόδου αιχμής, στους πελάτες προσφέρονται μειωμένες τιμές κατά τη διάρκεια των υπόλοιπων ημερών του έτους, δίνοντάς τους με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά την τιμή του λογαριασμού χρέωσής τους με τον περιορισμό ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τα διαστήματα CPP [42].

#### **b) Προγράμματα βασισμένα στα κίνητρα**

**Προγράμματα ανταπόκρισης σε έκτακτες καταστάσεις (Emergency demand response programs - EDRP):** Τα προγράμματα Ανταπόκρισης των καταναλωτών σε έκτακτες ανάγκες αποτελούν τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα DR, κυρίως επειδή η συμμετοχή των καταναλωτών σε αυτά είναι εθελοντική και μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη στους συμμετέχοντες. Ουσιαστικά οι συμμετέχοντες σε αυτά τα προγράμματα έχουν την δυνατότητα στην εφαρμογή των σημάτων του δικτύου για μείωση της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου για ένα χρονικό διάστημα, έχοντας ως κίνητρο οικονομικά οφέλη στους λογαριασμούς τους [35].

**Προγράμματα διακοπής/ περιορισμού τιμών (Interruptible/curtailable rates programs):**

Τα συγκεκριμένα προγράμματα απευθύνονται κατά βάση σε μεσαίους και μεγάλους καταναλωτές, οι οποίοι ανταποκρινόμενοι στα αιτήματα του δικτύου σε έκτακτες περιπτώσεις, λαμβάνουν ένα ποσό έκπτωσης στον τελικό λογαριασμό χρέωσής τους ή ένα ποσό πίστωσης, ως αποτέλεσμα της μείωσης του φορτίου κατά τη διάρκεια αυτών των περιπτώσεων.

Γενικά αυτού του τύπου τα προγράμματα απαιτούν από τους συμμετέχοντες να υπογράφουν συμβόλαια, τα οποία συνήθως προσδιορίζουν το φορτίο βάσης των καταναλωτών, την διάρκεια διακοπής του φορτίου, την ικανότητα διακοπής κάθε συμμετέχοντος πελάτη και τα ποσά επιβολής ποινών σε περίπτωση μη ανταπόκρισης σε κάποιο αίτημα του διαχειριστή. Όπως και στις περιπτώσεις των DLC προγραμμάτων, οι συμβάσεις που υπογράφονται θα πρέπει να προσδιορίζουν το ποσό πληρωμής για κάθε διακοπή φορτίου, τον μέγιστο αριθμό αιτημάτων του δικτύου, καθώς επίσης και την χρονική διάρκεια μείωσης του φορτίου για το σύνολο των αιτημάτων. Σε περίπτωση όπου ένας καταναλωτής δεν ανταποκριθεί σε ένα αίτημα του διαχειριστή, τότε προβλέπεται επιβολή ποινών, ανάλογα με τους υπογεγραμμένους όρους κάθε συμβολαίου [35].

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιούνται μεγάλες έρευνες σχετικά με τα προγράμματα I/C, οι οποίες προσεγγιστικά συγκεντρώνονται στους εξής κλάδους [35]:

- a) Στον σχεδιασμό των κατάλληλων μηχανισμών εφαρμογής: Υπάρχουν δύο κύριοι μηχανισμοί εφαρμογής:
  1. Η σύναψη των I/C συμβάσεων, οι οποίες πρέπει να περιέχουν όλα τα χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές συμμετοχής των πελατών και τα πραγματικά κίνητρα, έτσι ώστε οι πελάτες να αποκαλύψουν τα πραγματικούς όρους διακοπής. Για τον σχεδιασμό συμβολαίων I/C χρησιμοποιούνται χρηματοοικονομικά μέσα, τα οποία ανάλογα με τις προθέσεις και την ικανότητα διακοπής του κάθε πελάτη μπορούν να διαφοροποιούνται. Για παράδειγμα, για την χρηματική αξία διακοπής της κατανάλωσης των συμμετεχόντων καταναλωτών ενός προγράμματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τετραγωνική συνάρτηση κόστους, οι παράμετροι της οποίας θα είναι διαφορετικοί για κάθε συμμετέχοντα

καταναλωτή, όπως θα δούμε και στο μοντέλο που θα υλοποιηθεί στην παρακάτω ενότητα.

2. Σχεδιασμός προγραμμάτων με υποβολή προσφορών, στα οποία οι συμμετέχοντες πελάτες έχουν το δικαίωμα να υποβάλουν προσφορές στον διαχειριστή του συστήματος σχετικά με τον περιορισμό της κατανάλωσής τους. Τέτοια προγράμματα, θεωρούνται γενικά ως προγράμματα της κατηγορία "Demand Bidding", τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

- b) Στην αξιολόγηση της επίδρασης αυτών των προγραμμάτων στην λειτουργία του συστήματος. Κάποια από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων είναι η μείωση του λειτουργικού κόστους του συστήματος και η αντιστάθμιση από την πλευρά των εταιρειών διαχείρισης του φορτίου του κινδύνου των τιμών της αγοράς (price risk). Οπότε είναι εύκολα αντιληπτό πως ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός τέτοιων προγραμμάτων συμβάλλει καθοριστικά στην μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής και ζήτησης.

**Άμεσος Έλεγχος Φορτίου (Direct Load Control – DLC):** Τα προγράμματα Άμεσου Ελέγχου Φορτίου είναι συνήθως προγράμματα που απευθύνονται στο ευρύ καταναλωτικό κοινό της αγοράς και αφορούν κυρίως μικρούς εμπορικούς καταναλωτές – αυτών των οποίων η ζήτηση αιχμή ζήτησης δεν υπερβαίνει τα 100 KW – καθώς και οικιακούς πελάτες.

Τα προγράμματα DLC που παρέχουν οι εταιρείες κοινής ωφέλειας βασίζονται σε όρους συμβολαίων, δίνοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα στους διαχειριστές να διακόπτουν ή να ενεργοποιούν εξ αποστάσεως τα φορτία των πελατών σε περιόδους υψηλής ζήτησης και εκτάκτων συνθηκών, λαμβάνοντας ως αντάλλαγμα πλεονεκτήματα στους λογαριασμούς χρέωσης της ηλεκτρικής ενέργειας για την συμμετοχή τους. Επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στις ΗΠΑ που παρέχουν προγράμματα DLC μικρών εμπορικών καταναλωτών είναι η PSEG Long Island, η Florida Power & Light και η Southern California Edison [33]. Τα συγκεκριμένα προγράμματα που παρέχονται, βασίζονται σε κάποιους περιορισμούς [34]:

- Αρχικά, αφορούν μόνο περιπτώσεις έκτακτων συνθηκών, έτσι ώστε να μην μπορούν να εκμεταλλεύονται ανά πάσα στιγμή τα πλεονεκτήματα ελέγχου της λειτουργίας των συσκευών των πελατών.
- Επίσης, όταν η συμμετοχή των πελατών σε ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι μαζική, ο σχεδιασμός της στρατηγικής του κεντρικού ελέγχου ενός τέτοιου προγράμματος είναι πολύπλοκος, τόσο από άποψη υπολογισμού όλων των κρίσιμων παραμέτρων, όσο και από πλευράς επικοινωνίας μεταξύ όλων των πελατών – διαχειριστών του προγράμματος.
- Τέλος, άλλο ένα μειονέκτημα ενός προγράμματος DLC και αφορά τους συμμετέχοντες πελάτες είναι το γεγονός της ιδιωτικότητάς τους, καθώς το προφίλ κατανάλωσής τους είναι εκτεθειμένο κάθε φορά που μία συσκευή ενός κτιρίου ελέγχεται απομακρυσμένα από έναν κεντρικό διαχειριστή.

Γενικά, τα προγράμματα DLC είναι σχετικά απλά και χαμηλού κόστους εφαρμογής.

**Προγράμματα Αγοράς Ισχύος (Capacity market programs):** Σε αυτού του είδους τα προγράμματα, τα οποία αποτελούν μία μορφή διασφάλισης, οι συμμετέχοντες με αντάλλαγμα εγγύηση στις πληρωμές τους, δεσμεύονται να παρέχουν προ- καθορισμένες μειώσεις φορτίου σε ενδεχόμενες απρόβλεπτες καταστάσεις του ηλεκτρικού συστήματος και υπόκεινται σε κυρώσεις όταν δεν ανταποκρίνονται στους όρους των συμβολαίων. Παρόλο που μπορεί οι μειώσεις του ηλεκτρικού φορτίου να μην καλούνται, οι πελάτες θα πληρώνονται μόνο και μόνο για την ετοιμότητά και την συμμετοχή τους στα προγράμματα.

Τα προγράμματα αγοράς ισχύος προσφέρονται κυρίως από εταιρείες παροχής της χονδρικής αγοράς ενέργειας. Εκτός από τους όρους υποχρέωσης των πελατών σχετικά με την υποχρέωσή τους στο να περιορίζουν το φορτίο τους όταν είναι αναγκαίο, η καταλληλότητα ενός τέτοιου είδους προγράμματος βασίζεται στην απόδειξη ότι οι μειώσεις φορτίου είναι εφικτές και βιώσιμες για τους καταναλωτές. Για παράδειγμα, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής του Ηλεκτρικού Συστήματος της Νέας Υόρκης (NYISO), προβλέπει τις ακόλουθες απαιτήσεις για την λήψη πληρωμών για τα προγράμματα αγοράς ισχύος: ελάχιστες μειώσεις φορτίου των 100 KW με ελάχιστη διάρκεια μείωσης τεσσάρων ωρών, δύο ώρες νωρίτερα ειδοποίηση για κάθε τυχόν μείωση και να πραγματοποιείται μία δοκιμή ή έλεγχος ανά κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο



(capability period). Αυτές οι απαιτήσεις έχουν σχεδιαστεί ώστε να διασφαλίσουν πως οι απαραίτητες μειώσεις μπορούν να υπολογίζονται όταν είναι αναγκαίο. Αποδείχθηκε ότι οι τα συγκεκριμένα επίπεδα πληρωμών οδήγησαν στην αύξηση ενδιαφέροντος από πλευράς πολιτών στην συμμετοχή αυτών των προγραμμάτων [37].

**Προγράμματα Υποβολής Προσφορών (Demand bidding programs - DB):** Τα προγράμματα Υποβολής Προσφορών παρέχουν στους καταναλωτές τη ευκαιρία να συμμετέχουν ενεργά στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας με τη δυνατότητα υποβολής προσφορών μείωσης του φορτίου κατανάλωσης.

Κάποιες κατηγορίες αυτών των προγραμμάτων, δίνουν τη δυνατότητα στους συμμετέχοντες να ορίσουν οι ίδιοι την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην οποία είναι πρόθυμοι, μέσω της μείωσής της, να την πουλήσουν. Σε άλλα είδη προγραμμάτων, ο διαχειριστής των προγραμμάτων ή του δικτύου καθορίζει την τιμή την οποία επιθυμούν να πληρώσουν και οι καταναλωτές καθορίζουν το ποσό της ενέργειας το οποίο είναι πρόθυμοι να μειώσουν μέσω της ζήτησης. Στη συνέχεια όλες οι προσφορές των πελατών συγκρίνονται, μαζί με αυτές που παρέχονται από ανεξάρτητες γεννήτριες και ταξινομούνται από την χαμηλότερη προς την υψηλότερη προσφορά, έως ότου ικανοποιηθεί η ζητούμενη μείωση της ζήτησης [33].

Στις απελευθερωμένες αγορές της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου τα προγράμματα Υποβολής Προσφορών έχουν διεισδύσει, οι συμμετέχοντες είναι κυρίως μεγάλοι εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές και χρησιμοποιούν προηγμένα εργαλεία διαχείρισης του φορτίου. Στην αγορά των ΗΠΑ ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής του συστήματος της Νέας Υόρκης (New York Independent System Operator), το Συμβούλιο Ηλεκτρικής Αξιοπιστίας του Τέξας (Electric Reliability Council of Texas), η Pacific Gas and Electric Company, η Southern California Edison και η San Diego Gas and Electric, εφαρμόζουν με επιτυχία προγράμματα Υποβολής Προσφορών.

Συνολικά υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες προγραμμάτων Demand Bidding [35]:

- a. Προσφορά για συνολική ζήτηση, όπου το σύνολο της ζήτησης συμμετέχει στον ανταγωνισμό της αγοράς και περιλαμβάνει τις παρακάτω μορφές:

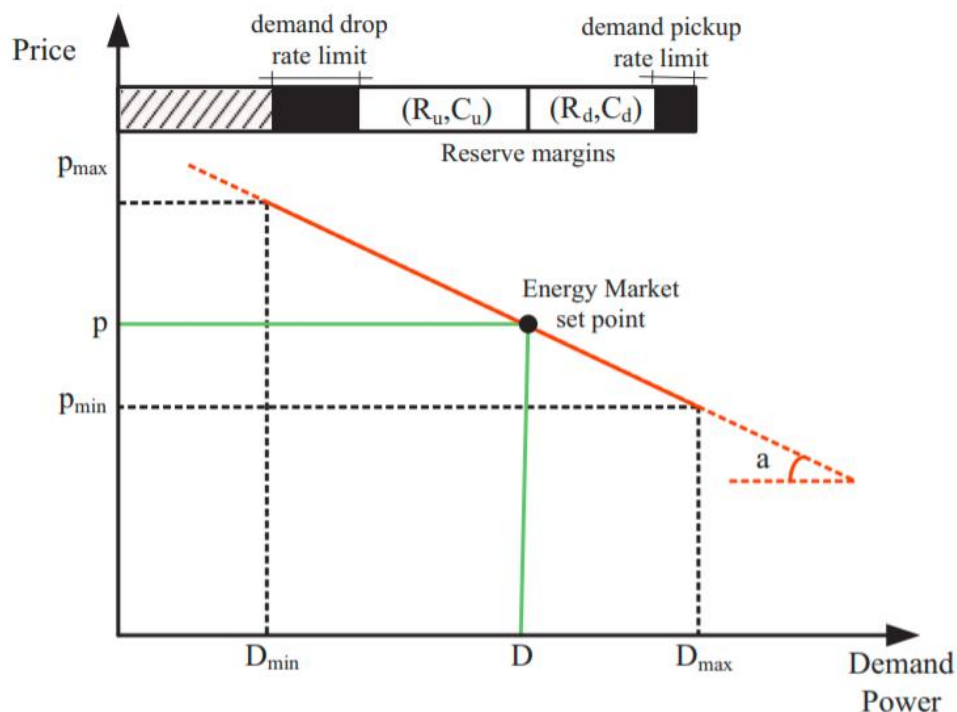
- a1. Οι πελάτες και οι φορείς εξυπηρέτησης του φορτίου υπογράφουν διμερή συμβόλαια με την πλευρά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αφορούν καθορισμένες ποσότητες ενέργειας σε σταθερή τιμή, π.χ. για περιπτώσεις άμεσης αγοράς ποσοτήτων ενέργειας για την εξυπηρέτηση μεγάλων καταναλωτών.
- a2. Οι φορείς εξυπηρέτησης του φορτίου, οι λιανοπωλητές και η υψηλής ισχύος καταναλωτές μπορούν να υποβάλουν την συνολική τους ζήτηση στην αγορά, δηλαδή να μπορούν να παρέχουν καμπύλες και προφίλ προσφορών για την πλευρά της ζήτησης, όμοια με τις καμπύλες και τα προφίλ που παρέχονται από την πλευρά της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποια μοντέλα που αντιπροσωπεύουν αυτή τη μορφή είναι οι γραμμικές καμπύλες προσφορών για τους πωλητές της λιανικής αγοράς στην Σκανδιναβία, και το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής της ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τις στρατηγικές ρίσκου με την ενσωμάτωση της πρόβλεψης των τιμών [36].
- b. Προσφορά για μεταβολή της ζήτησης: αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει μία μεγάλη ποικιλία τύπων, σύμφωνα με τους οποίους οι πελάτες μπορούν να συμμετέχουν στην αγορά της ενέργειας προσφέροντας αποθέματα ενέργειας από την πλευρά της ζήτησης και συνεπώς να καλύπτουν τυχόν αύξησή της και να υποβάλουν προσφορές για την διαχείριση έκτακτων καταστάσεων. Υπάρχει η δυνατότητα ένας πελάτης να συμμετέχει στη διαδικασία προσφορών σε πραγματικό χρόνο, καθώς επίσης για προσφορές που αφορούν την επόμενη ημέρα.

Τα προγράμματα Demand Bidding συμβάλλουν ουσιαστικά στην διατήρηση της ικανότητας και αξιοπιστίας του συστήματος και δρουν ως παράγοντας βελτίωσης της ελαστικότητας της ζήτησης.

Στο παρακάτω διάγραμμα της *Εικόνας 21*, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα Υποβολής Προσφορών. Όμοια με τις προσφορές που υποβάλλονται από την πλευρά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι προσφορές της πλευράς της ζήτησης μπορεί να είναι απλής ή σύνθετης μορφής, μονού ή διπλού τύπου. Μια απλή και μονή προσφορά (single bid) αφορά την συμμετοχή σε μία μόνο δομή αγοράς, ενώ μία διπλού τύπου προσφορά αφορά την συνδυασμένη συμμετοχή σε δύο διαφορετικές αγορές. Ακόμη, μπορεί να περιέχει

ειδικές συνθήκες, όπως η ελάχιστη κατανάλωσή ηλεκτρικής ενέργειας ( $D_{min}$ ) και η μέγιστη κατανάλωσή της ( $D_{max}$ ).

Παρατηρώντας την αρνητική κλίση του διαγράμματος και υποθέτοντας γραμμική σχέση μεταξύ τιμής και ζήτησης, αποδεικνύεται πως η πλευρά της ζήτησης θα δεχόταν να καταναλώσει ενέργεια ( $D$ ), εφόσον η τιμή προσφοράς της είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή εκκαθάρισης (market clearing price  $p$ ). Σε περίπτωση που η πλευρά της ζήτησης έχει το δικαίωμα να υποβάλει διπλή προσφορά, τότε οι προσφορές ποσότητας – τιμής για ανοδικό ( $R_u, C_u$ ) ή καθοδικό ( $R_d, C_d$ ) αποθεματικό πρέπει επίσης να παρέχονται [18].



Εικόνα 21 Παράδειγμα Υποβολής Προσφοράς [18]

**Βοηθητικές Υπηρεσίες Αγοράς (Ancillary Services Market):** Στόχος των Βοηθητικών Υπηρεσιών Αγοράς αποτελεί η μακροπρόθεσμη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με το χαμηλότερο κόστος και την υψηλότερη αξιοπιστία. Η απαίτηση αυτών των υπηρεσιών οφείλεται στην ανάγκη διασφάλισης ότι οι διαχειριστές του δικτύου θα είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις ευθύνες τους και να διατηρήσουν τα απαιτούμενα πρότυπα

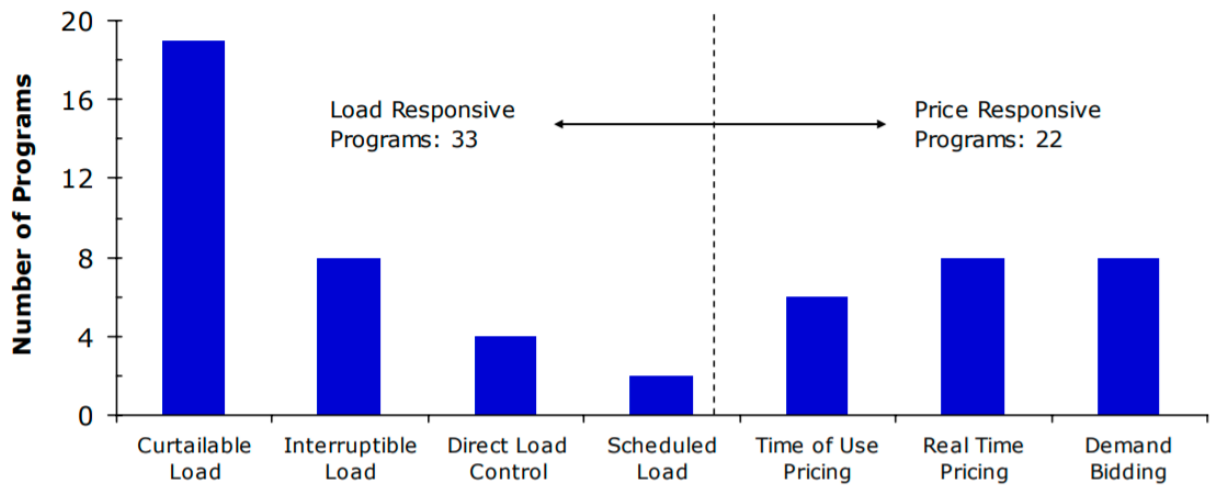
ποιότητας. Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής του Συστήματος (ISO) χρησιμοποιεί τις Βοηθητικές Υπηρεσίες με σκοπό:

- Να διατηρήσει την συχνότητα του συστήματος εντός των επιθυμητών ορίων.
- Να διατηρήσει την τάση του συστήματος σταθερή.
- Να διασφαλίσει την σταθερότητα του δικτύου.
- Να διατηρήσει την ευρωστία και σταθερότητα του συστήματος μετά από εξωτερικές διαταραχές.

Πρέπει να τονιστεί πως δεν υπάρχει κοινό πλαίσιο κατηγοριοποίησης των Βοηθητικών Υπηρεσιών σε παγκόσμιο επίπεδο, γεγονός που οδηγεί παρόμοιες υπηρεσίες να έχουν διαφορετικά ονόματα σε διαφορετικά κράτη. Στις ΗΠΑ, η Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (Federal Energy Regulatory Commission) με το διάταγμα 888 ορίζει 12 τεχνικές και μη- τεχνικές Βοηθητικές Υπηρεσίες. Οι 6 από αυτές είναι υποχρεωτικές για τους παρόχους και πελάτες του δικτύου. Οι κύριες Βοηθητικές Υπηρεσίες αφορούν τον έλεγχο της άεργης ισχύος, τον έλεγχο της συχνότητας, τις εφεδρείες τους συστήματος, την διασφάλιση συνεχούς ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, την επαναφορά ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έπειτα από διακοπή χωρίς την παρουσία εξωτερικού δικτύου (black start) και τον έλεγχο των απωλειών του συστήματος [43].

Στην *Εικόνα 22*, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας που αφορά τον αριθμό προγραμμάτων Demand Response ανά τύπο προγραμμάτων για εμπορικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτό που γίνεται εύκολα εμφανές είναι πως δεν υπάρχει τεράστια διαφορά στην προτίμηση των διαφορετικών τύπων προγραμμάτων από τις εταιρείες κοινής ωφέλειας, αν και τα προγράμματα που βασίζονται στα κίνητρα παρατηρούνται ελαφρώς πιο συχνά από εκείνα που βασίζονται στις προσφερόμενες τιμές στους καταναλωτές [33].

## Categorization of U.S. Demand Response Programs



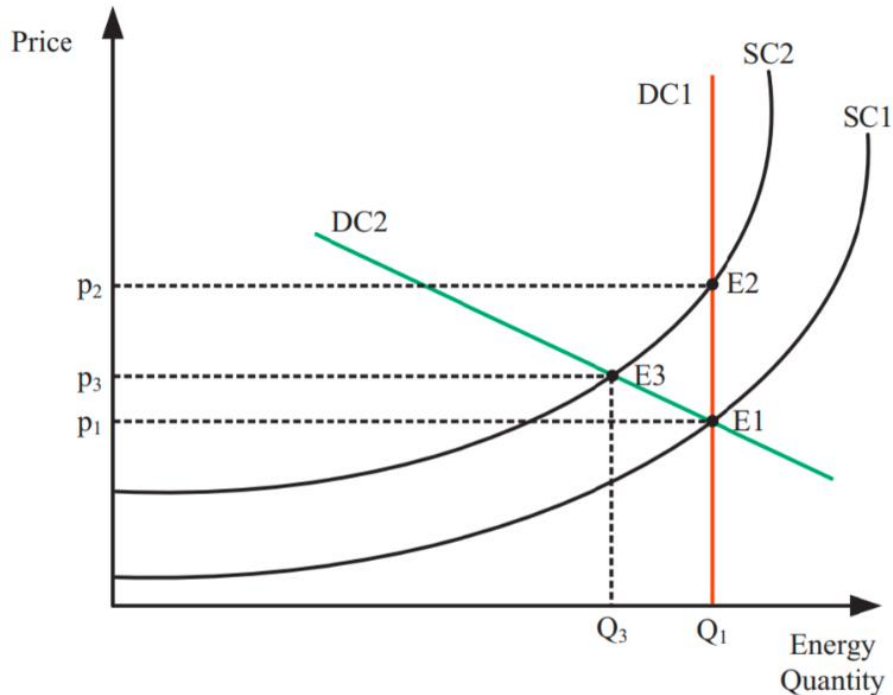
Εικόνα 22: Κατηγοριοποίηση εμπορικών και βιομηχανικών προγραμμάτων των Η.Π.Α.

[33]

### 4.3.7 Συμμετοχή των Προγραμμάτων Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στην Χονδρική Αγορά Ενέργειας

Η ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών στα προγράμματα της Ανταπόκρισης της Ζήτησης βελτιώνει σε υψηλό βαθμό την αξιοπιστία και απόδοση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τους αποφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη από τις χαμηλότερες και πιο σταθερές τιμές χρέωσης και ο έλεγχος ισχύος της αγοράς αποκτά μεγαλύτερη ευελιξία. Η ζήτηση ισχύος από ακριβές μονάδες παραγωγής μειώνεται και η βραχυπρόθεσμη ικανότητα του δικτύου αυξάνεται. Το DR αποδεικνύεται ωφέλιμο τόσο για τον παραγωγό όσο και για τον προμηθευτή, αφού μειώνει την ικανότητα μεγάλων εταιρειών της αγοράς να επηρεάσουν και να χειραγωγήσουν την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συμμετέχοντες στα προγράμματα DR έχουν περισσότερες επιλογές στην αγορά, μπορούν αποδοτικά να διαχειριστούν την κατανάλωσή τους και έχουν την ευκαιρία να επηρεάσουν την αγορά, ειδικά με προγράμματα βασισμένα στις πραγματικές της ανάγκες (market-based programs) και στη δυναμική τιμολόγηση (dynamic pricing programs) [18].

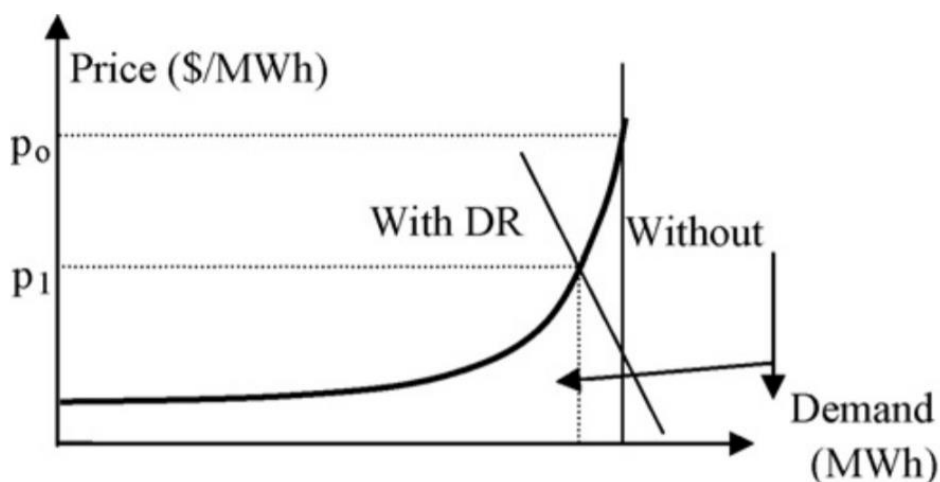
Για να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω ως προς την γενικότητά τους, θα παρουσιάσουμε το απλοποιημένο παράδειγμα της Εικόνας 23.



Εικόνα 23: Παράδειγμα Επίδρασης της Ανταπόκρισης της Ζήτησης στις τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας [18]

Η Εικόνα 23 αντιστοιχεί σε αγορές κατά τις οποίες η ενιαία τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από την τομή των αθροιστικών καμπυλών προσφοράς και ζήτησης. Ο διαχειριστής της αγοράς είναι υπεύθυνος στο να συλλέξει τις ανάλογες προσφορές από τις πλευρές της παραγωγής και της ζήτησης αντίστοιχα και τις ταξινομεί ανάλογα με την τιμή τους.

Η αθροιστική καμπύλη προσφοράς έχει ανοδική πορεία, ενώ η αθροιστική καμπύλη ζήτησης έχει πτωτική. Έχει αποδειχθεί ότι η Ανταπόκριση της Ζήτησης των καταναλωτών μειώνει την ικανότητα εταιρειών που κατέχουν μεγάλο μερίδιο της αγοράς να ασκήσουν δύναμη και να διαμορφώσουν την τιμή. Κατά την κρίση της Καλιφόρνια το 2000- 2001, είχε αναφερθεί πως μία μικρή μείωση της ζήτησης, κοντά στο 5% μπορούσε να έχει ως συνέπεια μία μείωση της τιμής κοντά στο 50% και αυτό οφείλεται στο ότι στα σημεία που βρίσκονται κοντά στην μέγιστη ισχύ του συστήματος οι προσφορές τείνουν να αυξάνονται με εκθετική μορφή. Μία μικρή μείωση της ζήτησης, θα οδηγούσε σε μεγάλη μείωση του κόστους παραγωγής και με την σειρά του σε μείωση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται καλύτερα και στην απλοποιημένη καμπύλη της Εικόνας 24 [28].



Εικόνα 24: Επίδραση της Ανταπόκρισης στη Ζήτηση στις τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας [28]

Το γεγονός ότι η καμπύλη προσφοράς γίνεται όλο και πιο απότομη, καθώς η ενεργειακή ικανότητα αυξάνεται είναι συνέπεια της τάσης μεγιστοποίησης του κέρδους από την πλευρά της παραγωγής ή οφείλεται στο υψηλό λειτουργικό κόστος που απαιτείται για την παραγωγή πολύ υψηλών ποσοτήτων ισχύος.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η αρχική καμπύλη ζήτησης DC1 αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη κάθετη γραμμή, επειδή αρχικά θεωρούμε πως δεν εφαρμόζονται προγράμματα DR στο σύστημα της αγοράς. Τα προγράμματα DR εισάγουν μία αρνητική κλίση στην καμπύλη ζήτησης των συμμετεχόντων πελατών και οδηγούν σε μικρή μείωση της ζήτησης και σε μία αρκετά υψηλή όμως μείωση της τιμής της αγοράς, όπως στην καμπύλη DC2. Η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς ή τιμή ισορροπίας  $p_1$  είναι η τιμή στην οποία η προσφερόμενη και η ζητούμενη ποσότητα είναι ίσες και το  $E_1$  είναι το σημείο ισορροπίας στο οποίο τέμνονται οι καμπύλες DC1 και EC1. Στην περίπτωση που η ζήτηση των καταναλωτών αντιπροσωπεύεται από την DC1, τότε η πλευρά της προσφοράς θα έχει τη δυνατότητα να χειραγωγεί και να διαμορφώνει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, μετατοπίζοντας έτσι την καμπύλη προσφοράς στην θέση DC2 και αυξάνοντας την τιμή της αγοράς στην  $p_2$ , που αντιστοιχεί στο νέο σημείο ισορροπίας  $E_2$ . Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση η πλευρά της ζήτησης συμμετέχει σε προγράμματα DR της αγοράς, θα έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται στις τιμές, να περιορίζεται με αυτόν τον τρόπο η

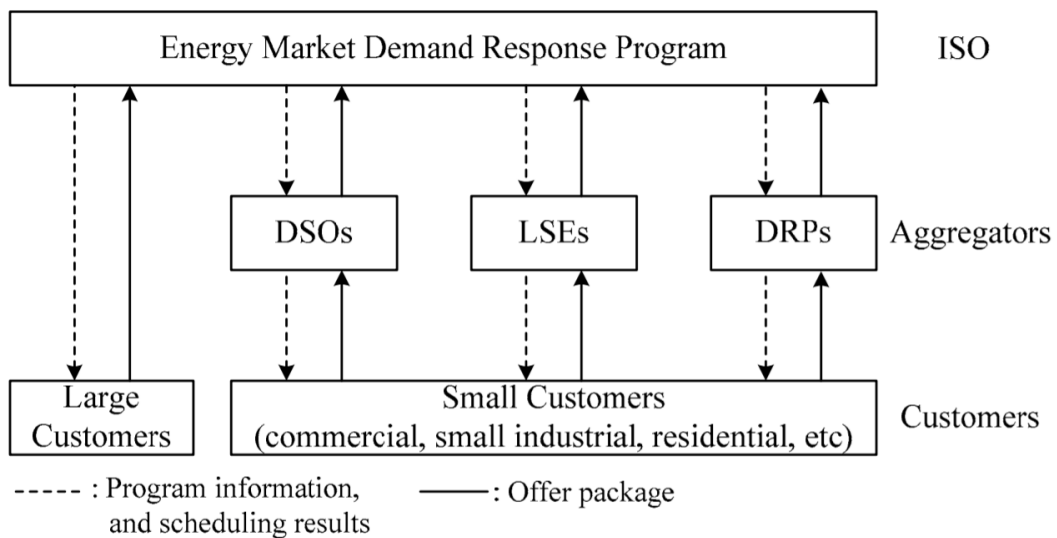
χειραγώγηση των τιμών και να επιτυγχάνεται ένα διαφορετικό σημείο ισορροπίας, το  $E_3$  και σε χαμηλότερη τιμή ( $p_3$ ).

Παρατηρείται δηλαδή πως με τα προγράμματα DR, ο αριθμός προμηθευτών στην αγορά αυξάνεται μέσω της βελτίωσης του ανταγωνισμού και οι τιμές αποκτούν όλο και πιο φιλικό για τους καταναλωτές χαρακτήρα. Η αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά υψηλότερη απόδοση, με τους συμμετέχοντες να έχουν περισσότερες επιλογές [18].

#### 4.3.8 Δομή των Προγραμμάτων Demand Response στην Αγορά Ενέργειας

Τα προγράμματα DR που εφαρμόζονται στις αγορές της ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπουν στους συμμετέχοντες σε αυτά να υποβάλουν τις προσφορές τους, τόσο από την πλευρά της παραγωγής όσο και της ζήτησης.

Στην *Εικόνα 25*, παρουσιάζονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων στα προγράμματα DR.



*Εικόνα 25: Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων σε DR πρόγραμμα [44]*

Σύμφωνα με την δομή της παραπάνω απεικόνισης, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής του Συστήματος (ISO) αρχικοποιεί τις συνθήκες του προγράμματος και στέλνει τις απαραίτητες



πληροφορίες του σε όλους τους συμμετέχοντες, ζητώντας τους να υποβάλλουν τα πακέτα προσφορών τους. Οι συμμετέχοντες στο πρόγραμμα μπορούν να παρέχουν εξειδικευμένα προϊόντα DR στα προγράμματα του Ανεξάρτητου Διαχειριστή του Συστήματος. Ανάλογα με τη δομή του εκάστοτε προγράμματος, την βάση θα μπορούσε να αποτελεί ένας μεγάλος πελάτης, ο οποίος θα μπορεί αποκλειστικά να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του προγράμματος ή ένας ανεξάρτητος συμμετέχων της αγοράς, όπως οι Διαχειριστές των Συστημάτων Διανομής (DSOs), εταιρείες εξυπηρέτησης του φορτίου (LSEs) και άλλοι πάροχοι DR (DRPs), οι οποίοι ως σύνολο αποτελούν μικρούς παρόχους προγραμμάτων DR. Όλοι οι παραπάνω φορείς (aggregators), συλλέγουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα και συμμετέχουν και δραστηριοποιούνται στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ως ενδιάμεσο μέσο επικοινωνίας και εξυπηρέτησης μεταξύ της πλευράς του Ανεξάρτητου Διαχειριστή του Συστήματος και εκείνης των πελατών.

Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής του Συστήματος (ISO) μπορεί να επιτρέψει τους ενδιάμεσους φορείς επικοινωνίας (aggregators) να υποβάλλουν τις αντίστοιχες προσφορές για λογαριασμό των πελατών λιανικής απευθείας. Επιπροσθέτως, τα προγράμματα DR είναι υπεύθυνα για την παροχή συστημάτων τηλεμετρίας στους πελάτες με σκοπό την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ενεργειακής τους κατανάλωσης [44].

#### **4.4 Στρεφόμενη Εφεδρεία (Spinning Reserve)**

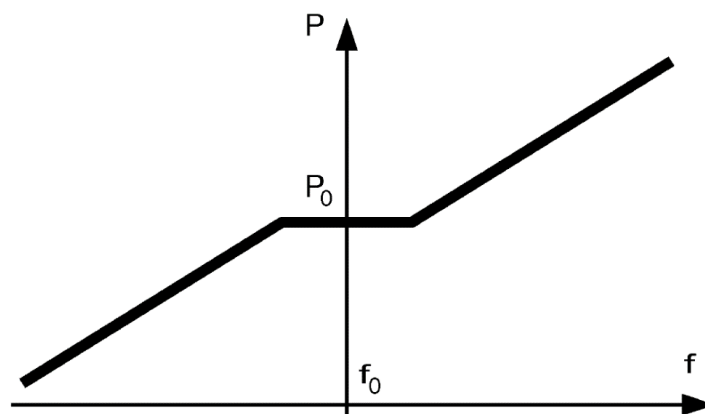
##### **4.4.1 Εισαγωγή στην Έννοια της Στρεφόμενης Εφεδρείας**

Ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται ως γενική έννοια σε όλη την κοινότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ορίζεται ως η ικανή ποσότητα παραγωγής η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενεργού ισχύος σε μία δεδομένη χρονική περίοδο. Ένας διαφορετικός ορισμός είναι ο εξής: Ως Στρεφόμενη Εφεδρεία αποτελείται το ποσό ισχύος το οποίο επιτυγχάνουν γεννήτριες οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, βρίσκονται σε κατάσταση ετοιμότητας και αντιδρούν άμεσα σε περίπτωση ανάγκης εντός 10 λεπτών. Αυτή η ποσότητα ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν υπάρχει συγκεκριμένη ανάγκη άμεσα και η χρήση της μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία του συστήματος.

Η συγκεκριμένη κατηγορία, η οποία υλοποιείται από συσκευές οι οποίες ελέγχονται από τον διαχειριστή του κάθε ηλεκτρικού δικτύου, αποτελεί το άνω - δηλαδή γρήγορο- άκρο του φάσματος κατηγοριών του DSM (όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 9*) και μπορεί να επηρεάσει την συνολική παραγωγή ενεργής ισχύος. Τα ενεργειακά προγράμματα τα οποία υιοθετούν διαφορετικές προσεγγίσεις για το κάθε πρόβλημα, βασίζονται στην σταθερότητα και γνώση των συστημάτων τους [45].

Κατά τον ευκολότερο τρόπο ελέγχου, όσο η συχνότητα μίας συσκευής μειώνεται, αυτή καταναλώνει λιγότερη ενεργή ισχύ. Όπως παρατηρούμε στην *Εικόνα 26*, όσο η συχνότητα του φορτίου από την πλευρά της ζήτησης αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η ενεργή ισχύς του και το αντίθετο. Άρα παρατηρούμε αύξηση και μείωση του φορτίου αντίστοιχα.

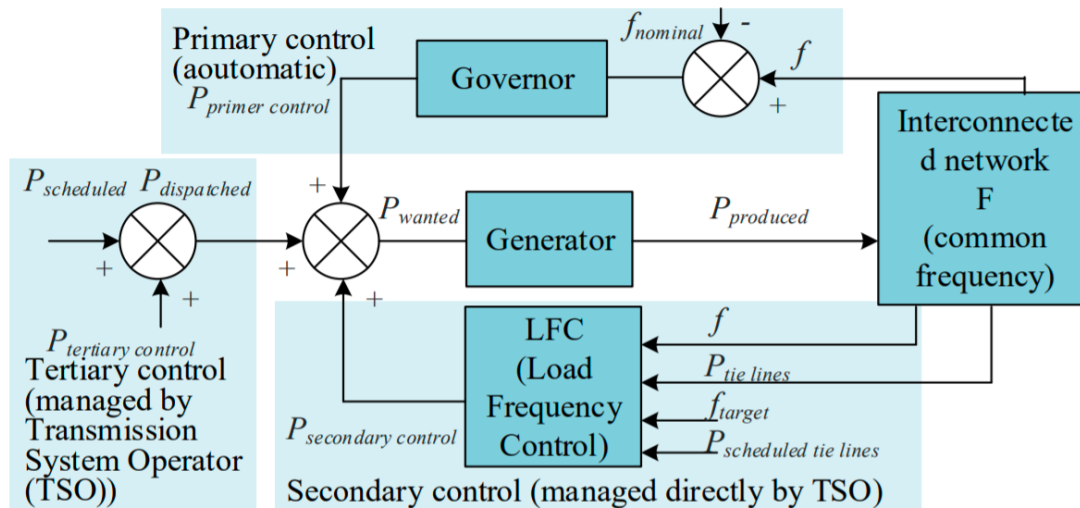
Δύο υλοποιήσεις αυτής της στρατηγικής είναι το "Δίκτυο Πλήρης Βελτιστοποίηση των Πόρων" (Integral Resource Optimization Network, IRON) και η εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου, η οποία ονομάζεται "gridfriendly controller". Το IRON αποτελεί μία υποδομή της πληροφορικής η οποία δημιουργεί νέες ευκαιρίες στη διαχείριση φορτίου και στην καταναλωμένη παραγωγή, στο οποίο οι καταναλωτές και οι παραγωγοί έχουν την δυνατότητα της διαχείρισης της παραγωγής και της ζήτησής τους, γεγονός που συμβάλλει καθοριστικά στην ελαστικότητα της καμπύλης ζήτησης και στην σταθεροποίηση της αγοράς [46].



*Εικόνα 26: A cooperative consumer backs off when grid frequency decreases [21]*

#### 4.4.2 Έλεγχος και Αποκατάσταση της Συχνότητας του Συστήματος

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται μία γενική περιγραφή του συστήματος απλοποιημένου ελέγχου που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συχνότητας ενός ηλεκτρικού συστήματος.



Εικόνα 27: Σύστημα σταθεροποίησης συχνότητας [45]

Το παραπάνω σύστημα, περιλαμβάνει τρία τμήματα ελέγχου. Αυτά είναι ο τριτεύων έλεγχος, ο δευτερεύων και ο πρωτεύων. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ελέγχου συνήθως χρησιμοποιούνται και τα τρία επίπεδα ελέγχου.

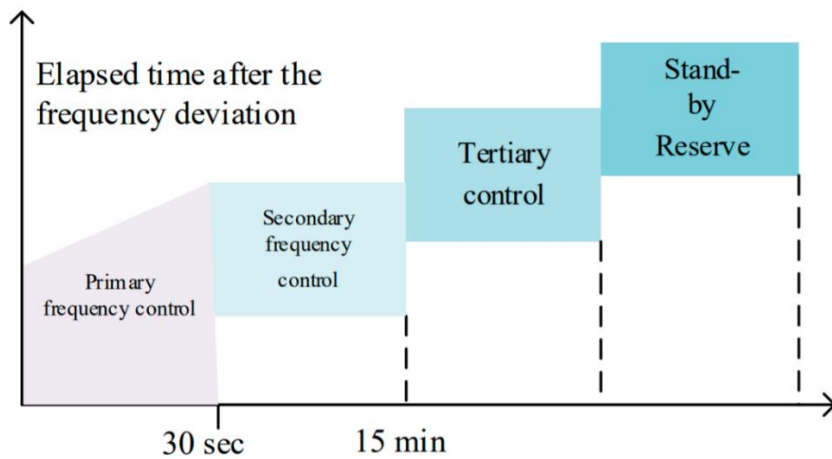
Πιο αναλυτικά, ο έλεγχος των τριών επιπέδων περιλαμβάνει τα ακόλουθα [45]:

- *Πρωτεύων έλεγχος εφεδρείας (Primary control - automatic):* όπου παρέχεται η απαραίτητη ενεργή ισχύς ενάντια σε οποιαδήποτε μεταβολή της συχνότητας του δικτύου και η διαδικασία της οποίας είναι αυτοματοποιημένη
- *Δευτερεύων έλεγχος εφεδρείας (Secondary control – managed directly by TSO):* όπου με τη χρήση επιπλέον ενεργής ισχύος, η συχνότητα επαναφέρεται στην κανονική της τιμή, γεγονός που αποτελεί συνήθως και το καθήκον των σταθμών ελέγχου και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόκλιση της συχνότητας του συστήματος πρέπει να διορθωθεί και να συμβάλλει στην αποκατάσταση και διασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος μέσω της επιπλέον ισχύος

παραγωγής των εφεδρικών μονάδων που ενεργοποιεί ο διαχειριστής του συστήματος.

- *Τριτεύων έλεγχος εφεδρείας (Tertiary control – managed TSO):* ο οποίος χρησιμοποιείται για το πρόβλημα της δέσμευσης μονάδας (unit commitment) και διορθώνει τον δευτερεύων έλεγχο, σε περίπτωση που αυτός δεν είναι αρκετός για την αποκατάσταση της συχνότητας στην επιθυμητή τιμή του συστήματος.

Η ακολουθία λειτουργίας των τριών επιπέδων ελέγχου ενός συστήματος παρουσιάζεται στην *Εικόνα 28*:



*Εικόνα 28: Η ακολουθία ενεργοποίησης των τριών επιπέδων ελέγχου [45]*

Ο συνολικός χρόνος απόκρισης των τριών επιπέδων ελέγχου δίνεται στην *Εικόνα 29*:

Reserve	Primary Reserve	Secondary Reserve	Tertiary Reserve
Start	Immediate	> 30 second	
Full availability	< 30 second	<15minute	Usually > 15 minute to Hours
End	>15 minute	Until Tertiary Reserves is replaced	

*Εικόνα 29: Ο γενικός χρόνος απόκρισης κάθε επιπέδου ελέγχου [45]*

Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα, για τον χρόνο απόκρισης του κάθε επιπέδου ελέγχου ισχύουν τα ακόλουθα [45]:

- *Πρωτεύον Έλεγχος*: Αρχίζει άμεσα, απαιτεί λιγότερο από 30 δευτερόλεπτα για να βρεθεί σε πλήρη διαθεσιμότητα και ολοκληρώνεται σε διάστημα μεγαλύτερο των 15 λεπτών.
- *Δευτερεύων Έλεγχος*: Απαιτεί περισσότερα από 30 δευτερόλεπτα για να ξεκινήσει, βρίσκεται σε πλήρη διαθεσιμότητα σε λιγότερο από 15 λεπτά και ολοκληρώνεται έως ότου τα τριτογενή αποθέματα ελέγχου αντικατασταθούν.
- *Τριτεύων Έλεγχος*: Η διαδικασία εκτέλεσής του απαιτεί συνήθως περισσότερα από 15 λεπτά έως και κάποιες ώρες.

#### 4.5 Μηχανισμοί του Demand Side Management

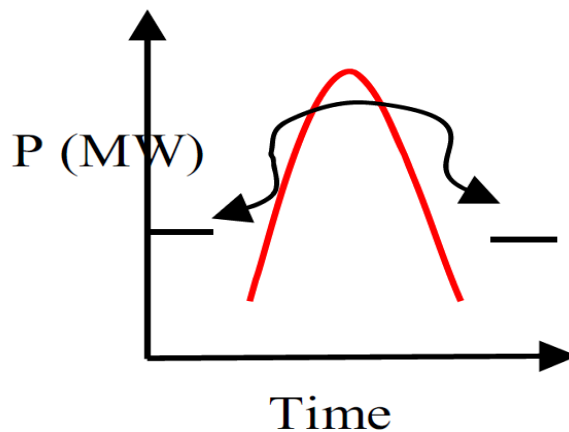
Έξι βασικοί τύποι έχουν θεμελιωθεί ως τεχνικές για την Διαχείριση της Πλευράς της Ζήτησης και τον έλεγχο της καμπύλης φορτίου των καταναλωτών και είναι οι εξής [47]:

##### 4.5.1 Μετατόπιση Φορτίου (Load Shift Effect)

Η τεχνική της μετατόπισης φορτίου, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 30*, περιλαμβάνει την μετατόπιση του ηλεκτρικού φορτίου των καταναλωτών από χρονικές περιόδους αιχμής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (on-peak to off-peak periods) με την μείωση της αιχμής ζήτησης, χωρίς όμως να υπάρξει μεταβολή στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Αυτός είναι και ο λόγος που η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθόδους ελέγχου του ηλεκτρικού φορτίου που ακολουθείται στην Διαχείριση του φορτίου των καταναλωτών.

Η συγκεκριμένη πρακτική υποστηρίχθηκε από επιχειρήσεις εξυπηρέτησης του ηλεκτρικού φορτίου μέσω των προγραμμάτων τιμολόγησης του χρόνου χρήσης των καταναλωτών (Time of Use). Είναι γνωστό πως ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται. Επίσης, λόγω του ότι οι τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά ακριβές με αποτέλεσμα

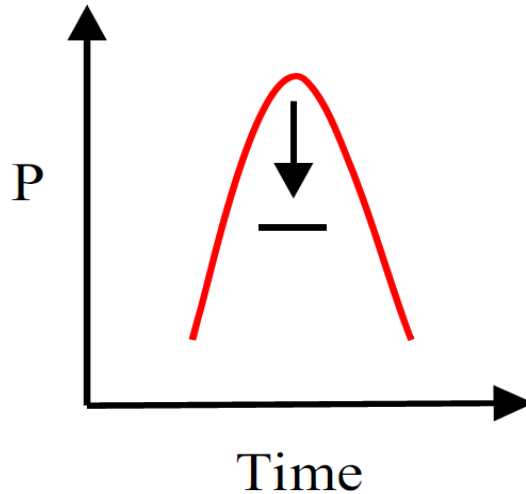
να μην αποθηκεύεται, οι διαχειριστές των προγραμμάτων DSM θα πρέπει συνεχώς να ισορροπούν την ισχύ προσφοράς τους ανάλογα με την διακύμανση της ζήτησης. Το γεγονός αυτό προκαλεί διάφορα λειτουργικά και οικονομικά προβλήματα στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την διατήρηση μιας όσο το δυνατόν παροχής στο δίκτυο. Με την εφαρμογή έτσι της μεθόδου Μετατόπισης Φορτίου, η συνολική καμπύλη ζήτησης τείνει να αποκτήσει μια σταθερή μορφή, χωρίς απότομες μεταβολές [48].



Εικόνα 30: Μέθοδος Μετατόπισης Φορτίου [47]

#### 4.5.2 Αποκοπή Αιχμής (Peak Clipping Effect)

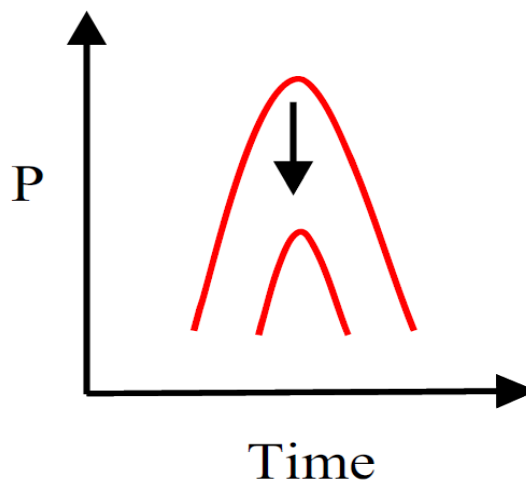
Η τεχνική της μείωσης της αιχμής φορτίου, η οποία παρουσιάζεται στην *Εικόνα 31*, στοχεύει στον περιορισμό της ζήτησης των καταναλωτών μέσω άμεσου ελέγχου βοηθητικών προγραμμάτων στο εξοπλισμό των καταναλωτών ή μέσω τιμολογιακών συμβολαίων όπου οι πελάτες είναι υποχρεωμένοι να μειώνουν την κατανάλωση φορτίου τους σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας. Η μείωση των αιχμών μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης των καταναλωτών. Τα οφέλη αυτής της στρατηγικής ελέγχου είναι η μείωση επενδυτικών κεφαλαίων σε νέο εξοπλισμό, τα λειτουργικά κόστη και την χρήση καυσίμων με υψηλό κόστος αγοράς. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποσκοπεί στην ισορροπία ισχύος μεταξύ παραγωγής και ζήτησης χωρίς τη χρήση πρόσθετων πηγών υψηλού κόστους.



Εικόνα 31: Μέθοδος Αποκοπής Αιχμής Φορτίου [47]

#### 4.5.3 Διατήρηση φορτίου (Conservation Effect)

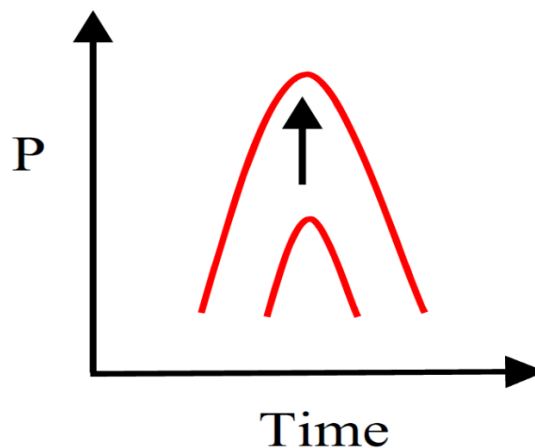
Η συγκεκριμένη μέθοδος (Εικόνα 32) βασίζεται στη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, όσο το δυνατόν ισομερώς κατά τη διάρκεια όλων ή των περισσότερων ωρών της ημέρας και αποτελεί μία μη παραδοσιακή τεχνική διαχείρισης και ελέγχου του φορτίου των καταναλωτών. Υπό κανονικές συνθήκες δεν θεωρείται μέθοδος διαχείρισης φορτίου ζήτησης, διότι διαχειρίζεται την κατανάλωση σε γενικότερη βάση και τα προγράμματά της περιλαμβάνουν επίσης μείωση στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και τροποποιήσεις στον τρόπο που αυτή χρησιμοποιείται για τις ανάγκες των καταναλωτών [49].



Εικόνα 32: Μέθοδος Διατήρησης Φορτίου [47]

#### 4.5.4 Ανάπτυξη Φορτίου (Load Building Effect)

Η τεχνική της ανάπτυξης φορτίου περιλαμβάνει την αύξηση των φορτίων της αγοράς, με αποτέλεσμα την συνολική αύξηση των πωλήσεων της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω νέων εφαρμογών, όπως επενδύσεις σε βιομηχανικά συστήματα αυτοματισμών και προηγμένα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Στην *Εικόνα 33* παρουσιάζεται η συνολική μετατόπιση της καμπύλης ζήτησης προς τα πάνω, ως αποτέλεσμα της αύξησης που αναφέρθηκε.

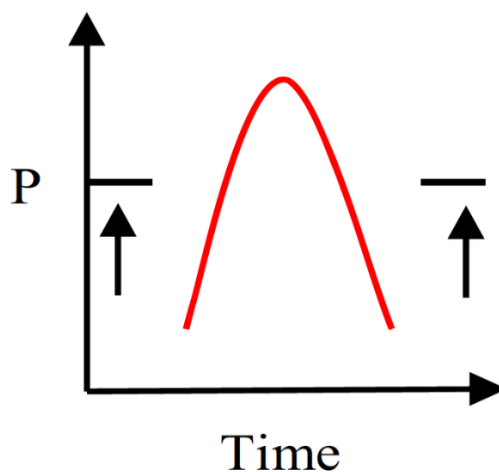


*Εικόνα 33: Μέθοδος Ανάπτυξης Φορτίου [47]*

#### 4.5.5 Πλήρωση Κοιλάδων (Valley Filling)

Σύμφωνα με την *Εικόνα 34*, τα προγράμματα που αποσκοπούν σε αυτή την μέθοδο στοχεύουν στην αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικού φορτίου κατά τη διάρκεια των ωρών εκτός αιχμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια εξομάλυνση στην τελική καμπύλη φορτίου των καταναλωτών. Συνεπώς, ο εξοπλισμός των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, οι γραμμές μεταφοράς και διανομής, φορτώνονται στο 80-90 % των ονομαστικών τους στοιχείων, αντί για 15-20 % κατά τη διάρκεια των ωρών χαμηλής ζήτησης, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται υψηλότερη απόδοση και μειωμένο κόστος λειτουργίας λόγω του βελτιωμένου συντελεστή φορτίου του συστήματος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιθυμητή στην περίπτωση όπου το μακροπρόθεσμο πρόσθετο κόστος είναι μικρότερο από τη μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας [49].

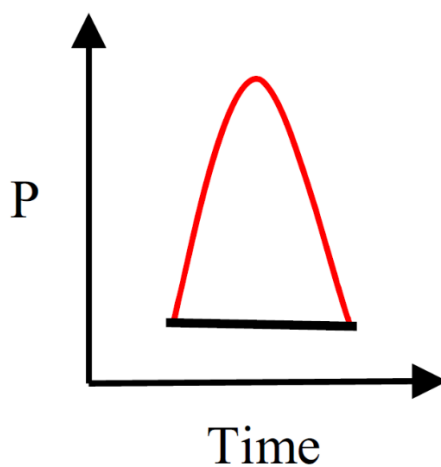




Εικόνα 34: Μέθοδος Πλήρωσης Κοιλιάδων [47]

#### 4.5.6 Ευελιξία Φορτίου (Flexible Load)

Η κύρια ιδέα πάνω στην οποία βασίζεται η συγκεκριμένη μέθοδος (Εικόνα 35) είναι η θέσπιση συμβάσεων μεταξύ των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας και των συμμετεχόντων στα προγράμματα καταναλωτών με σκοπό τη μεταβολή της ηλεκτρικής ζήτησης όταν αυτό είναι αναγκαίο, με αντάλλαγμα την παροχή οικονομικών κινήτρων στους καταναλωτές. Στα συγκεκριμένα προγράμματα, οι συμμετέχοντες καταναλωτές θα πρέπει να έχουν την ευελιξία να μεταβάλλουν την καμπύλη ζήτησης και να αναπροσαρμόσουν τις ανάγκες τους είτε για άμεσους σκοπούς κάλυψης αυξημένης ζήτησης από το δίκτυο είτε για έμμεσους, όπως είναι η διασφάλιση των ενεργειακών αποθεμάτων του συστήματος [49].



Εικόνα 35: Ευελιξία Φορτίου [47]

Η δομή, οι συνθήκες, οι όροι των προγραμμάτων, αλλά και οι τύποι των πελατών που συμμετέχουν σε αυτά καθορίζουν ποια από τις παραπάνω επτά τεχνικές Διαχείρισης της ζήτησης θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά. Το ποια από αυτές τις τεχνικές είναι καλύτερη και πιο αποτελεσματική δεν μπορεί να αποτελεί ερώτημα που χρήζει απάντησης, καθώς η κάθε μέθοδος αποσκοπεί στις απαιτήσεις των προγραμμάτων που διαμορφώνονται κάθε φορά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΘΕΣΠΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ DEMAND RESPONSE ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΡΑ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ

#### 5.1 Περιγραφή Υλοποίησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετασθεί το πρόβλημα της βέλτιστης οικονομικής κατανομής ισχύος ενός ηλεκτρικού συστήματος, το οποίο εφαρμόζει στην πλευρά των καταναλωτών του (Demand Side) ένα πιλοτικό πρόγραμμα Ανταπόκρισης στη Ζήτησης βασισμένο στα κίνητρα των καταναλωτών (Incentive Based Demand Response Program).

Η εφαρμογή του ηλεκτρικού συστήματος που θα υλοποιηθεί μοντελοποιείται με την βοήθεια της υπολογιστικής πλατφόρμας MATLAB, αφορά το χρονικό διάστημα μίας ημέρας (24 ώρες) και αποτελείται από τα εξής 3 επιμέρους υποσυστήματα, όπως περιγράφονται παρακάτω:

#### A. Πλευρά της Παραγωγής (Supply Side):

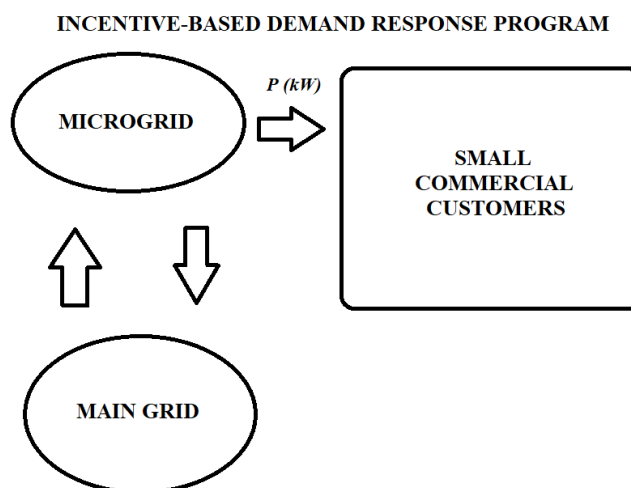
- i. **Μικροδίκτυο (Microgrid):** Αποτελείται από μία συμβατική γεννήτρια καυσίμου diesel, μία ανεμογεννήτρια και μία εγκατεστημένη συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων.
- ii. **Κυρίως Δίκτυο (Main Grid):** Ο λόγος της παρουσίας του κυρίως δικτύου στην εφαρμογή που θα υλοποιηθεί είναι η δυνατότητα κάλυψης της απαιτούμενης ζήτησης σε περιπτώσεις όπου η ισχύς που παράγει το μικροδίκτυο αδυνατεί να ικανοποιήσει τις αυξημένες ανάγκες των καταναλωτών. Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα σε περίπτωση που το μικροδίκτυο θα έχει περίσσεια ισχύ, να μπορεί να την πουλήσει πίσω στο κυρίως δίκτυο με αποτέλεσμα να αποκομίσει οικονομικό κέρδος από την συναλλαγή.

## B. Πλευρά της Ζήτησης (Demand Side):

Στην πλευρά της ζήτησης υποθέτουμε πως βρίσκονται **δύο εμπορικοί καταναλωτές μικρής ισχύος**, οι οποίοι συμμετέχουν σε πρόγραμμα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response) βασισμένο στα λήψη κινήτρων. Η πιλοτική εφαρμογή του προγράμματος αφορά την συμμετοχή των καταναλωτών ενεργά κατά τη διάρκεια ολόκληρου του 24ώρου, δίνοντάς τους παράλληλα ισχυρά κίνητρα περιορισμού της ζήτησής τους.

Ουσιαστικά, αυτό που θα επιχειρήσει να επιλύσει ο αλγόριθμος, είναι η εύρεση του βέλτιστου τρόπου εξυπηρέτησης του συνολικού φορτίου των δύο εμπορικών καταναλωτών για όλο το 24ωρο, δίνοντας προτεραιότητα στην χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του μικροδικτύου (εγκατεστημένη Ανεμογεννήτρια & Φωτοβολταϊκή Συστοιχία). Στόχος πρώτον η ελαχιστοποίηση τόσο του κόστους αγοράς ενέργειας από το κυρίως δίκτυο όσο και του κόστους παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας diesel και δεύτερον η μεγιστοποίηση της οικονομικής ωφέλειας της εταιρείας διαχείρισης του μικροδικτύου.

Στην *Εικόνα 36* παρουσιάζεται το απλοποιημένο μοντέλο Απόκρισης στη Ζήτηση που θα κατασκευαστεί.

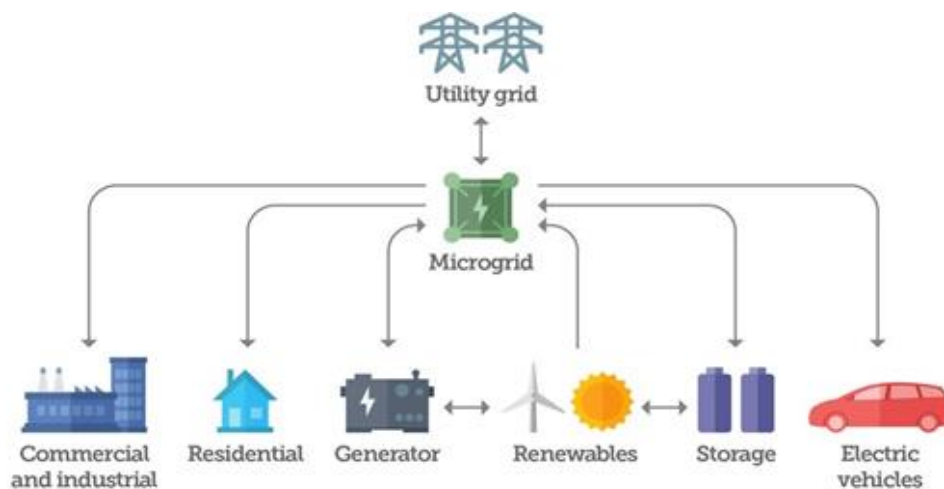


*Εικόνα 36: Απλοποιημένο μοντέλο μικροδικτύου συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο και με την παρουσία προγράμματος Απόκρισης της Ζήτησης για τους καταναλωτές*

## 5.2 Στρατηγική Διαμόρφωσης Μαθηματικών Μοντέλων και Μοντελοποίησης Προγράμματος Απόκρισης στη Ζήτηση

### 5.2.1 Ορισμός και λειτουργία του Μικροδικτύου

Πριν αναλύσουμε το μαθητικό μοντέλο του μικροδικτύου, θα επιχειρήσουμε αρχικά μία σύντομη αναφορά στην έννοιά του και στον τρόπο λειτουργίας του. Για να κατανοήσει κανείς τον τρόπο λειτουργίας του θα πρέπει αρχικά να έχει κατανοήσει την λειτουργία του κυρίως ηλεκτρικού δικτύου. Ουσιαστικά, το μικροδίκτυο, το οποίο παρουσιάζεται στην *Εικόνα 37*, είναι μία συμπιεσμένη έκδοση του ηλεκτρικού δικτύου που τροφοδοτεί τις ανάγκες μιας χώρας. Το ηλεκτρικό δίκτυο υπάρχει για να κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και την διασφάλιση της ισορροπίας ισχύος κάθε στιγμή μεταξύ της πλευρά της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαθέσιμη ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές μεταξύ των συστημάτων μεταφοράς και διανομής. Πρακτικά, ένα μικροδίκτυο λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, με την βασική διαφορά του όμως να είναι ότι αναφέρεται σε μία μικρότερη γεωγραφική περιοχή, όπως μία τοπική κοινότητα ή μία ομάδα καταναλωτών.



Εικόνα 37: Απλοποιημένη αναπαράσταση ενός μικροδικτύου<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <https://www.pewtrusts.org/en/research-and-analysis/issue-briefs/2016/02/why-and-how-microgrid-technology-is-a-good-power-source>

Τα παλαιότερα συστήματα μικροδικτύων, για να καλύψουν τις ανάγκες των καταναλωτών χρησιμοποιούσαν συνήθως συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι γεννήτριες ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης του τρόπου εκμετάλλευσης αλλά και του μειωμένου κόστους χρήσης τόσο της ηλιακής ενέργειας όσο και της ενέργειας του ανέμου, τα συστήματα που σχεδιάζονται περιέχουν αυξημένη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξασφαλίζοντας μακροπρόθεσμα οφέλη για το κόστος και το περιβάλλον σε σχέση με τις συμβατικές πηγές. Σε συνδυασμό με τις μπαταρίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ο έλεγχος ενός μικροδικτύου γίνεται πιο αποτελεσματικός και συμβάλλει στη αποδοτικότερη λειτουργία του αλλά και εξυπηρέτηση των καταναλωτών.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του μικροδικτύου είναι η ικανότητά του να λειτουργεί τόσο σε άμεση σύνδεση με το κυρίως δίκτυο (on-grid mode), όσο και απομονωμένο από αυτό (islanded mode). Για παράδειγμα, αν για οποιοδήποτε λόγο κάποια εξωτερική διαταραχή προκαλέσει μία διαταραχή στο κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο, όπως η διακοπή της ηλεκτροδότησης, το μικροδίκτυο έχει την δυνατότητα να απομονωθεί από το υπόλοιπο σύστημα μέσω ενός διακόπτη ελέγχου και να συνεχίζει να λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες.

Τελευταία, οι έρευνες που πραγματοποιούνται επικεντρώνονται στον βέλτιστο τρόπο λειτουργίας και έλεγχο των μικροδικτύων με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους και της μεγιστοποίησης της αξιοπιστίας τους.

### 5.2.2 Μαθηματική Μοντέλο φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Η ωριαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας δίνεται από τον παρακάτω τύπο [50], [51]:

$$P_{PV} = n_{PV} * A_c * H_{(pu)} \quad (16)$$

Όπου  $n_{pv}$  είναι ο βαθμός απόδοσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας,  $A_c$  είναι η συνολική έκταση σε  $m^2$  που καταλαμβάνει και  $H_{(pv)}$  είναι η ωριαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $KW * h/m^2$ ) πάνω στην συστοιχία.

### 5.2.3 Μαθηματικό Μοντέλο Ανεμογεννήτριας

Η ισχύς εξόδου μίας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την διεύθυνση και την τιμή της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή από την στοχαστική συμπεριφορά που παρουσιάζει ο άνεμος και η οποία εξαρτάται από την τοποθεσία εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, την πυκνότητα του αέρα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων του ρότορα και από τον βαθμό απόδοσης μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδο της ανεμογεννήτριας. Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας, ο οποίος στηρίζει ολόκληρη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση, δίνεται από τον παρακάτω τύπο [50]:

$$u_{hub}(k) = u_{ref}(k) * \left(\frac{h_{hub}}{h_{ref}}\right)^\beta \quad (17)$$

Όπου  $u_{hub}(k)$  είναι η ωριαία ταχύτητα του ανέμου στο ύψος  $h_{hub}$ ,  $u_{ref}(k)$  είναι η ωριαία ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς  $h_{ref}$  και ο όρος  $\beta$  αντιπροσωπεύει την εκθετική αύξηση μεταξύ  $u_{hub}(k)$  και  $\frac{h_{hub}}{h_{ref}}$  έχοντας εύρος τιμών από  $\frac{1}{7}$  έως  $\frac{1}{4}$ .

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια είναι το εξής:

$$P_{wind} = 0.5 * \eta_w * \rho_{air} * C_p * A * V^3 \quad (18)$$

Όπου  $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος  $h_{hub}$ ,  $\rho_{air}$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $C_p$  είναι ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας, ο οποίος εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της,  $A$  είναι η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας

κατά την περιστροφή του ρότορα και  $\eta_w$  είναι ο συντελεστής απόδοσης της ανεμογεννήτριας, ο οποίος αποτελεί δεδομένο του κατασκευαστή.

#### 5.2.4 Κόστος Μεταφερόμενης Ισχύος μεταξύ Κυρίως Δικτύου- Μικροδικτύου

Σε αυτό το σενάριο που θα μελετήσουμε, ο ρόλος του κυρίως δικτύου είναι να αντισταθμίζει την τυχόν έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να υπάρχει λόγω της υψηλής ζήτησης των καταναλωτών με αποτέλεσμα να καλύπτει την “κατά διαστήματα” λειτουργία των ΑΠΕ. Υποθέτουμε δηλαδή πως υπάρχει ένα πρόγραμμα διαπραγμάτευσης, σύμφωνα με το οποίο η ισχύς μπορεί είτε να αγοραστεί από το κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο σε περίπτωση έλλειψης, είτε να πωληθεί σε αυτό από το μικροδίκτυο σε περίπτωση πλεονάσματος. Άρα σε περίπτωση που η παροχή του μικροδικτύου δεν μπορεί να ανταποκριθεί στην συνολική ζήτηση, τότε η επιπλέον ενέργεια θα αγοραστεί από το κυρίως δίκτυο και το αντίθετο. Σκοπός μας είναι, την υψηλότερη προτεραιότητα στην ως προς τις πηγές κάλυψης της ζήτησης να την έχουν οι ΑΠΕ.

Αν η τιμολόγηση της μεταφερόμενης ισχύος μεταξύ κυρίως δικτύου - μικροδικτύου εξαρτάται από τις εκάστοτε χρεώσεις της εταιρείας παροχής και η μεταφερόμενη ισχύς οριστεί ως  $P_{trans}(t)$ , τότε το συνολικό κόστος της την χρονική στιγμή  $t$  (με  $t=[1,24]$ ) εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{trans}(t) = price * P_{trans}(t) \quad (19)$$

Όπου  $price$  ( $\text{€}/KW$ ) είναι η τιμή χρέωσης της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται σε διάστημα 1 ώρας.

Η συγκεκριμένη εξίσωση, λαμβάνει θετική τιμή όταν η ισχύς ρέει από το κυρίως δίκτυο προς το μικροδίκτυο ( $P_{trans}(t)>0$ ), αρνητική τιμή όταν ρέει από το μικροδίκτυο προς το κυρίως δίκτυο ( $P_{trans}(t)<0$ ) και ισούται με μηδέν όταν δεν υπάρχει η ανάγκη εισαγωγής ή η δυνατότητα πώλησης στο δίκτυο ( $P_{trans}(t)=0$ ).

Σκοπός της μελέτης που θα ακολουθήσει είναι μεγιστοποίηση της χρήσης των ΑΠΕ που είναι εγκατεστημένες στο μικροδίκτυο και η ελαχιστοποίηση του εισαγόμενης ενέργειας



από το κυρίως δίκτυο με αποτέλεσμα το κόστος της αν είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Άρα, η πρώτη συνάρτηση που θα ορίσουμε είναι η εξής:

$$fun_1(t) = \sum_{t=1}^{t=24} C_{trnsnf}(t) \quad (20)$$

### 5.2.5 Κόστος Παραγωγής της Ηλεκτρικής Ενέργειας του Μικροδικτύου

Για λόγους απλοποίησης της ανάλυσης, η συνάρτηση κόστους καυσίμου της συμβατικής γεννήτριας παραγωγής του μικροδικτύου εκφράζεται μέσω της τετραγωνικής της μορφής και διαμορφώνεται ως εξής:

$$C_{gen}(t) = k_i * P_{gen}(t)^2 + m_i * P_{gen}(t) \quad (21)$$

Όπου  $P(t)_{gen}$  είναι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας την ώρα  $t$  ( $t = 1 - 24$ ) και  $k_i, m_i$  οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους καυσίμου.

Ομοίως με παραπάνω, η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος που καλούμαστε να ορίσουμε αφορά για κάθε ώρα της ημέρας την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμων της συμβατικής γεννήτριας Diesel που θα χρησιμοποιηθούν. Έτσι, ορίζεται η δεύτερη συνάρτηση ως εξής:

$$fun_2(t) = \sum_{t=1}^{t=24} (C_{gen}(t)) \quad (22)$$

Για τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση των δύο παραπάνω αντικειμενικών συναρτήσεων απαιτείται να τηρούν κάποιους *βασικούς περιορισμούς*, οι οποίοι διαμορφώνονται ως εξής:

- Για κάθε ώρα της ημέρας  $t$ , το σύστημα θα πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της πλευράς παραγωγής και εκείνης της ζήτησης. Δηλαδή η

συνολική ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια, την φωτοβολταϊκή συστοιχία, την συμβατική γεννήτρια και το κυρίως δίκτυο θα πρέπει να ισούται με τη συνολική ζητούμενη ισχύ των δύο καταναλωτών. Μαθηματικά αυτή η συνθήκη εκφράζεται μέσω του παρακάτω περιορισμού:

$$P_{gen}(t) + P_{PV}(t) + P_{WG}(t) + P_{trans}(t) = TD(t) - \sum_{k=1}^{k=2} P_{curtail,k}(t) \quad (23)$$

Όπου  $P_{PV}(t), P_{WG}(t)$  η ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και της ανεμογεννήτριας αντίστοιχα την ώρα  $t$ ,  $P_{trans}(t)$  η ισχύς ανταλλαγής μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου,  $TD(t)$  η συνολική ζητούμενη ισχύς των καταναλωτών και  $P_{curtail,k}(t)$  είναι η ισχύς περιορισμού του καταναλωτή  $k$  ( $k = 1,2$ ) και την οποία θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

- Επίσης, για κάθε ώρα της ημέρας  $t$ , η παραγωγή ισχύος τόσο της ανεμογεννήτριας όσο και της φωτοβολταϊκής συστοιχίας θα πρέπει να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων. Δηλαδή, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός (για παράδειγμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο κάποιες ώρες της ημέρας δεν θα παράγει ισχύ) και θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την μέγιστη τιμή της, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV,max} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{WG}(t) \leq P_{WG,max} \quad (25)$$

- Επιπροσθέτως, μία φυσική διασύνδεση μεταξύ δύο ηλεκτρικών συστημάτων μπορεί να μεταφέρει έως ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ηλεκτρικής ισχύος, το οποίο καθορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς.

Δηλαδή, η μέγιστη ενεργή ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ του κυρίως δικτύου και του μικροδικτύου θα πρέπει να βρίσκεται εντός των προβλεπόμενων ορίων, σύμφωνα με την εξής συνθήκη:

$$|P_{trans}(t)| \leq P_{trans,max} \quad (26)$$

Για την λειτουργία του υπολογιστικού μας μοντέλου, θα ορίσουμε ως θετική την ισχύ που αγοράζει το μικροδίκτυο από το κυρίως δίκτυο και αρνητική την ποσότητα την οποία πουλάει σε αυτό, ακολουθώντας την αντίθετη διαδρομή.

- Σχετικά με την ισχύ εξόδου  $P_{gen}(t)$  συμβατικής γεννήτριας του μικροδικτύου κάθε χρονική στιγμή  $t$ , αυτή θα πρέπει να τηρεί τα απαιτούμενα μέγιστα και ελάχιστα όρια παραγωγής, σύμφωνα με την παρακάτω συνθήκη:

$$P_{gen,min} \leq P_{gen}(t) \leq P_{gen,max} \quad (27)$$

- Τέλος, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τον ρυθμό μεταβολής της παραγόμενης ισχύος εξόδου της γεννήτριας. Δηλαδή μία αύξηση ή μείωση από την ώρα  $t$  στην ώρα  $t + 1$  ζητούμενης παραγωγής, δεν μπορεί να είναι ακαριαία, αλλά θα πρέπει να βρίσκεται εντός κάποιων καθορισμένων ορίων, σύμφωνα με τη συνθήκη:

$$-P_{limit,min} \leq \Delta P_i \leq P_{limit,max} \quad (28)$$

Όπου  $\Delta P_i = P_{gen}(t + 1) - P_{gen}(t)$ ,  $P_{limit,max}$  είναι το άνω όριο αύξησης της παραγόμενης ισχύος της γεννήτριας και  $P_{limit,min}$  είναι το κάτω όριο μείωσής της.

### 5.2.6 Σχεδιασμός Συμβολαίου Χρέωσης των Καταναλωτών

Όπως αναφέρθηκε στις παραπάνω παραγράφους, στην πλευρά των καταναλωτών εφαρμόζεται Πρόγραμμα Απόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response Program). Το κόστος του περιορισμού της ισχύος ενός καταναλωτή εξαρτάται τόσο από το είδος του καταναλωτή όσο και από το ποσό της μείωσης της ισχύος του, με την συνάρτηση κόστους του πελάτη να ορίζεται ως [52]:

$$C(\theta, x) = K_1 * x^2 + K_2 * x - K_2 * x * \theta \quad (29)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, οι όροι  $K_1, K_2$  αποτελούν τους συντελεστές κόστους,  $x$  είναι το ποσό μείωσης της κατανάλωσης σε MW και ο συντελεστής  $\theta$  αποτελεί μία συνεχή μεταβλητή η οποία περιγράφει τον τύπο του συμμετέχοντος πελάτη στο πρόγραμμα, λαμβάνοντας τιμές στο κλειστό διάστημα 0-1. Η συγκεκριμένη μεταβλητή μας δίνει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε διαφορετικούς τύπους πελατών, διαμορφώνοντας για τον κάθε τύπο διαφορετική τιμή κόστους. Ουσιαστικά ορίζουμε την τιμή  $\theta = 1$  για τους πελάτες οι οποίοι είναι περισσότερο διατεθειμένοι να μειώσουν την κατανάλωση της ηλεκτρικής τους ενέργειας και  $\theta = 0$  για εκείνους με την μικρότερη επιθυμία. Καθώς για διαφορετικούς πελάτες το  $\theta$  μεταβάλλεται, τότε ο όρος " $K_2 * x * \theta$ " μεταβάλλεται ανάλογα, προκαλώντας διαφορετικές τιμές του οριακού κόστους. Όσο ο όρος  $\theta$  αυξάνεται, τόσο το οριακό κόστος του κάθε τύπου πελάτη μειώνεται και αντίστροφα. Άρα πελάτες με χαμηλό  $\theta$  έχουν μικρότερο οριακό κόστος από αντίστοιχους με υψηλότερο  $\theta$  και επομένως και αντίστοιχο οριακό όφελος μείωσης του κόστους τους. Σημειώνεται ότι η μεταβλητή  $\theta$  μπορεί να λάβει και διακριτές τιμές, σενάριο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση που θα ακολουθήσει. Για πελάτες με μηδενική μείωση της ισχύος κατανάλωσής τους το κόστος  $C(\theta, x = 0)$  ισούται με 0.

### 5.2.7 Πρόγραμμα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response Program)

Παρόλο που η συνάρτηση (29) δίνει μία σαφή περιγραφή της συνάρτησης κόστους διακοπής ισχύος σε έναν καταναλωτή, η παράμετρος  $\theta$  δεν είναι γνωστή στην εταιρεία

παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας. Έχοντας μία υποκειμενική εκτίμηση των τύπων των πελατών τους οποίους εξυπηρετεί, αναπτύσσει την συνάρτηση κινήτρου  $y(x)$  για να δείξει πόσο είναι πρόθυμη να πληρώσει έναν πελάτη για ένα συγκεκριμένο ποσό μείωσης της ηλεκτρικής του κατανάλωσης, δηλαδή η τιμή αυτής της συνάρτησης είναι το χρηματικό ποσό που θα λάβει ο κάθε πελάτης ως αντάλλαγμα για την μείωση της ποσότητας του ζητούμενου φορτίου του.

Οι συμμετέχοντες καταναλωτές του προγράμματος επιλέγουν οι ίδιοι την ποσότητα ισχύος την οποία θα μειώσουν (ποσότητα  $x$ ) με βάση την γνώση της συνάρτησης κινήτρων που τους δίνεται. Είναι προφανές πως οι καταναλωτές δεν θα προχωρήσουν στην μείωση της κατανάλωσής τους αν δεν διαπιστώσουν κάποιο οικονομικό όφελος από την συγκεκριμένη ενέργεια. Η συνάρτηση ωφέλειας ενός καταναλωτή ορίζεται ως:

$$V_1 = y - c(\theta, x) = y - K_1 * x^2 - K_2 * x + K_2 * x * \theta \quad (30)$$

Πολλά προγράμματα Απόκρισης στη Ζήτηση, προκειμένου να ενθαρρύνουν έναν νέο πελάτη να λάβει μέρος σε αυτά, τους παρέχουν ένα αρχικό σταθερό ποσό εφάπαξ, ως μέρος της συνολικής αποζημίωσης που θα λάβουν από την μείωση του φορτίου τους. Αυτό το σενάριο, δε θα ληφθεί υπόψη στην πρόγραμμα που θα υλοποιηθεί, καθώς θα είχε ως αποτέλεσμα την τροποποίηση της αντίληψης στο καθαρό χρηματικό όφελος ενός καταναλωτή. Στην περίπτωσή μας, για να συμμετάσχει ένα νέος πελάτης στο πρόγραμμα, είναι απαραίτητο να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις σύμφωνα με τη θεωρία συμβολαίων των οικονομικών επιστημών για κάθε συμμετέχοντα του προγράμματος:

- Σύμφωνα με την έλλειψη αρχικού κινήτρου εγγραφής, η απόφαση ενός πελάτη να συμμετέχει στο πρόγραμμα θα πρέπει να ενθαρρύνεται από την λήψη θετικού πλεονάσματος. Θα πρέπει δηλαδή να ισχύει  $V_1 \geq 0$ , έτσι ώστε οι καταναλωτές να διαπιστώσουν ένα χρηματικό όφελος από την μείωση της ισχύος τους [52].
- Θα πρέπει η συνάρτηση (30) να παρουσιάζει μονοτονία ως προς το  $\theta$  και να είναι μη-φθίνουσα ως προς το  $x$ . Σύμφωνα με τον μηχανισμό συμβατότητας των κινήτρων, ο κάθε συμμετέχων στο πρόγραμμα θα πρέπει να αποζημιώνεται

σύμφωνα με την αντίστοιχη μείωση ζήτησης την οποία επιτυγχάνει. Ο συγκεκριμένος ενθαρρύνει τον κάθε πελάτη να πει την αλήθεια σχετικά με τον δείκτη  $\theta$  και να επιλέξει το κατάλληλο πρόγραμμα για αυτόν και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$V_{1\theta} \geq V_{1\theta'} \quad (31)$$

Όπου  $\theta'$  είναι η παράμετρος προτίμησης ενός πελάτη αν την δήλωνε στο πρόγραμμα λανθασμένα.

Η εταιρεία εξυπηρέτησης του φορτίου, έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την χρηματική αξία της αδυναμίας της να τροφοδοτήσει με συγκεκριμένο ποσό ισχύος ένα καταναλωτή. Αυτήν η αξία παραμετροποιείται από τον συντελεστή  $\lambda$ , μονάδα μέτρησης του οποίου είναι τα €/KW και μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση υπάρχων βέλτιστων διαδικασιών ροής ισχύος. Ουσιαστικά αυτός ο συντελεστής αποτελεί το κόστος της μη παροχής ηλεκτρικής ισχύος σε έναν συμμετέχοντα καταναλωτή του προγράμματος για την ίδια την εταιρεία. Η γνώση του συντελεστή  $\lambda$  επιτρέπει στην εταιρεία να διαμορφώσει την δική της συνάρτηση ωφέλειας από έναν καταναλωτή ως εξής [52]:

$$V_2(\theta, \lambda) = \lambda * x(\theta) - y(\theta) \quad (32)$$

Στόχος της εταιρείας εξυπηρέτησης της ζήτησης από την πλευρά της είναι η μεγιστοποίηση της ωφέλειάς της από την λειτουργία του προγράμματος DR για την διάρκεια μία ολόκληρης ημέρας ( $t = 1: 24 \text{ hours}$ ), δηλαδή η μεγιστοποίηση της συνάρτησης  $V_2$  και επομένως οι δύο παραπάνω περιορισμοί θα ισχύουν αθροιστικά για όλες τις ώρες της ημέρας:

$$\text{maximize}_{x,y} \sum_{t=1}^{t=24} \sum_{k=1}^{k=2} \{V_2(\theta(k,t), \lambda(k,t))\} \quad \mu\epsilon \quad k = 1,2 \quad (33)$$

Όπου  $x$  είναι η ποσότητα ενεργής ισχύος που μειώνεται από την συνολική ζήτηση ενός καταναλωτή,  $\theta$  ο τύπος του καταναλωτή.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, εφόσον στόχος μας είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης  $V_2$ , τότε η ελαχιστοποίηση της  $-V_2$  θα μας δώσει τις βέλτιστες δυνατές λύσεις. Άρα η τρίτη συνάρτηση του μοντέλου που θα υλοποιηθεί είναι η εξής:

$$fun_3(t) = \sum_{t=1}^{t=24} \sum_{k=1}^{k=2} \{-V_2(\theta(k, t), \lambda(k, t))\} = \sum_{t=1}^{t=24} \sum_{k=1}^{k=2} \{y_{k,t} - \lambda_{k,t} * x_{k,t}\} \quad (35)$$

Έστω ότι για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της πρώτης περίπτωσης, θέτουμε την πρώτη αντικειμενική συνάρτηση  $Obj_1(t) = fun_1(t) + fun_2(t)$  και την δεύτερη ως  $Obj_2(t) = fun_3(t)$ . Συνεπώς, για το πρόγραμμα DR της περίπτωσης διασύνδεσης του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο, έχουν προκύψει δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Η πρώτη έχει ως σκοπό να ελαχιστοποιήσει το κόστος της εισαγόμενης ενέργειας από το κυρίως δίκτυο και το συνολικό κόστος καυσίμου της συμβατικής γεννήτριας του μικροδικτύου και η δεύτερη στοχεύει στην μεγιστοποίηση της οικονομικής ωφέλειας της πλευράς της εταιρείας διαχείρισης του μικροδικτύου. Έτσι, η τελική αντικειμενική συνάρτηση που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$Obj_{total}(t) = z_1 * Obj_1(t) + z_2 * Obj_2(t) \quad (36)$$

Όπου  $z_1, z_2$  είναι οι συντελεστές βαρύτητας.

### 5.3 Στρατηγική Επίλυσης Προβλήματος

Το μοντέλο που θα υλοποιηθεί είναι ένα ηλεκτρικό σύστημα το οποίο περιέχει στην πλευρά της προσφοράς (supply side) ένα διασυνδεδεμένο σύστημα μικροδικτύου- κυρίως δικτύου και στην πλευρά της ζήτησης (demand side) 2 μικρούς εμπορικούς καταναλωτές οι οποίοι συμμετέχουν σε ένα πρόγραμμα Ανταπόκρισης της Ζήτησης (Demand Response). Το μικροδίκτυο περιέχει μία ανεμογεννήτρια, μία συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ και μία συμβατική γεννήτρια παραγωγής diesel. Ουσιαστικά με την χρήση του λογισμικού MATLAB, θα αναζητήσουμε την βέλτιστη οικονομική λύση λειτουργίας του συστήματος, η οποία θα οδηγήσει στην συνολική ελάχιστη τιμή κόστους και των δύο πλευρών. Για να δώσουμε ίση βαρύτητα στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις της σχέσης (36) επιλέγουμε  $z_1 = z_2 = 0.5$ . Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για την περίοδο μίας ημέρας (24 ώρες) και οι μεταβλητές απόφασης για κάθε ώρα της ημέρας είναι η ενεργή ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας  $P_{WG}$ , η ενεργή ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας  $P_{PV}$ , η ισχύς ανταλλαγής μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου  $P_{trans}$ , η ισχύς εξόδου της συμβατικής γεννήτριας  $P_{gen}$ , η ισχύς μείωσης ως ανταπόκριση στον περιορισμό της ζήτησης για κάθε καταναλωτή  $x_1, x_2$  και το ποσό που θα λαμβάνει ο κάθε καταναλωτής ως πληρωμή για την μείωση ισχύος την οποία επιτυγχάνει  $y_1, y_2$ .

### 5.4 Επιλογή Δεδομένων

#### 5.4.1 Δεδομένα Πρόβλεψης Ισχύος Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίστηκαν από το “Φωτοβολταϊκό Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών” (PVGIS<sup>4</sup>) το οποίο παρέχει ανοιχτή πρόσβαση σε δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας για οποιαδήποτε περιοχή της γης, για διασυνδεδεμένα και αυτόνομα συστήματα δικτύων για διαφορετικού τύπου τεχνολογίες. Στην περίπτωση μας, διαστασιολογούμε την ονομαστική ισχύ της συστοιχίας στα 30 kW. Η βάση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε είναι η PVGIS-SARAH. Τα δεδομένα υπολογίζονται σε ωριαίες μέσες τιμές και επιλέγουμε να εγκαταστήσουμε το

---

<sup>4</sup> [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)



πάρκο στην περιοχή της Θεσσαλίας, με γεωγραφικό πλάτος  $39.371^{\circ}$ , γεωγραφικό μήκος  $22.812^{\circ}$  και υψόμετρο 216 m. Οι απώλειες του συστήματος ορίζονται σε 14 %. Οι ωριαίες τιμές της φωτοβολταϊκής ισχύος για την ημέρα 17/08/2016 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Δεδομένα πρόβλεψης ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>PV Power (KW)</b>	0	0	0	0	0.24	0.39	10.06	15.24	18.90	21.10	22.06	21.47
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b>PV Power (KW)</b>	19.48	16.41	11.74	6.04	1.25	0	0	0	0	0	0	0

#### 5.4.2 Δεδομένα Πρόβλεψης Ισχύος Ανεμογεννήτριας

Τα δεδομένα της αιολικής ισχύος παραγωγής της ανεμογεννήτριας του μικροδικτύου προσαρμόστηκαν έχοντας ονομαστική τιμή 22 kW με βάση το [53] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2: Δεδομένα πρόβλεψης ισχύος εξόδου ανεμογεννήτριας

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Wind Power (KW)</b>	17.56	16.5	16.25	17.48	18.48	19.42	19.82	19.35	20.08	19.01	20.04	21.68
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b>Wind Power (KW)</b>	21.02	20.05	20.67	20.98	19.37	19.61	19.7	18.72	17.21	16.75	16.03	16.9

### 5.4.3 Δεδομένα Αρχικής Ζήτησης Καταναλωτών

Η συνολική μέση τιμή της αρχικής ωριαίας ζήτησης φορτίου των δύο καταναλωτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 3:

Πίνακας 3: Σύνολο αρχικής ωριαίας ζήτησης φορτίου των δύο καταναλωτών

Χρόνος (ώρες)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demand Power (KW)	31.83	31.4	31.17	31	31.17	32.1	32.97	34.1	37.53	38.33	40.03	41.17
Χρόνος (ώρες)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Demand Power (KW)	39.67	41.7	42.1	41.67	40.7	40.07	38.63	36.4	34.1	32.8	32.5	32

### 5.4.4 Ωριαίες Τιμές του συντελεστή λ

Όπως τονίστηκε στις παραπάνω παραγράφους, η τιμή λ ορίζεται ως το κόστος της “διακοπής ισχύος” για την εταιρεία διαχείρισης του δικτύου και μπορεί να προσδιοριστεί από τις τεχνικές βέλτιστης ροής ισχύος [52]. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις ωριαίες τιμές του λ σε σχέση με την συνολική μέση ωριαία ζήτηση, οι οποίες προσαρμόστηκαν από το [53] και θεωρούμε ότι είναι κοινές για τους δύο καταναλωτές:

Πίνακας 4: Ωριαίες τιμές του συντελεστή λ

Χρόνος (ώρες)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
λ (€/KW)	0.157	0.14	0.22	0.376	0.45	0.47	0.504	0.535	0.67	0.616	0.638	0.682
Χρόνος (ώρες)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
λ (€/KW)	0.73	0.78	0.85	0.71	0.68	0.63	0.58	0.42	0.38	0.301	0.253	0.142

Αυτό που αξίζει να τονίσουμε είναι πως για υψηλότερες τιμές της ωριαίας ζήτησης ο συντελεστής λ ακολουθεί ανάλογη αύξηση, δηλαδή η επιχείρηση εξυπηρέτησης του

φορτίου δίνει μεγαλύτερα κίνητρα στους καταναλωτές ώστε να περιορίσουν το φορτίο τους όταν η ζήτηση και επομένως η ανάγκη για ισχύ είναι υψηλότερες.

#### 5.4.5 Δεδομένα Συμβατικής Γεννήτριας Diesel

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τους συντελεστές κόστους καυσίμου της συμβατικής γεννήτριας Diesel του μικροδικτύου, την αντίστοιχη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος της, καθώς και τους μέγιστους ρυθμούς αύξησης και μείωσης της παραγωγής, με βάση το [50].

Πίνακας 5: Δεδομένα γεννήτριας diesel

	$P_{gen,min}$	$P_{gen,max}$	$k_i$	$m_i$	<i>Max Increase rate</i>	<i>Max Decrease rate</i>
<b>Diesel Generator</b>	0	9	0.04	0.3	8	8

#### 5.4.6 Δεδομένα Εμπορικών Καταναλωτών

Τέλος, σχετικά με τους δύο εμπορικούς καταναλωτές, τα δεδομένα τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6, βάση του [52]:

Πίνακας 6: Τύπος πελάτη, Ημερήσια όρια διακοψιμότητας ισχύος, συντελεστές κόστους για κάθε καταναλωτή

	$\theta$	<i>Max Limit/Day (KW)</i>	$K_1$	$K_2$
<b>Customer 1</b>	0.5	50	0.108	0.132
<b>Customer 2</b>	0.6	60	0.184	0.164

Η εταιρεία διαχείρισης του μικροδικτύου γνωρίζει τους συντελεστές της συνάρτησης κόστους  $K_1, K_2$  κάθε πελάτη, καθώς επίσης ορίζει και ένα ημερήσιο προϋπολογισμό

$Total y_{cost}$  σχετικά με την ημερήσια συνολική αποζημίωση που καλείται να πληρώσει και για τους δύο πελάτες, η οποία ορίζεται στα 150 €. Η αντίστοιχη συνθήκη είναι η εξής:

$$\sum_{t=1}^{t=24} \sum_{k=1}^{k=2} y_{t,k} \leq Total y_{cost} \quad (37)$$

Επίσης, γνωρίζει για κάθε ένα από τους δύο καταναλωτές την μέγιστη ικανότητα μείωσης της ημερήσιας ισχύος τους  $Max Limit/Day$  γεγονός που τον βοηθάει στην εκτίμηση της παραμέτρου  $\theta$  για κάθε πελάτη. Για κάθε πελάτη, πρέπει η συνολική δηλαδή η μέγιστη ικανότητα μείωσης της ημερήσιας ισχύος του να είναι ίσο ή να ξεπερνά το σύνολο της μειωμένης ισχύος που επιτυγχάνει για κάθε ώρα της ημέρας, οπότε διαμορφώνεται η παρακάτω συνθήκη:

$$Max Limit/Day_k \geq \sum_{t=1}^{t=24} x_{k,t} \text{ με } k = 1,2 \quad (38)$$

#### 5.4.7 Κόστος Μεταφερόμενης Ενέργειας μεταξύ Κυρίως Δικτύου - Μικροδικτύου

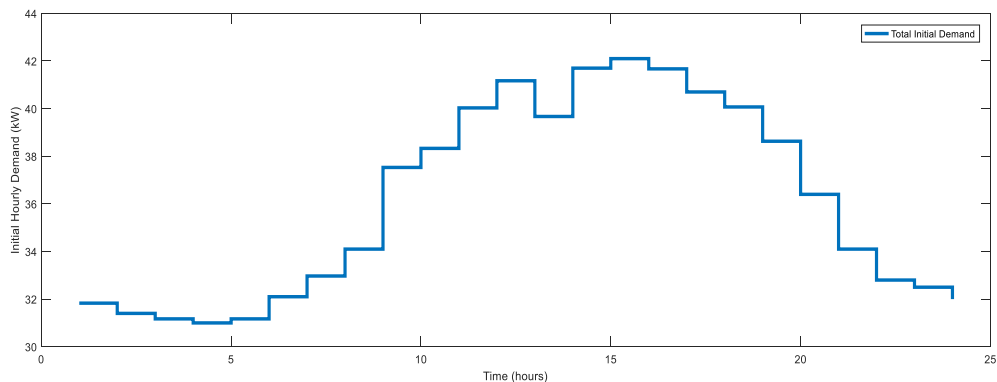
Τέλος, για την τιμολόγηση της ισχύος ανταλλαγής μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου, θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή 0.12 €/kWh<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> <https://www.dei.gr/Documents2/TIMOLOGIA/07-10-2020-TIMOLOGIA/TIMOK-XT-2020-G21-OCT2020.pdf>

## 5.5 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

Η αρχική καμπύλη συνολικής ωριαίας ζήτησης των δύο εμπορικών καταναλωτών του προγράμματος παρουσιάζεται στο *Γράφημα 1*. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως η αιχμή ζήτησης εμφανίζεται μεταξύ των ωρών 10 π.μ.- 7 μ.μ., γεγονός που ίσως να οφείλεται στις αυξημένες εμπορικές ανάγκες που καλούνται να καλύψουν οι δύο καταναλωτές εκείνο το διάστημα.



*Γράφημα 1: Αρχική καμπύλη ζήτησης των δύο εμπορικών καταναλωτών*

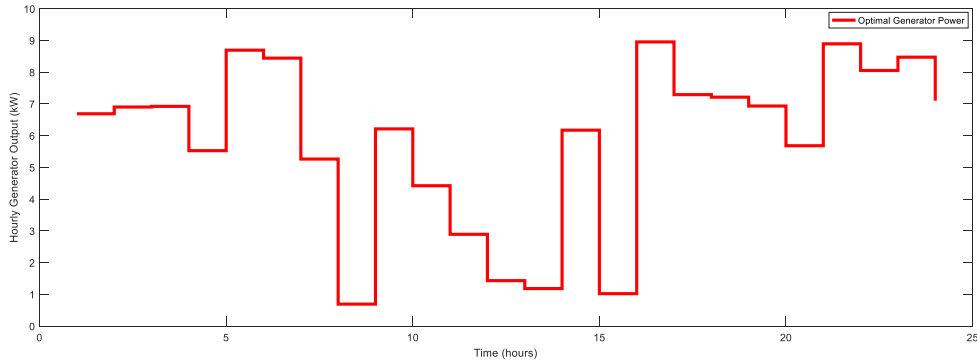
Σύμφωνα λοιπόν με τις συνθήκες βελτιστοποίησης του μοντέλου μας, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

### 5.5.1 Συμβατική Γεννήτρια Παραγωγής

Στον *Πίνακα 7* παρουσιάζεται η βέλτιστη ωριαία ισχύς που παράγει η συμβατική γεννήτρια diesel του μικροδικτύου και στο *Γράφημα 2* παρουσιάζεται η πορεία μεταβολής της.

*Πίνακας 7: Βέλτιστη ωριαία ισχύς παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας του μικροδικτύου*

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b><math>P_{gen}</math> (KW)</b>	6.68	6.9	6.92	5.52	8.69	8.44	5.26	0.69	6.21	4.42	2.89	1.43
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b><math>P_{gen}</math> (KW)</b>	1.18	6.17	1.02	8.95	7.29	7.21	6.93	5.68	8.89	8.05	8.47	7.1



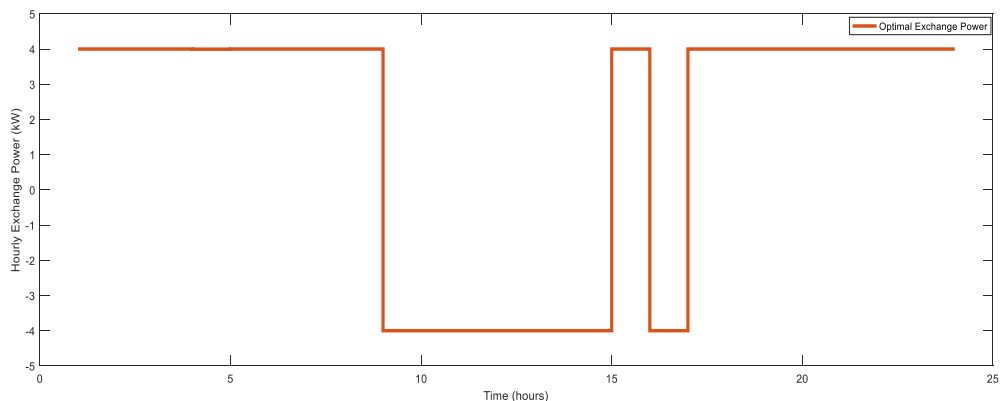
Γράφημα 2: Βέλτιστη ωριαία ισχύς παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας

### 5.5.2 Μεταφερόμενη Ισχύς μεταξύ Κυρίως Δικτύου- Μικροδικτύου

Οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές της ισχύος ανταλλαγής μεταξύ των δύο συστημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8 και στο Γράφημα 3:

Πίνακας 8: Βέλτιστη ωριαία μεταφερόμενη ισχύς μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b><math>P_{trans}</math> (KW)</b>	4	4	4	3.99	4	4	4	4	-4	-4	-4	-4
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b><math>P_{trans}</math> (KW)</b>	-4	-4	4	-4	4	4	4	4	4	4	4	4



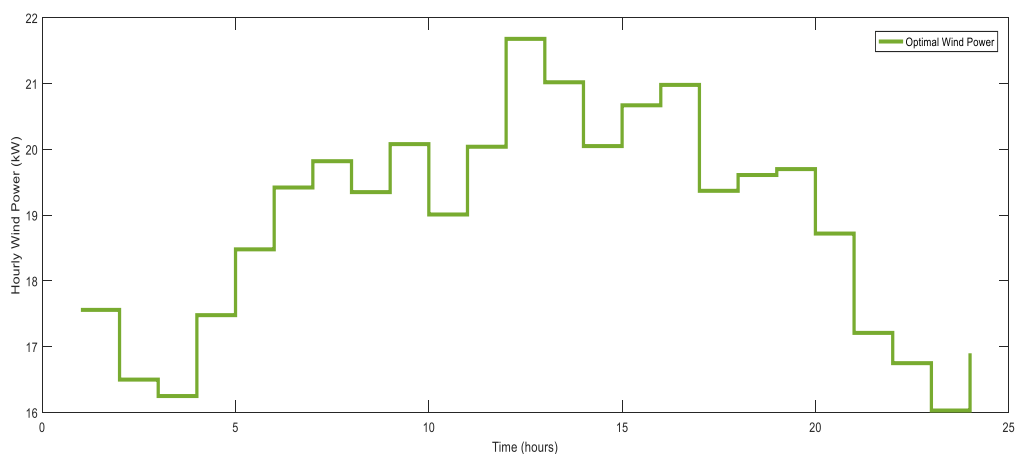
Γράφημα 3: Βέλτιστη ωριαία μεταφερόμενη ισχύς μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου

### 5.5.3 Αιολική Ισχύς Παραγωγής

Η βέλτιστη αιολική ισχύς της ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στον Πίνακα 9 και η αντίστοιχη μεταβολή της στο Γράφημα 4:

Πίνακας 9: Βέλτιστη ωριαία ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b><math>P_{WG}</math> (KW)</b>	17.56	16.5	16.25	17.48	18.48	19.42	19.82	19.35	20.08	19.01	20.04	21.68
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b><math>P_{WG}</math> (KW)</b>	21.02	20.05	20.67	20.98	19.37	19.61	19.7	18.72	17.21	16.75	16.03	16.9



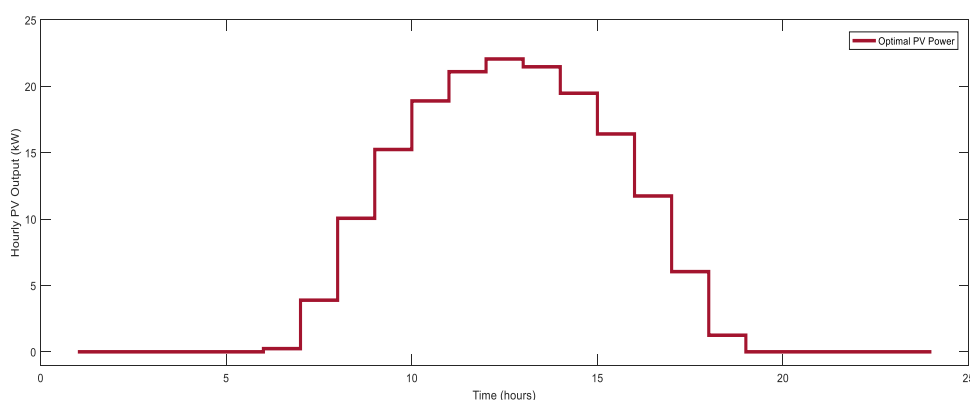
Γράφημα 4: Βέλτιστη ωριαία ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας

### 5.5.4 Ηλιακή Ισχύς Παραγωγής

Η βέλτιστη παραγωγή ισχύος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης παρουσιάζεται στον Πίνακα 10 και η αντίστοιχη διακύμανσή της στο Γράφημα 5:

Πίνακας 10: Βέλτιστη ωριαία ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Χρόνος (ώρες)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{PV}$ (KW)	0	0	0	0	0	0.24	3.89	10.06	15.24	18.9	21.1	22.06
Χρόνος (ώρες)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_{PV}$ (KW)	21.47	19.48	16.41	11.74	6.04	1.25	0	0	0	0	0	0



Γράφημα 5: Βέλτιστη Ηλιακή Ροή Ισχύος

### 5.5.5 Βέλτιστη Ωριαία Ισχύς Μείωσης των Καταναλωτών

Στους Πίνακες 11 και 12 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές ωριαίας μείωσης της ισχύος των δύο καταναλωτών του συστήματος ως αποτέλεσμα συμμετοχής στο πρόγραμμα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση:



- Η ωριαία ισχύς μείωσης του πρώτου καταναλωτή φαίνεται στον Πίνακα 11:

Πίνακας 11: Η ωριαία ποσότητα μείωσης της ισχύος του πρώτου καταναλωτή

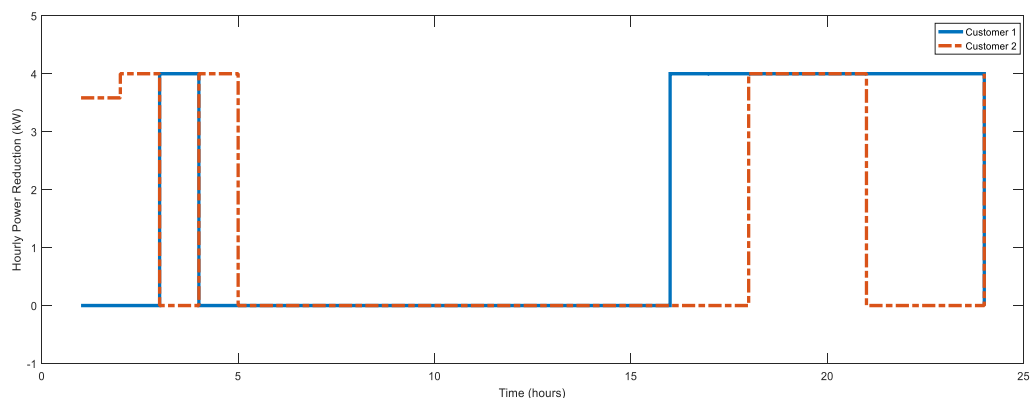
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
$x_1$ (KW)	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
$x_1$ (KW)	0	0	0	4	3.99	4	4	4	4	4	4	0

- Η ωριαία ισχύς μείωσης του δεύτερου καταναλωτή φαίνεται στον Πίνακα 12:

Πίνακας 12: Η ωριαία ποσότητα μείωσης της ισχύος του δεύτερου καταναλωτή

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
$x_2$ (KW)	3.58	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
$x_2$ (KW)	0	0	0	0	0	4	4	4	0	0	0	4

Σε κοινό διάγραμμα παρουσιάζονται αντίστοιχα οι μεταβολές της παραμέτρου  $x$  των δύο καταναλωτών:



Γράφημα 6: Ωριαία μεταβολή της ισχύος μείωσης για κάθε καταναλωτή

### 5.5.6 Ωριαία πληρωμή κινήτρων για τους δύο καταναλωτές

Το ωριαία ποσά που λαμβάνουν οι δύο καταναλωτές ως αποζημίωση για την συμμετοχή τους στο πρόγραμμα Απόκρισης της Ζήτησης και την μείωση της κατανάλωσής τους παρουσιάζονται στους Πίνακες 13 και 14:

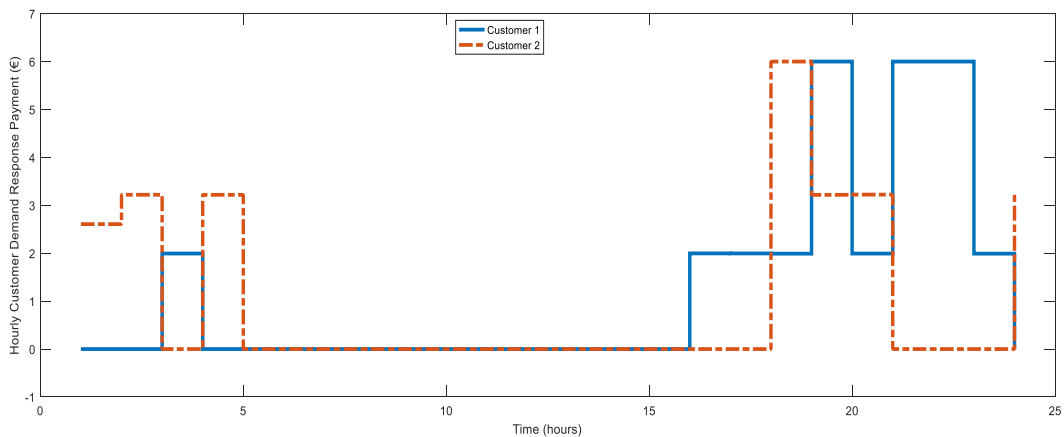
Πίνακας 13: Αποζημίωση του πρώτου καταναλωτή

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b><math>y_1</math> (€)</b>	0	0	1.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b><math>y_1</math> (€)</b>	0	0	0	1.99	1.99	1.99	6	1.99	6	6	1.99	0

Πίνακας 14: Αποζημίωση του δεύτερου καταναλωτή

<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b><math>y_1</math> (€)</b>	2.60	3.22	0	3.22	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Χρόνος (ώρες)</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b><math>y_1</math> (€)</b>	0	0	0	0	0	6	3.21	3.22	0	0	0	3.21

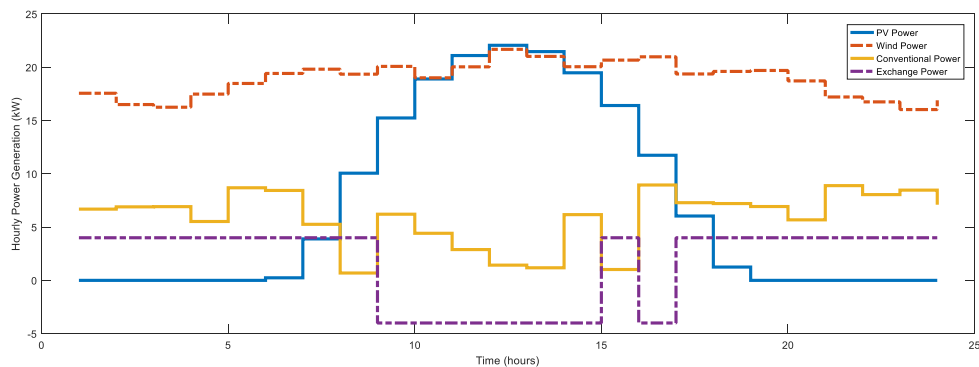
Στο Γράφημα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή στο χρόνο της χρηματικής αποζημίωσης του κάθε καταναλωτή:



Γράφημα 7: Διακύμανση της πληρωμής των πελατών

## 5.6 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων και Αξιολόγηση Αλγοριθμικού Μοντέλου

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που υλοποιήθηκε παρουσιάζουν εξαιρετικά ενδιαφέροντα στοιχεία ως προς την συμπεριφορά του μικροδικτύου και την συνεργασία του με το κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο. Σύμφωνα με το *Γράφημα 8*, η γεννήτρια του μικροδικτύου λειτουργεί σχεδόν αδιάλειπτα σε όλη την διάρκεια του 24ώρου, χωρίς όμως να αγγίζει την ονομαστική τιμή λειτουργίας της σε κανένα χρονικό σημείο, εκτός της 8<sup>ης</sup> ώρας όπου παρουσιάζει σχεδόν μηδενική παραγωγή. Παρατηρείται πως τις ώρες όπου υπάρχει έλλειψη ηλιακής ενέργειας και επομένως η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παρουσιάζει μηδενική παραγωγή, η παρουσία της συμβατικής γεννήτριας είναι πιο έντονη φτάνοντας μέχρι και ισχύ εξόδου ίση με  $8.95 \text{ kW}$ .



*Γράφημα 8: Αιολική ισχύς, ηλιακή ισχύς, ισχύς εξόδου γεννήτριας και μεταφερόμενη ισχύς μεταξύ κυρίως δικτύου και μικροδικτύου*

Η ισχυρότερη παρουσία δηλαδή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, μειώνει την παρουσία της συμβατικής μορφής παραγωγής, γεγονός που είναι επιθυμητό. Όπως αναφέρθηκε, προτεραιότητα παραγωγής στο σύστημα που μοντελοποιήθηκε έχουν οι ΑΠΕ, δηλαδή η φωτοβολταϊκή και η αιολική μονάδα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η καμπύλη της μεταφερόμενης ενεργής ισχύος μεταξύ κυρίως δικτύου- μικροδικτύου. Όταν εκείνη είναι θετική, τότε το μικροδίκτυο αγοράζει ισχύ από το κυρίως δίκτυο και όταν είναι αρνητική πουλά σε αυτό την περίσσεια ισχύ παραγωγής του. Σύμφωνα με το *Γράφημα 8*, τις πρώτες 8 ώρες βλέπουμε το μικροδίκτυο να αγοράζει ενέργεια για την κάλυψη της ζήτησης των καταναλωτών. Στη συνέχεια και για χρονικό διάστημα 8 ωρών, βλέπουμε το μικροδίκτυο να μπορεί να πουλάει ενέργεια στο κυρίως δίκτυο, μέχρι να μηδενιστεί ξανά η ηλιακή ισχύς και τότε να δημιουργείται ξανά η

ανάγκη αγοράς ενέργειας για τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας. Η συμπεριφορά αυτή βασίζεται στην παραγωγή ενέργειας των ανανεώσιμων πηγών. Όταν οι ΑΠΕ βρίσκονται σε πλήρη ροή φορτίου, τότε υπάρχει διαθέσιμη ισχύς για πώληση στο κυρίως δίκτυο, ειδικότερα όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία τίθεται σε πλήρη λειτουργία. Άρα είναι ξεκάθαρο πως η παρουσία των ΑΠΕ στο πρόγραμμα Ανταπόκρισης στη Ζήτηση παρέχει αρκετή ισχύ για την κάλυψη των καταναλωτών και εξαλείφει την ανάγκη του μικροδικτύου να εισάγει ενέργεια από το κυρίως δίκτυο.

Όσον αφορά την αιολική και την ηλιακή ισχύ, αυτές όπως είπαμε αποτελούν πηγές βάσης του μικροδικτύου και θέτεται ο στόχος αυτές να λειτουργούν σε όλο το 24ωρο, όπως και συμβαίνει.

Σχετικά με την συμμετοχή των πελατών στο πρόγραμμα DR, μελετώντας την μορφή του *Γραφήματος 6*, παρατηρείται πως και οι δύο καταναλωτές αναγκάζονται να μειώσουν την ηλεκτρική τους κατανάλωση όταν η συστοιχία των φωτοβολταϊκών πάνελ παράγει μηδενική ή σχετικά πολύ μικρή ισχύ, λόγω του γεγονότος πως το άθροισμα της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας και της ισχύος εισαγωγής από το κυρίως δίκτυο αδυνατούν να ανταπεξέλθουν στην αρχική συνολική ωριαία ζήτηση. Ο διαχειριστής του δικτύου, όπως υποθέσαμε και στην υποενότητα 5.4.6, έχει γνώση για το όριο της συνολικής ημερήσιας μείωσης της ισχύος των καταναλωτών (*Max Limit/Day*) και έτσι προσδιορίζει την "παράμετρο προθυμότητας  $\theta$ " αντίστοιχα.

Για τον πρώτο πελάτη ισχύει  $\theta = 0.5$ , *Max Limit/Day*= 50 kW και αντίστοιχα για τον δεύτερο  $\theta = 0.6$ , *Max Limit/Day*= 60 kW. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συνολική μείωση της κατανάλωσης των δύο καταναλωτών και αντίστοιχα το συνολικό ποσό που θα λάβει ο κάθε πελάτης ανάλογα με τον ωριαίο συντελεστή  $\lambda$  παρουσιάζονται στον *Πίνακα 15*:

*Πίνακας 15: Συνολική μείωση ισχύος και συνολική αποζημίωση για κάθε καταναλωτή*

	$\sum_{t=1}^{t=24} x_t$	$\sum_{t=1}^{t=24} y_t$
<b>Customer 1</b>	36 KW	29.95 €
<b>Customer 2</b>	27.58 KW	24.7 €
<b>Σύνολο</b>	63.58 KW	54.65 €

Σύμφωνα με τον πίνακα, παρατηρείται πως και δύο καταναλωτές αναγκάζονται να προχωρήσουν σε περικοπή της ισχύος τους, χωρίς ωστόσο να χρειαστεί να αγγίξουν τα άνω όρια, όπως έχουν συμφωνηθεί με το διαχειριστή θέσπισης κανόνων του προγράμματος. Το γεγονός αυτό είναι ενθαρρυντικό καθώς δημιουργεί συνθήκες εφεδρείας σε έκτακτες καταστάσεις, όπως η περίπτωση βλάβης στην φωτοβολταϊκή συστοιχία για κάποιες ώρες της ημέρας. Οι παράμετροι  $\theta$  είναι σχεδόν ίδιοι για τους δύο καταναλωτές, γεγονός που συνεισφέρει από την πλευρά του στην διαμόρφωση της συνολικής τελικής ισχύος μείωσης και αντίστοιχα στην χρηματική αποζημίωση για κάθε πελάτη.

Τέλος, σχετικά με την αξιολόγηση της υλοποίησης που σχεδιάστηκε, με την χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος MATLAB, κατασκευάστηκε ένα ιδεατό αλγοριθμικό μοντέλο προγραμματισμού του τρόπου κάλυψης της ημερήσιας ζήτησης δύο καταναλωτών, οι οποίοι συμμετέχουν σε ένα πιλοτικό πρόγραμμα Απόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response) με βάση την ελάχιστη συνολική τιμή της συνάρτησης κόστους. Στόχος της εφαρμογής ήταν να δοθεί προτεραιότητα παραγωγής στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και να μπορέσει να δείξει με απλοποιημένο τρόπο την συμπεριφορά των καταναλωτών και των πηγών σε ένα πρόγραμμα προηγμένης ενεργειακής διαχείρισης. Το σύστημα κάθε χρονική στιγμή βρίσκεται σε ισορροπία ισχύος και καμία από τις παραπάνω συνθήκες περιορισμού που αναφέρθηκαν δεν παραβιάστηκε, δίνοντάς μας με αυτό τον τρόπο ικανοποιητικά αποτελέσματα λειτουργίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, έγινε μία προσπάθεια μέσω συστηματικής έρευνας να παρουσιασθεί όσο το δυνατόν σαφέστερα η έννοια της Διαχείρισης της Ζήτησης (Demand Side Management), οι στόχοι της, καθώς και οι καινοτομίες και τα πλεονεκτήματα που προσδίδει στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάστηκαν αναλυτικά και οι τέσσερις κατηγορίες αυτού του τομέα, δηλαδή η Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency), η Τιμολόγηση με βάση τον Χρόνο Χρήσης (Time of Use), η Στρεφόμενη Εφεδρεία (Spinning Reserve) και τέλος η Ανταπόκριση στη Ζήτηση (Demand Response), όπου δόθηκε και μεγαλύτερη βαρύτητα λόγω την ποικίλων εφαρμογών και της ευελιξίας που υποστηρίζουν τα προγράμματά της. Με την βοήθεια του περιβάλλοντος MATLAB, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα Απόκρισης στη Ζήτηση για δύο μικρούς καταναλωτές, για να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει πιο αποδοτικά την λειτουργία και τα οφέλη ενός τέτοιου προγράμματος.

Οι νέες απαιτήσεις των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο αποδοτικούς τρόπους λειτουργίας. Η Διαχείριση της Ζήτησης, αποτελεί τομέα ο οποίος θα μπορούσε να εξελίξει την έννοια αυτών των συστημάτων και να μετατρέψει τον συμβατικό τους χαρακτήρα σε ότι αποκαλείται σήμερα Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο. Τα επόμενα 15 χρόνια, η Τεχνητή Νοημοσύνη και η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) θα καθορίσουν σημαντικό ρόλο στην τεχνολογική εξέλιξη ακόμη και στους πιο απλούς τομείς της καθημερινής ζωής των ανθρώπων. Γίνεται εύκολα κατανοητό πως η έρευνα των ηλεκτρικών συστημάτων πρέπει να επικεντρωθεί πάνω σε προηγμένους τρόπους ενεργειακής διαχείρισης, οι οποίοι χρησιμοποιώντας αλγορίθμους της επιστήμης των δεδομένων (data science) οι οποίοι έχουν ως βάση την Μηχανική Μάθηση, θα μπορέσει να επιφέρει επανάσταση και να εφεύρει καινοτομίες που θα βελτιώσουν αποδοτικά άμεσα την ενεργειακή κατανάλωση και έμμεσα τη ζωή των ανθρώπων, ο οποίος είναι και ο βασικός στόχος ολόκληρης της επιστημονικής κοινότητας.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. Keles, B. B. Alagoz and A. Kaygusuz, "A note on demand side load management by maximum power limited load shedding algorithm for smart grids," *2015 3rd International Istanbul Smart Grid Congress and Fair (ICSG)*, Istanbul, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/SGCF.2015.7354917.
- [2] F. Ye, Y. Qian and R. Q. Hu, "A Real-Time Information Based Demand-Side Management System in Smart Grid," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 329-339, 1 Feb. 2016, doi: 10.1109/TPDS.2015.2403833.
- [3] Miceli, R. Energy Management and Smart Grids. *Energies* **2013**, 6, 2262-2290.
- [4] Latest Trends In Smart Grid Technology In The Utilities Industry, Johnson Thomas, Sep 19, 2019, doi: <https://medium.com/@mikethomsan/latest-trends-in-smart-grid-technology-in-the-utilities-industry-9e2f295d3a4f>
- [5] Advantages of Smart Grids, Circutor, doi: <http://circutor.com/en/documentation/articles/4162-advantages-of-smart-grids>
- [6] 3 Strategies to Reduce Peak Demand at Industrial Sites, Martin M., doi: <http://engineering.electrical-equipment.org/energy-efficiency-building/3-strategies-to-reduce-peak-demand-at-industrial-sites.html>
- [7] N. Ahmed, M. Levorato and G. P. Li, "Residential Consumer-Centric Demand Side Management," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4513-4524, Sept. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2661991.
- [8] Zacks, J. and B. Tversky. "Event structure in perception and conception." *Psychological bulletin* 127 1 (2001): 3-21.
- [9] N. Ahmed, M. Levorato and G. P. Li, "Residential Consumer-Centric Demand Side Management," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4513-4524, Sept. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2661991.
- [10] H. K. Nguyen, J. B. Song and Z. Han, "Distributed Demand Side Management with Energy Storage in Smart Grid," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 26, no. 12, pp. 3346-3357, 1 Dec. 2015, doi: 10.1109/TPDS.2014.2372781.
- [11] Chen Xiang-ting, Zhou Yu-hui, Duan Wei, Tang Jie-bin and Guo Yu-xiao, "Design of intelligent Demand Side Management system respond to varieties of factors," *CICED 2010 Proceedings*, Nanjing, 2010, pp. 1-5.

- [12] M. M. Hossain, K. R. Zafreen, A. Rahman, M. A. Zamee and T. Aziz, "An effective algorithm for demand side management in smart grid for residential load," 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, 2017, pp. 336-340, doi: 10.1109/ICAEE.2017.8255377.
- [13] N. Zhang, L. F. Ochoa and D. S. Kirschen, "Investigating the impact of demand side management on residential customers," 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162699.
- [14] K. -. Ng and G. B. Sheble, "Direct load control-A profit-based load management using linear programming," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 688-694, May 1998, doi: 10.1109/59.667401.
- [15] I. K. Maharjan, Demand Side Management: Load Management, Load Profiling, Load Shifting, Residential and Industrial Consumer, Energy Audit, Reliability, Urban, Semi-Urban and Rural Setting. Saarbrücken, Germany: LAP (Lambert Acad. Publ.), 2010
- [16] J. Corbett, K. Wardle and C. Chen, "Toward a sustainable modern electricity grid: The effects of smart metering and program investments on demand-side management performance in the US electricity sector 2009-2012," in IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 65, no. 2, pp. 252-263, May 2018, doi: 10.1109/TEM.2017.2785315.
- [17] T. Logenthiran, D. Srinivasan and T. Z. Shun, "Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1244-1252, Sept. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2195686.
- [18] Nikolaos G. Paterakis, Ozan Erdiñç, João P.S. Catalão, An overview of Demand Response: Key-elements and international experience, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 69, 2017, Pages 871-891, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.167>.
- [19] Pierluigi Siano, Demand response and smart grids—A survey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 30, 2014, Pages 461-478, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022>.
- [20] Wood Mackenzie, Global smart meter total to double by 2024 with Asia in the lead, 30 July 2019, doi: <https://www.woodmac.com/news/editorial/global-smart-meter-total-h1-2019/>



- [21] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 3, pp. 381-388, Aug. 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2158841.
- [22] Saad, Muhammad and Shahid, Wasi, Demand Site Management and Demand Response (November 28, 2014). Technology, Operations Management & Production eJournal, 2014, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2774167> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2774167>
- [23] <https://solartechonline.com/blog/sdge-time-of-use-2019/>
- [24] J. Andruszkiewicz, J. Lorenc, W. Borowiak and A. Michalski, "Time of use tariff design for domestic customers integrating the management goals of efficient energy purchase and delivery," 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), Lisbon, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEM.2015.7216682.
- [25] M. A. R. Muzmar, M. P. Abdullah, M. Y. Hassan and F. Hussin, "Time of Use pricing for residential customers case of Malaysia," 2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED), Kuala Lumpur, 2015, pp. 589-593, doi: 10.1109/SCORED.2015.7449404.
- [26] <http://encorp.com/demand-response/>
- [27] A. U. Mahin, M. A. Sakib, M. A. Zaman, M. S. Chowdhury and S. A. Shanto, "Developing demand side management program for residential electricity consumers of Dhaka city," 2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), Cox's Bazar, 2017, pp. 743-747, doi: 10.1109/ECACE.2017.7913001.
- [28] M.H. Albadi, E.F. El-Saadany, A summary of demand response in electricity markets, Electric Power Systems Research, Volume 78, Issue 11, 2008, Pages 1989-1996, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2008.04.002>.
- [29] BENEFITS OF DEMAND RESPONSE IN ELECTRICITY MARKETS AND RECOMMENDATIONS FOR ACHIEVING THEM, U.S. Department of Energy, February 2006, doi: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE\\_Benefits\\_of\\_Demand\\_Response\\_in\\_Electricity\\_Markets\\_and\\_Recommendations\\_for\\_Achieving\\_Them\\_Report\\_to\\_Congress.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_Benefits_of_Demand_Response_in_Electricity_Markets_and_Recommendations_for_Achieving_Them_Report_to_Congress.pdf)

- [30] Farshid Shariatzadeh, Paras Mandal, Anurag K. Srivastava, Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 45, 2015, Pages 343-350, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.062>.
- [31] David Holmberg, Demand Response and Standards: New Role for Buildings in the Smart Grid, ASHRAE Journal, vol. 53, no. 11, November 2011
- [32] M. Shafie-khah et al., "Optimal Behavior of Electric Vehicle Parking Lots as Demand Response Aggregation Agents," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2654-2665, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2496796.
- [33] Mid-Atlantic Distributed Resources Initiative, Demand Response: An Introduction Overview of Programs, Technologies, & Lessons Learned, March 31, 2006
- [34] C. Chen, J. Wang and S. Kishore, "A Distributed Direct Load Control Approach for Large-Scale Residential Demand Response," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 5, pp. 2219-2228, Sept. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2307474.
- [35] Q. Zhang and J. Li, "Demand response in electricity markets: A review," 2012 9th International Conference on the European Energy Market, Florence, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/EEM.2012.6254817.
- [36] S. -. Fleten and E. Pettersen, "Constructing bidding curves for a price-taking retailer in the norwegian electricity market," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 701-708, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846082.
- [37] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi, Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs, Applied Energy, Volume 87, Issue 1, 2010, Pages 243-250, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.041>.
- [38] N. Yu and J. Yu, "Optimal TOU Decision Considering Demand Response Model," 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPST.2006.321461.
- [39] J. -. Sheen, C. -. Chen and J. -. Yang, "Time-of-use pricing for load management programs in Taiwan Power Company," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, pp. 388-396, Feb. 1994, doi: 10.1109/59.317586.

- [40] H. Aalami, G. R. Yousefi and M. Parsa Moghadam, "Demand Response model considering EDRP and TOU programs," 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC.2008.4517059.
- [41] E. Celebi and J. D. Fuller, "A Model for Efficient Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 60-67, Feb. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2006.888956.
- [42] Yong Wang, Lin Li, Critical peak electricity pricing for sustainable manufacturing: Modeling and case studies, Applied Energy, Volume 175, 2016, Pages 40-53, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.100>.
- [43] Igor Kuzle, Darjan Bosnjak and Sejid Tesnjak, "An overview of ancillary services in an open market environment," 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/MED.2007.4433835.
- [44] M. Parvania, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Shahidehpour, "Demand response participation in wholesale energy markets," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/PESGM.2012.6344591.
- [45] Tur, Mehmet Rida et al. "Impact of Demand Side Management on Spinning Reserve Requirements Designation." *International Journal of Renewable Energy Research* 7 (2017): 946-953.
- [46] Michael Stadler, Peter Palensky, Brigitte Lorenz, Manfred Weihs, Charlotte Roesener, Integral Resource Optimization Networks and their Techno-Economic Constraints, Energy Storage and Distributed Resources Division, Volume 1, 2005, doi: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/integral-resource-optimization-networks.pdf>
- [47] B. Priya Esther, K. Sathish Kumar, A survey on residential Demand Side Management architecture, approaches, optimization models and methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 59, 2016, Pages 342-351, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.282>.
- [48] Björn Matthews, Ian K. Craig, Demand Side Management by Load Shifting a Run-of-Mine Ore Milling Circuit, IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 23, 2012, Pages 84-89, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823120, <https://doi.org/10.3182/20120910-3-JP-4023.00061>.

- [49] Swati Singh, Surabhi Chandra, Energy Efficiency and Demand Side Management, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), Vol. 2, Issue 1, April 2015, doi: <http://www.iarjset.com/upload/2015/si/ncree-15/IARJSET%2090%20P170.pdf>
- [50] Henerica Tazvinga, Bing Zhu, Xiaohua Xia, Energy dispatch strategy for a photovoltaic–wind–diesel–battery hybrid power system, Solar Energy, Volume 108, 2014, Pages 412-420, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.025>.
- [51] Shayeghi, H., et al. "Optimal management of renewable energy sources considering split-diesel and dump energy." International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE) 10.1 (2018): 34-40.
- [52] M. Fahrioglu and F. L. Alvarado, "Designing incentive compatible contracts for effective demand management," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 4, pp. 1255-1260, Nov. 2000, doi: 10.1109/59.898098.
- [53] Nnamdi I. Nwulu, Xiaohua Xia, Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response, Renewable Energy, Volume 101, 2017, Pages 16-28, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.026>.