



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Ανάπτυξη Πληροφοριακού Συστήματος για την
Πρόβλεψη της Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας στην
Ελλάδα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Ν. Κραμπής

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Ανάπτυξη Πληροφοριακού Συστήματος για την Πρόβλεψη της Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Βασιλείου Ν. Κραμπή

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Οκτωβρίου 2016.

.....

Ιωάννης Ψαρράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Δημήτριος Ασκούνης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Βασίλειος Ασημακόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Βασίλειος Ν. Κραμπής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασίλειος Ν. Κραμπής, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός πληροφοριακού συστήματος για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Μέσω της συλλογής και ανάλυσης της Ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας σχετικής με την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και τη μελέτη της Ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, επιλέγονται οι παράγοντες που επιδρούν στη ζήτηση και τα μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης που θα χρησιμοποιηθούν. Αναπτύσσονται δυο μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης: ένα γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών και ένα γραμμικό μοντέλο διαφορών. Το λογισμικό που επιλέγεται για την ανάπτυξη του πληροφοριακού συστήματος και την υλοποίηση των παραπάνω μοντέλων είναι το AIMMS, ένα μαθηματικό εργαλείο προγραμματισμού σχεδιασμένο για τη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας. Ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης έχει τεθεί στα 10 χρόνια. Πραγματοποιούνται μελλοντικές προβλέψεις με βάση τρία σενάρια, ενώ επιλύεται και ένα πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης για την επίτευξη μεγαλύτερης ευρωστίας των εξαγόμενων προβλέψεων. Το πληροφοριακό σύστημα περιέχει ένα πλήθος διαγραμμάτων με τις τιμές των μεταβλητών και τις διάφορες προβλέψεις. Τα δεδομένα εισάγονται στο σύστημα από ένα αρχείο Microsoft Excel, επιτρέποντας στο χρήστη να διατηρεί μία βάση δεδομένων και να πραγματοποιεί εύκολα και γρήγορα αλλαγές σε αυτήν. Επίσης, τα αποτελέσματα εξάγονται και αποθηκεύονται σε ένα άλλο αρχείο Excel. Τέλος, το σύστημα δίνει τη δυνατότητα για επέκταση στα μελλοντικά χρόνια μέσα από ανανέωση των στοιχείων που λαμβάνονται υπόψιν κατ'έτος.

Λέξεις κλειδιά: μακροπρόθεσμη πρόβλεψη, ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, γραμμική παλινδρόμηση, πληροφοριακό σύστημα, AIMMS

ABSTRACT

The main objective of this diploma thesis is the development of an information system for the long-term electricity demand forecasting in the Greek interconnected system. Through the collection and analysis of the Greek and foreign literature relative to electricity demand forecasting and the study of the Greek electricity market, the factors affecting electricity demand and the forecasting mathematical models are selected. Two linear regression models are developed: one linear model of absolute values and one linear model of differences. The software chosen for the development of the information system and the implementation of the above models is AIMMS, a mathematical programming tool designed for modeling and solving large-scale optimization problems. The time horizon of the forecast has been set to 10 years. Future predictions are made based on three scenarios and a post optimization problem is solved in order to achieve greater robustness of the forecasts. The information system contains a number of diagrams with the values of the variables and the various projections. The data are imported into the system from a Microsoft Excel file, allowing the user to maintain a database and perform changes easily and fast. In addition, the results are exported and saved in another Excel file. Finally, the system allows for future expansion through the renewal of the data taken into account each year.

Keywords: long-term forecasting, electricity demand, linear regression, information system, AIMMS

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η διπλωματική εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 υπό την επίβλεψη του κ. Ιωάννη Ψαρρά, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο και οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Δημήτριο Αγγελόπουλο, για την πολύτιμη καθοδήγησή του και τη συνεργασία μας σε όλα τα στάδια υλοποίησης της εργασίας.

Κυρίως όμως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί στα φοιτητικά μας χρόνια.

Βασίλειος Κραμπής

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	15
1.2 Στάδια Υλοποίησης	16
1.3 Δομή της εργασίας.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ...	19
2.1 Εισαγωγή.....	21
2.2 Η σημασία της πρόβλεψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας	21
2.3 Κατηγοριοποίηση των μελετών.....	22
2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το χρονικό ορίζοντα.....	22
2.3.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη μέθοδο πρόβλεψης	23
2.3.3 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τομέα	24
2.3.4 Κατηγοριοποίηση με βάση τις μεταβλητές	25
2.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	26
2.4.1 Μελέτες ανασκόπησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας	26
2.4.2 Μελέτες πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.....	29
2.4.2.1 Στατιστικές τεχνικές	29
2.4.2.2 Μέθοδοι τεχνητής και υπολογιστικής νοημοσύνης.....	36
2.4.2.3 Υβριδικές μέθοδοι	43
2.5 Η Ελληνική Βιβλιογραφία	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	51
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	53
3.2 Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα	55
3.3 Ανεξάρτητοι φορείς στην αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	57

3.3.1 Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας	57
3.3.2 Ο Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	57
3.4 Η σύγχρονη ΔΕΗ Α.Ε.	58
3.5 Οι θυγατρικές της ΔΕΗ Α.Ε.	60
3.5.1 Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	60
3.5.2 Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας	61
3.5.3 ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.	62
3.6 Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	62
3.6.1 Διεθνείς διασυνδέσεις.....	64
3.7 Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	65
3.8 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα	66
3.8.1 Ορυκτά καύσιμα	66
3.8.2 Εγκατεστημένη ισχύς στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα	68
3.8.3 Εγκατεστημένη ισχύς στο μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	70
3.8.4 Ηλεκτροπαραγωγή Διασυνδεδεμένου Συστήματος.....	70
3.8.5 Ηλεκτροπαραγωγή μη Διασυνδεδεμένου Συστήματος.....	71
3.9 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα.....	72
3.9.1 Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης	72
3.9.2 Η παρούσα κατάσταση	73
3.9.3 Η μελλοντική κατάσταση	76
3.10 Η Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα	76
3.10.1 Η Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	76
3.10.2 Η Αιχμή Φορτίου.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ	
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	85
4.1 Εισαγωγή.....	87
4.2 Μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν.....	88

4.3 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών.....	91
4.3.1 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 1 ^η έκδοση.....	92
4.3.2 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 2 ^η έκδοση.....	93
4.3.3 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 3 ^η έκδοση.....	93
4.3.4 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 4 ^η έκδοση.....	94
4.4 Γραμμικό μοντέλο διαφορών.....	95
4.4.1 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 1 ^η έκδοση	97
4.4.2 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 2 ^η έκδοση	97
4.4.3 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 3 ^η έκδοση	98
4.4.4 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 4 ^η έκδοση	98
4.5 Δείκτες σφαλμάτων	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	103
5.1 Εισαγωγή.....	105
5.2 Το λογισμικό AIMMS	105
5.3 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών.....	107
5.3.1 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 1 ^η έκδοση.....	107
5.3.2 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 4 ^η έκδοση.....	113
5.4 Γραμμικό μοντέλο διαφορών.....	121
5.4.1 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 2 ^η έκδοση	121
5.4.2 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 4 ^η έκδοση	128
5.5 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα.....	135
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	139
5.1 Συμπεράσματα	141
5.2 Μελλοντικές προοπτικές.....	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Η ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ σημαντική για τον ενεργειακό προγραμματισμό των χωρών και την ομαλή λειτουργία των αγορών. Επίσης είναι πολύ κρίσιμη για το σχεδιασμό και επέκταση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, την κατασκευή νέων εγκαταστάσεων παραγωγής και την ανάπτυξη του ενεργειακού χάρτη μιας χώρας. Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητες ακριβείς προβλέψεις της μελλοντικής ζήτησης, έτσι ώστε η προσφορά και η ζήτηση ηλεκτρισμού να εξισορροπούνται. Ανακριβείς προβλέψεις της ζήτησης μπορούν να οδηγήσουν σε πλεονάζουσα ή ελλειμματική προσφορά η οποία επιδρά αρνητικά στο λειτουργικό κόστος και την ασφάλεια του δικτύου.

Έτσι, τα τελευταία χρόνια το πρόβλημα της πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρικού φορτίου έχει συγκεντρώσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον και ερευνητές από όλο τον κόσμο έχουν επικεντρωθεί σε αυτό τον τομέα. Ένα μεγάλο πλήθος μελετών έχει δημοσιευθεί και μία πληθώρα διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί. Ταυτόχρονα, καθώς οι ήδη υπάρχουσες τεχνικές εξελίσσονται και νέες μαθηματικές μέθοδοι αναπτύσσονται, νέες μελέτες πρόβλεψης της ζήτησης διαρκώς εκπονούνται και δημοσιεύονται.

Στην Ελλάδα, η εποπτεία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού είναι βασική αρμοδιότητα της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ). Επίσης, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και τη διασφάλιση του εφοδιασμού της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια και για αυτό το λόγο εκπονεί μελέτες πρόβλεψης της ζήτησης σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πληροφοριακού συστήματος για την πρόβλεψη της μακροχρόνιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Για την ανάπτυξη του πληροφοριακού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AIMMS. Το AIMMS είναι ένα μαθηματικό εργαλείο κατάλληλο για προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Υλοποιούνται δύο μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με χρονικό ορίζοντα 10 χρόνων.

1.2 Στάδια Υλοποίησης

Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εκπονήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία ξεκινά από το Νοέμβριο του 2015 και φτάνει μέχρι και τον Οκτώβριο του 2016. Υπήρξαν διάφορα στάδια υλοποίησης, τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

1. Αναζήτηση, συλλογή και μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας. Σε αυτό το στάδιο συλλέχθηκε και αναλύθηκε η ελληνική και ξένη βιβλιογραφία σχετική με την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύθηκαν μελέτες που πραγματοποιούν ανασκόπηση των υπάρχουσων μελετών πρόβλεψης καθώς και μελέτες που πραγματοποιούν προβλέψεις σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Επίσης προσδιορίστηκαν οι τρόποι κατηγοριοποίησης των μελετών και αξιολογήθηκαν οι διάφορες μέθοδοι πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Μελέτη της Ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο προσδιορίστηκαν οι φορείς που ρυθμίζουν την ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα. Αναλύθηκε το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας, προσδιορίστηκε το Εθνικό Σχέδιο Δράσης και η παρούσα κατάσταση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Επίσης δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο κομμάτι της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και συλλέχθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα.
3. Προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα με βάση την ελληνική βιβλιογραφία και τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν από τη μελέτη της Ελληνικής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αντληση των ιστορικών και μελλοντικών δεδομένων των παραγόντων αυτών.
4. Επιλογή των μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης της ζήτησης με βάση τις πληροφορίες από την ανάλυση της βιβλιογραφίας. Επιλέχθηκε η χρήση μεθόδων γραμμικής παλινδρόμησης λόγω της σχετικά απλής δομής τους και των ικανοποιητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζουν.
5. Επιλογή του λογισμικού AIMMS για την υλοποίηση των επιλεχθέντων μοντέλων πρόβλεψης με χρήση των μεταβλητών που προσδιορίστηκαν. Ανάπτυξη πληροφοριακού συστήματος για τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Σύγκριση μοντέλων και εξαγωγή αποτελεσμάτων.
6. Εξαγωγή συμπερασμάτων και ανάλυση προοπτικών για επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια.

- Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο της μελέτης, τα στάδια υλοποίησής της και η δομή της.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της βιβλιογραφίας πάνω στην οποία στηρίχθηκε η παρούσα εργασία. Πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση και ανάλυση της ξένης βιβλιογραφίας με βάση τη μέθοδο πρόβλεψης που χρησιμοποιείται. Επίσης, παρουσιάζονται οι μελέτες που πραγματοποιούν μοντελοποίηση και πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πληροφορίες για την ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα. Γίνεται αναφορά στους βασικούς φορείς που τη ρυθμίζουν και παρουσιάζονται οι πληροφορίες για την παραγωγή και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για την κατάσταση των ΑΠΕ στην Ελλάδα.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα δύο μοντέλα πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πληροφοριακό σύστημα που υλοποιεί τα διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της μακροπρόθεσμης ζήτησης και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.
- Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και εκτιμώνται οι μελλοντικές προοπτικές που υπάρχουν για πιθανή επέκτασή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα στην οποία στηρίχθηκε η παρούσα εργασία. Αρχικά, αναφέρεται η σημασία της πρόβλεψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και γίνεται αναφορά σε τέσσερις βασικούς τρόπους κατηγοριοποίησης των μελετών με βάση τις διαφορετικές προσεγγίσεις στην ανάλυσή τους. Στην ενότητα 2.4 παρουσιάζεται η ξένη βιβλιογραφία. Σε αυτήν, υπάρχουν μελέτες οι οποίες πραγματοποιούν ανασκόπηση των υπάρχουσων μελετών και μελέτες οι οποίες ασχολούνται με την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μελέτες πρόβλεψης της ζήτησης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο πρόβλεψης που χρησιμοποιούν. Τέλος, γίνεται παρουσίαση των μελετών που πραγματοποιούν προβλέψεις για την Ελλάδα.

2.2 Η σημασία της πρόβλεψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Το πρόβλημα της πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρικού φορτίου έχει εξελιχθεί σε έναν πολύ σημαντικό κλάδο της έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες. Οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην πρόβλεψη της ζήτησης τα τελευταία 30 και πλέον χρόνια καθώς είναι ένας κλάδος με μεγάλη σπουδαιότητα.

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται ακριβείς προβλέψεις μελλοντικής ζήτησης για να εξισορροπηθεί η προσφορά και η ζήτηση ηλεκτρισμού. Σφάλματα στην πρόβλεψη μπορούν να οδηγήσουν σε ανισορροπία προσφοράς και ζήτησης, η οποία επιδρά αρνητικά στο λειτουργικό κόστος, την ασφάλεια του δικτύου και την ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου εφοδιασμού. Υποεκτίμηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή ρεύματος, η οποία μπορεί να είναι επιβλαβής για την οικονομία και την καθημερινή ζωή της κοινωνίας. Από την άλλη πλευρά, υπερεκτίμηση της ζήτησης μπορεί να οδηγήσει σε αχρησιμοποίητη δυναμικότητα που σημαίνει ότι γίνεται σπατάλη πόρων, κυρίως οικονομικών. Ως εκ τούτου, η ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τα συστήματα διανομής.

Οι βασικές λειτουργίες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η οικονομική αποστολή, η συντήρηση των μονάδων και ο προγραμματισμός των καυσίμων μπορούν να γίνουν πιο αποδοτικά έχοντας ακριβείς προβλέψεις. Περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι σημαντικές πτυχές της πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας, αφού τα ορυκτά καύσιμα είναι ο πιο

κοινή πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η παραγωγή ηλεκτρισμού εξαντλεί τους φυσικούς πόρους και συμβάλλει στη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Συνολικά, η διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας τις τελευταίες δεκαετίες καθώς οι φυσικοί πόροι εξαντλούνται, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυξάνονται και οι ανανεώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας δεν έχουν εφαρμοστεί παγκοσμίως. Συνεπώς, καθώς η πρόβλεψη της ζήτησης έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία, οι μελέτες που ασχολούνται με αυτό τον κλάδο συγκεντρώνουν όλο και μεγαλύτερη προσοχή.

2.3 Κατηγοριοποίηση των μελετών

2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το χρονικό ορίζοντα

Η πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζεται σε 4 κατηγορίες με βάση το χρονικό ορίζοντα: πολύ βραχυπρόθεσμη, βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη:

- Πολύ βραχυπρόθεσμη: Η κατηγορία αυτή αφορά προβλέψεις σε χρονικό ορίζοντα από λίγα λεπτά μέχρι μία ώρα.
- Βραχυπρόθεσμη: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για χρονική περίοδο από μία ώρα έως μία εβδομάδα. Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη είναι σημαντική για την κατανομή των πόρων παραγωγής, για λειτουργικούς περιορισμούς καθώς και για περιορισμούς σχετικούς με το περιβάλλον και την χρήση του εξοπλισμού. Επίσης, είναι απαραίτητη για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των Σταθμών Παραγωγής, καθορίζοντας τη βέλτιστη λειτουργική κατάσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, είναι σημαντική για την οικονομική λειτουργία καθώς η αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται σημαντικά από τις απότομες διακυμάνσεις της ζήτησης φορτίου.
- Μεσοπρόθεσμη: Αφορά την πρόβλεψη σε εβδομαδιαία, μηνιαία ή ετήσια βάση (από 1 εβδομάδα μέχρι ένα έτος). Παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία και το σχεδιασμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και προσφέρει σημαντικά οφέλη για τις επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται σε μια ρυθμιζόμενη ή απελευθερωμένη ενεργειακή βιομηχανία. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό και το συντονισμό της συντήρησης σε ένα ολοκληρωμένο

σύστημα, τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης διακοπτόμενων πηγών όπως η αιολική ενέργεια και για το συντονισμό της παραγωγής σε ένα δίκτυο γεννητριών. Τέλος, είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος.

- **Μακροπρόθεσμη:** Αυτή η κατηγορία οδηγεί σε προβλέψεις που καλύπτουν μία περίοδο από 1 έτος και έως και 50 χρόνια. Η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ κρίσιμη για το σχεδιασμό και την επέκταση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Διαδραματίζει πολύ ουσιαστικό και σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό της κατασκευής νέων εγκαταστάσεων παραγωγής, την ανάπτυξη του ενεργειακού χάρτη μιας χώρας και την επέκταση των γραμμών μεταφοράς. Επίσης, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής των προβλέψεων, μπορεί να χαράξει πολιτικές από επίπεδο κυβερνήσεων και ολοκληρωμένων ενεργειακών πολιτικών μέχρι επίπεδο απλών εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και αναλύθηκαν κυρίως μελέτες οι οποίες πραγματοποιούν πρόβλεψη της ζήτησης σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, ενώ εξετάστηκαν και μελέτες οι οποίες πραγματοποιούν πρόβλεψη σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Δε μελετήθηκαν μελέτες βραχυπρόθεσμης και πολύ βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της ζήτησης.

2.3.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη μέθοδο πρόβλεψης

Οι μέθοδοι πρόβλεψης χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις στατιστικές μεθόδους και τις μεθόδους τεχνητής και υπολογιστικής νοημοσύνης.

- Στατιστικές μέθοδοι: Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τις παραδοσιακές τεχνικές και τις τροποποιημένες παραδοσιακές τεχνικές:
 - Παραδοσιακές τεχνικές: η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές χρονοσειρών και παλινδρόμησης που είναι θεμελιωμένες σε απλή ή πολλαπλή παλινδρόμηση, εκθετική εξομάλυνση και τεχνικές επαναληπτικών επανασταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων.
 - Τροποποιημένες παραδοσιακές τεχνικές: αυτό το σύνολο των μεθόδων πρόβλεψης ενσωματώνει ενισχυμένες τεχνικές παλινδρόμησης, συμπεριλαμβανομένων προσαρμοστικών τεχνικών και τεχνικών στοχαστικών χρονοσειρών. Η τελευταία κατηγορία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές εφαρμογές πρόβλεψης ηλεκτρικής ενέργειας, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται αυτοπαλινδρομικά μοντέλα (AR), μοντέλα κινητού

μέσου όρου (MA), αυτοπαλινδρομικά μοντέλα κινητού μέσου όρου (ARMA) και ολοκληρωμένα μοντέλα ARMA (ARIMA).

- Μέθοδοι τεχνητής και υπολογιστικής νοημοσύνης: Οι τεχνικές αυτές έχουν συγκεντρώσει μεγάλη προσοχή από τους ερευνητές για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική, οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (SVM), τα κυματικά δίκτυα και τα έμπειρα συστήματα που βασίζονται στη γνώση. Επιπλέον, υβριδικές προσεγγίσεις, που συνδυάζουν τουλάχιστον δύο ή περισσότερες διαφορετικές μεθόδους, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται, ώστε να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα και τα εμπόδια που σχετίζονται με τις παραδοσιακές μεθόδους.

Οι παραδοσιακές στατιστικές τεχνικές πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου ή παραμετρικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί στην πράξη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας σταθμισμένες τεχνικές πρόβλεψης δείχνοντας επαρκή αποτελέσματα στα πρακτικά συστήματα. Ωστόσο, δεν μπορούν να παρουσιάσουν σωστά τις σύνθετες μη γραμμικές σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ του φορτίου και μιας σειράς παραγόντων που το επηρεάζουν.

Για αυτό το λόγο, την τελευταία δεκαετία εφαρμόζονται μέθοδοι τεχνητής και υπολογιστικής νοημοσύνης. Υπάρχει επίσης μια σαφής τάση για υβριδικές μεθόδους, οι οποίες συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνικές και παρουσιάζουν αυξημένη ακρίβεια.

2.3.3 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τομέα

Ο τομέας για τον οποίο πραγματοποιείται πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ή ηλεκτρικού φορτίου διαφέρει από μελέτη σε μελέτη. Η πλειοψηφία των μελετών με τις οποίες ασχολείται η παρούσα εργασία πραγματοποιεί πρόβλεψη για το σύνολο κάποιας χώρας ή μεγάλης γεωγραφικής περιοχής. Ωστόσο, συναντήθηκαν και μελέτες οι οποίες μελετούν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας όχι στο σύνολο της αλλά σε κάποιον από τους επιμέρους βασικούς τομείς της οικονομίας. Από αυτές τις μελέτες, οι περισσότερες διερευνούν τη ζήτηση στο βιομηχανικό και τον οικιακό τομέα. Υπάρχουν όμως και μελέτες που ασχολούνται με τους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας. Χαρακτηριστικά, συναντήθηκαν μελέτες που πραγματοποιούν προβλέψεις για τους παρακάτω τομείς: Εμπορικός, γεωργικός, δημόσιος τομέας, τομέας υπηρεσιών, μεταφορών, φωτισμού και βαριά βιομηχανία.

Στην παρούσα εργασία, αναλύονται κυρίως μελέτες οι οποίες προβλέπουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για το σύνολο κάποιας χώρας ή μεγάλης γεωγραφικής περιοχής.

2.3.4 Κατηγοριοποίηση με βάση τις μεταβλητές

Στην ανάλυση της βιβλιογραφίας παρατηρήθηκε ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το είδος της μελέτης και το χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης υπάρχουν διαφορές στους προσδιοριστικούς παράγοντες.

Στις μελέτες μακροπρόθεσμης πρόβλεψης της ζήτησης η κυρίαρχη μεταβλητή είναι το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ). Το ΑΕΠ μελετάται είτε για το σύνολο μίας χώρας είτε ανά κάτοικο. Δεύτερη σε σημασία και χρήση μεταβλητή είναι ο πληθυσμός. Άλλες συχνά χρησιμοποιούμενες μεταβλητές είναι το εισόδημα, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, ο αριθμός των νοικοκυριών και το ποσοστό ανεργίας.

Επίσης, αρκετές μελέτες μελέτησαν την επίδραση των εισαγωγών και εξαγωγών στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ενώ σε μερικές μελέτες μαζί ή αντί για το ΑΕΠ χρησιμοποιήθηκε το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις εξετάζεται η επίδραση της τιμής υποκατάστατων αγαθών όπως το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο θέρμανσης στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μεμονωμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν ο πληθωρισμός, η ενεργειακή αποδοτικότητα, η εγκατεστημένη ισχύς και ο δείκτης της βιομηχανικής παραγωγής.

Όσον αφορά την επίδραση των καιρικών φαινομένων, αυτή εξετάζεται κυρίως στις μελέτες μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης της ζήτησης, ενώ υπάρχουν μερικές μελέτες μακροπρόθεσμης πρόβλεψης που τη λαμβάνουν υπόψιν. Η μετεωρολογική μεταβλητή που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι η θερμοκρασία. Επίσης, ένας μεγάλος αριθμός μελετών χρησιμοποιεί ως προσδιοριστικούς παράγοντες τις βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης. Τέλος, άλλες κλιματολογικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι το ημερήσιο εύρος θερμοκρασιών, η ταχύτητα του ανέμου, η σχετική υγρασία, το επίπεδο συννεφιάς και ο αριθμός των βροχοπτώσεων.

2.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.4.1 Μελέτες ανασκόπησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μελέτες που πραγματοποιούν ανασκόπηση των ήδη υπάρχουσων μελετών πρόβλεψης της ζήτησης.

Στη μελέτη των Alfares & Nazeeruddin (2002) [1] παρουσιάζεται μια ανασκόπηση και κατηγοριοποίηση των τεχνικών πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου. Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να χωριστούν σε εννέα κατηγορίες: 1) πολλαπλή παλινδρόμηση, 2) εκθετική εξομάλυνση, 3) επαναληπτική μέθοδος επανασταθμισμού ελαχίστων τετραγώνων, 4) προσαρμοστική πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου, 5) στοχαστικές χρονοσειρές, 6) μοντέλο ARMAX βασισμένο σε γενετικούς αλγόριθμους, 7) ασαφής λογική, 8) νευρωνικά δίκτυα και 9) έμπειρα συστήματα. Στη μελέτη αυτή περιγράφεται η μεθοδολογία κάθε τεχνικής, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της και παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφία. Από τη μελέτη αυτή φαίνεται ότι σήμερα υπάρχει μια σαφής τάση προς νέες, στοχαστικές, και δυναμικές τεχνικές πρόβλεψης. Μεγάλο μέρος της ερευνητικής προσπάθειας εστιάζεται σε τρεις τέτοιες μεθόδους: ασαφής λογική, έμπειρα συστήματα και ιδιαίτερα νευρωνικά δίκτυα. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι τα τελευταία χρόνια η πιο ενεργή περιοχή έρευνας για την πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου. Επιπλέον, υπάρχει μια σαφής τάση για υβριδικές μεθόδους, οι οποίες συνδυάζουν δύο ή περισσότερες από αυτές τις τεχνικές, ενώ μια σειρά από παλιές προσεγγίσεις φαίνεται να είναι σε δυσμένεια στις μέρες μας λόγω της περιορισμένης επιτυχίας τους. Τέλος, υπάρχει σημαντικά λιγότερη έμφαση σε μεθόδους όπως η επαναληπτική μέθοδος επανασταθμισμού ελαχίστων τετραγώνων και η προσαρμοστική πρόβλεψη φορτίου.

Ο στόχος των Esteves et al (2015) [2] είναι να γίνει το πρώτο βήμα για την κατανόηση και την ανάλυση των πιο σύγχρονων μοντέλων που εφαρμόζονται στη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα εξακολουθούν να εφαρμόζουν την top-down προσέγγιση και τις παραδοσιακές μεθόδους πρόβλεψης. Τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί πιο πολύ μέχρι σήμερα είναι τα στατιστικά ακολουθούμενα από τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης. Ωστόσο, τα υβριδικά μοντέλα τα οποία συνδυάζουν δύο ή περισσότερες μεθόδους πρόβλεψης έχουν αρχίσει να λαμβάνουν σημαντικό μέρος του ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος.

Οι Ghalekhondabi et al (2016) [3] εξετάζουν διάφορες μεθόδους πρόβλεψης ζήτησης ενέργειας που έχουν δημοσιευθεί ως ερευνητικά άρθρα την περίοδο 2005 έως 2015. Το

εύρος των εφαρμογών και τεχνικών πρόβλεψης είναι αρκετά μεγάλο, και το άρθρο αυτό επικεντρώνεται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας. Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται οι εφαρμογές παραδοσιακών τεχνικών όπως τα οικονομετρικά μοντέλα και τα μοντέλα χρονοσειρών μαζί με υπολογιστικές μεθόδους, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική και άλλα μοντέλα. Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε δείχνει ότι οι κλασικές μέθοδοι δεν μπορούν πια να οδηγήσουν σε απόλυτα ικανοποιητικές εξόδους. Οι πιο σημαντικές μελέτες εφαρμόζουν νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας αποδεικνύοντας την αξιοσημείωτη απόδοση των μοντέλων αυτών. Επίσης, σε ένα σημαντικό αριθμό μελετών όπου ένας μικρός αριθμός δεδομένων είναι διαθέσιμος, μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δίνοντας ακριβή αποτελέσματα. Τέλος, ένα πεδίο μελλοντικής έρευνας περιλαμβάνει την ανάπτυξη των υβριδικών μεθόδων.

Οι Ghods & Kalantar (2011) [4] παρουσιάζουν μια ανασκόπηση των μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν και το παρόν για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Παρουσιάζουν μεθόδους που αποτελούνται από παραδοσιακές μεθόδους, νευρωνικά δίκτυα, γενετικούς αλγόριθμους, ασαφή λογική, μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, κυματικά δίκτυα και έμπειρα συστήματα. Οι παραδοσιακές μέθοδοι, όπως π.χ. οι χρονοσειρές, τα μοντέλα παλινδρόμησης κλπ. χρησιμοποιούνται στις περισσότερες χώρες, λόγω των αξιόπιστων αποτελεσμάτων τους. Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να λύσουν μη γραμμικά προβλήματα και λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του φορτίου είναι πολύ χρήσιμα για τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη του ηλεκτρικού φορτίου. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να προβλέψουν τη μακροπρόθεσμη ζήτηση φορτίου όταν υπάρχουν πολλές διαφορετικές μεταβλητές και αναζητείται η καλύτερη λύση που ακολουθεί το μελλοντικό φορτίο. Τα κυματικά δίκτυα μπορούν να εκτιμήσουν τη μέγιστη και ελάχιστη αιχμή φορτίου καλύτερα από τις σειρές Fourier, ενώ μπορούν να συνδυαστούν με τα νευρωνικά δίκτυα για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

Οι Hahn et al (2009) [5] παρουσιάζουν μια ανασκόπηση των διάφορων μοντέλων και μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελλοντική πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου. Εξετάζονται τόσο κλασικές μέθοδοι χρονοσειρών (παλινδρομικά μοντέλα, χρονοσειρές) όσο και μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης (νευρωνικά δίκτυα, μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, υβριδικές προσεγγίσεις). Φαίνεται ότι η παλινδρόμηση διανυσμάτων υποστήριξης (Support vector regression) έχει αναδειχθεί ως μια σχετικά νέα και ανταγωνιστική μέθοδος για την πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου. Επιπλέον, όλο και περισσότερη ερευνητική προσοχή εστιάζεται σε υβριδικές προσεγγίσεις.

Στη μελέτη των Jebaraj & Iniyan (2006) [6] γίνεται μια προσπάθεια να κατανοηθούν και να επανεξεταστούν τα διάφορα αναδυόμενα ζητήματα σχετικά με την ενεργειακή

μοντελοποίηση. Οι διαφορετικοί τύποι των μοντέλων, όπως τα μοντέλα ενεργειακού σχεδιασμού, τα μοντέλα προσφοράς-ζήτησης ενέργειας, τα μοντέλα πρόβλεψης, τα μοντέλα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα μοντέλα μείωσης των εκπομπών, τα μοντέλα βελτιστοποίησης, αναθεωρούνται και παρουσιάζονται. Επίσης, μοντέλα βασισμένα στα νευρωνικά δίκτυα και την ασαφή λογική αναθεωρούνται και αναλύονται. Βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα διάφορα μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν επωφελώς σε όλα τα χρονικά πλαίσια, ενώ τα οικονομετρικά μοντέλα ταιριάζουν περισσότερο στις βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις. Επίσης, φαίνεται ότι τα νευρωνικά δίκτυα και η ασαφής λογική μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς για την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας.

Οι Singh et al (2012) [7] παρουσιάζουν μια επισκόπηση των τεχνικών πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από μελέτες που περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τα διάφορα είδη των μελετών, οι τεχνικές πρόβλεψης φορτίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις μεγάλες ομάδες: παραδοσιακές τεχνικές πρόβλεψης, τροποποιημένες παραδοσιακές τεχνικές και τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης. Από τις μελέτες που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι τεχνικές πρόβλεψης της ζήτησης που βασίζονται σε τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης κερδίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα για την αποτελεσματική τους χρήση. Υπάρχει επίσης μια σαφής τάση για υβριδικές μεθόδους, οι οποίες συνδυάζουν δύο ή περισσότερες από αυτές τις τεχνικές. Τέλος, φαίνεται ότι η έρευνα έχει αρχίσει να επικεντρώνεται σε νέες πιο αποτελεσματικές τεχνικές πρόβλεψης, αντικαθιστώντας τις παλιές.

Στη μελέτη των Suganthi & Samuel (2012) [8] γίνεται μια προσπάθεια να επανεξεταστούν τα διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της ζήτησης ενέργειας. Παραδοσιακές μέθοδοι, όπως οι χρονοσειρές, η παλινδρόμηση, οι οικονομετρικές τεχνικές, το μοντέλο πρόβλεψης ARIMA καθώς και τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης όπως η ασαφής λογική, οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως. Η παλινδρόμηση διανυσμάτων υποστήριξης (Support vector regression - SVR) και οι τεχνικές βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ant colony optimization - ACO) και σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization - PSO) είναι νέες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας. Από τη βιβλιογραφία που αναλύεται φαίνεται ότι τα μοντέλα ARIMA συνδέονται με νευρωνικά δίκτυα και άλλες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης με σκοπό να βελτιώσουν την ακρίβεια της πρόβλεψης της ζήτησης ενέργειας. Τα μοντέλα Grey prediction είναι μια ακόμα τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την ανάλυση της ζήτησης ενέργειας. Τέλος, εξελιγμένες τεχνικές μοντελοποίησης όπως η grey prediction, οι γενετικοί αλγόριθμοι, η ασαφής λογική, τα μοντέλα SVR, ACO και PSO μπορούν να

χρησιμοποιηθούν από τους ερευνητές για το μακροοικονομικό ενεργειακό προγραμματισμό και την ακριβή πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας.

2.4.2 Μελέτες πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μελέτες που πραγματοποιούν πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρικού φορτίου κατηγοριοποιημένες ανάλογα με τη μέθοδο πρόβλεψης που χρησιμοποιούν. Οι τεχνικές πρόβλεψης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τις στατιστικές μεθόδους, τις μεθόδους τεχνητής και υπολογιστικής νοημοσύνης και τις υβριδικές μεθόδους.

2.4.2.1 Στατιστικές τεχνικές

Μοντέλα Παλινδρόμησης

Τα παλινδρομικά μοντέλα χρησιμοποιούνται πολύ συχνά καθώς είναι απλά και γρήγορα στη λειτουργία τους ενώ παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι Aradula et al (2012) [9] μελετούν την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών στη μηνιαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ιταλία. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η σχετική υγρασία, το επίπεδο συννεφιάς καθώς και η ημερολογιακή επίδραση (calendar effect). Αναπτύσσεται ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης βασισμένο στις παραπάνω μεταβλητές με σκοπό την εξέταση της επίδρασης των προαναφερθέντων μεταβλητών στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε ορίζοντα ενός μήνα. Η μελέτη χρησιμοποιεί δεδομένα για την περίοδο 1994-2009. Το παραπάνω μοντέλο επιβεβαιώνει την επίδραση των καιρικών συνθηκών στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, με τη θερμοκρασία να παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο. Σε επίπεδο δεικτών αξιολόγησης, χρησιμοποιήθηκε το Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (MAPE). Το μοντέλο πρόβλεψης που αναπτύχθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη παρουσίασε Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα 1,3% για όλη την περίοδο 1994-2009, αριθμό πολύ ικανοποιητικό.

Οι Bianco et al (2009) [10] ερευνούν την επίδραση των οικονομικών και δημογραφικών μεταβλητών στην ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ιταλία με σκοπό την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της μακροπρόθεσμης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης: ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και ένα απλό μοντέλο παλινδρόμησης. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ), το ΑΕΠ ανά κάτοικο

και ο πληθυσμός. Η τιμή της ελαστικότητας της ζήτησης ως προς την τιμή είναι πολύ μικρή και έτσι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δε λαμβάνεται υπόψιν στην ανάπτυξη του μοντέλου πρόβλεψης. Με χρήση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν, πραγματοποιούνται προβλέψεις για τη χρονική περίοδο 2008-2030. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική σύγκλιση μεταξύ των επίσημων εθνικών προβλέψεων και των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη.

Οι Bianco et al (2013) [11] εξετάζουν την επιρροή των οικονομικών και δημογραφικών μεταβλητών στην ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ιταλία με σκοπό την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπτύσσονται ένα πολλαπλό και ένα απλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας ως δεδομένα την ιστορική κατανάλωση ηλεκτρισμού, το ΑΕΠ, το ΑΕΠ ανά κάτοικο και τον πληθυσμό για την περίοδο 1970-2007. Πραγματοποιούνται ετήσιες προβλέψεις για την περίοδο 2010-2030 για τον οικιακό και μη-οικιακό τομέα καθώς και συγκεντρωτικά για την Ιταλία. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων έρχονται σε σύγκριση με τις διαθέσιμες επίσημες εθνικές προβλέψεις στην Ιταλία, παρουσιάζοντας σημαντικό βαθμό σύγκλισης.

Οι Ghanbari et al (2009) [12] χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τεχνικές παλινδρόμησης (γραμμικές και λογαριθμικές) για την πρόβλεψη της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου στο Ιράν. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει ένα μοντέλο που επηρεάζεται από δύο οικονομικές παραμέτρους, οι οποίες είναι το πραγματικό ΑΕΠ και ο πληθυσμός. Χρησιμοποιώντας το πραγματικό ΑΕΠ αντί του ονομαστικού μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα επειδή ενσωματώνονται οι επιπτώσεις του πληθωρισμού στη δομή του μοντέλου. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης του μοντέλου εφαρμόζονται τεχνικές προεπεξεργασίας των δεδομένων. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η ακρίβεια του νευρωνικού δικτύου το οποίο χρησιμοποιεί προεπεξεργασμένα δεδομένα είναι αξιοσημείωτα μεγαλύτερη από των άλλων δύο συμβατικών προσεγγίσεων. Από την άλλη πλευρά, η λογαριθμική προσέγγιση παλινδρόμησης δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα από τη γραμμική παλινδρόμηση.

Στη μελέτη του Gunay (2016) [13] μοντελοποιείται η ετήσια ακαθάριστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία με χρήση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και τεχνητών νευρωνικών δικτύων σαν συνάρτηση του πληθυσμού, του ΑΕΠ ανά κάτοικο, του πληθωρισμού, του ποσοστού ανεργίας, της μέσης θερινής και της μέσης χειμερινής θερμοκρασίας. Το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι το πολυεπίπεδο perceptron (MLP). Τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν με πολύ υψηλή ακρίβεια για τα χρόνια που η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν γνωστή (2007-2013) και συγκρίθηκαν με τις επίσημες προβλέψεις. Διαπιστώνεται ότι το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προέβλεψε τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ μεγάλη

ακρίβεια, ενώ το παλινδρομικό μοντέλο απέτυχε να προβλέψει τη ζήτηση με αποδεκτή ακρίβεια.

Στη μελέτη του Nan (2010) [14], με βάση μια ολοκληρωμένη ανάλυση των σημερινών μεθόδων για τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αναπτύσσεται ένα νέο δυναμικό παλινδρομικό μοντέλο με σκοπό την πρόβλεψη και την ανάλυση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα. Το μοντέλο αυτό όταν συνδυάζεται με τη μέθοδο των χρονοσειρών και τη μέθοδο της πολυμεταβλητής παλινδρόμησης μπορεί να αντικατοπτρίσει τις μακροχρόνιες τάσεις του ηλεκτρικού συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι ένα ακριβές μοντέλο πρόβλεψης, κατάλληλο για την πρόβλεψη και ανάλυση των μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων τάσεων της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα.

Οι OrtizBevia et al (2014) [15] ερευνούν τη σχέση μεταξύ της μεσοπρόθεσμης εξέλιξης της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου και συγκεκριμένων μετεωρολογικών μεταβλητών στην Ισπανία, με χρήση παλινδρομικών μοντέλων. Τα δεδομένα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται είναι η καθημερινή ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου για την περίοδο 1993-2010, ενώ οι μετεωρολογικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι οι βαθμοήμερες θέρμανσης και ψύξης, η θερμοκρασία κατωφλίου και η μέση καθημερινή θερμοκρασία. Πραγματοποιούνται προβλέψεις ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου σε ορίζοντα ενός μήνα. Τα αποτελέσματα της μελέτης επιδοκιμάζουν την ένταξη μετεωρολογικών προβλέψεων στη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου.

Οι Panklib et al (2015) [16] χρησιμοποιούν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ταϊλάνδη. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι το ΑΕΠ, ο πληθυσμός, η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος και η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου. Λαμβάνονται δεδομένα για την περίοδο 1989-2008 και πραγματοποιούνται προβλέψεις για τα έτη 2010, 2015 και 2020. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο δίνει πιο ακριβείς εκτιμήσεις από το μοντέλο παλινδρόμησης όπως υποδεικνύεται από τους δείκτες αξιολόγησης απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή το συντελεστή προσδιορισμού (coefficient of determination), το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα και τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Άλλες μελέτες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της παλινδρόμησης είναι οι Gul et al (2011) [17], Kaytez et al (2014) [18] και Pao (2006) [19]. Οι μελέτες αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Στον πίνακα 2.1 φαίνονται κάποιες επιπλέον μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν τη μέθοδο παλινδρόμησης.

Πίνακας 2.1: Μελέτες που χρησιμοποιούν παλινδρομικά μοντέλα

Papers	Time period	Variables	Sector	Region
<i>Al-Riyami et al (2015) [20]</i>	Long term	Population changes, GDP growth	Total	Oman
<i>Bilgili et al (2011) [21]</i>	Long term	Installed capacity, gross electricity generation, population and total subscribership	Residential, industrial	Turkey
<i>Imtiaz et al (2006) [22]</i>	Long term	Gross domestic product (GDP), number of electricity consumers, population	Total	Malaysia
<i>Mohamed & Bodger (2005) [23]</i>	Long term	GDP, price of electricity, population	Total	New Zealand
<i>Mtembo et al (2014) [24]</i>	Long term	GDP, Consumer price index (CPI), population and temperature	Total	Zimbabwe
<i>Vu et al (2014)[25]</i>	Long term	Cooling and heating degree days, wind speed, rainfall, humidity, solar exposure, evaporation	Total	State of New South Wales, Australia

Μοντέλα Χρονοσειρών

Στη μελέτη των Gul et al (2011) [17] διερευνάται η σχέση μεταξύ της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και επιλεγμένων ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω μιας μήτρας συσχέτισης. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι η αύξηση του πληθυσμού, το κατά κεφαλήν εισόδημα και το ΑΕΠ. Μονοδιάστατες χρονοσειρές και οικονομετρικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη δεκαεπταετία στο Πακιστάν, χρησιμοποιώντας ετήσια δεδομένα από το 1992 μέχρι το 2010. Η επίδραση των επιλεγμένων μεταβλητών στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ζήτησης μέσω της μεθόδου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα που δίνουν το μοντέλο χρονοσειρών και το παλινδρομικό μοντέλο είναι πανομοιότυπα και παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια.

Η μελέτη των Hou et al (2008) [26] εφαρμόζει τη θεωρία της συνολοκλήρωσης με σκοπό να εξετάσει τη σχέση μακροχρόνιας ισορροπίας μεταξύ της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα και του πραγματικού ΑΕΠ, της λιανικής τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος και της οικονομικής δομής, από το 1978 έως το 2006. Με δεδομένη την ύπαρξη μιας μακροχρόνιας σχέσης, εκτιμάται το διανυσματικό μοντέλο διόρθωσης λαθών (Vector Error Correction Model) της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και προβλέπεται η βραχυπρόθεσμη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα. Επίσης, μέσα από τις διαφορετικές τάσεις των μεταβλητών, προβλέπεται η μακροχρόνια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι

υπάρχει μακροχρόνια σχέση μεταξύ των παραπάνω παραγόντων και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης δείχνουν ότι η μείωση του ρυθμού αύξησης του ΑΕΠ, η αύξηση της λιανικής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και ο περιορισμός του μεριδίου της βαριάς βιομηχανίας στην οικονομική δομή μπορούν να περιορίσουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο σκοπός της μελέτης των Perez-Garcia & Moral-Carcedo (2016) [27] είναι να παρουσιάσει έναν εναλλακτικό τρόπο ανάλυσης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένο σε ένα απλό σύστημα αποσύνθεσης του ρυθμού ανάπτυξης (simple growth rate decomposition scheme) που επιτρέπει να εντοπιστούν οι βασικοί παράγοντες πίσω από την εξέλιξη της ζήτησης. Λαμβάνοντας το σύστημα αυτό ως αφετηρία, είναι δυνατόν να αναπτυχθεί ένα μοντέλο για τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρισμού δεδομένης της αναμενόμενης εξέλιξης των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν τη ζήτηση. Η παρούσα μεθοδολογία χρησιμοποιείται στην περίπτωση της Ισπανίας με σκοπό την απόκτηση προβλέψεων μέχρι το 2030 και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι Zachariadis & Pashourtidou (2006) [28] παρουσιάζουν μια εμπειρική ανάλυση της ζήτησης ενέργειας στην Κύπρο. Χρησιμοποιώντας στοιχεία από το 1960 έως το 2004, εξετάζουν τη ζήτηση ηλεκτρισμού στον οικιακό και εμπορικό τομέα καθώς και την αλληλεπίδρασή της με το εισόδημα, τις τιμές και τον καιρό. Η ανάλυση γίνεται με τη βοήθεια τεχνικών ανάλυσης χρονοσειρών όπως ο έλεγχος μοναδιαίας ρίζας, οι έλεγχοι συνολοκλήρωσης, τα διανυσματικά μοντέλα διόρθωσης λαθών (Vector Error Correction models), η δοκιμή αιτιότητας κατά Granger και οι συναρτήσεις κρουστικής απόκρισης. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι μακροπρόθεσμα η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ελαστική ως προς το εισόδημα και ανελαστική ως προς την τιμή. Στο βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, οι μεταβολές του καιρού παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στις μεταβολές της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η επίδραση του εισοδήματος και των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σημαντική.

Μοντέλο χρονοσειρών χρησιμοποιείται επίσης στη μελέτη Zhang & Gu (2007) [29], η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Στον παρακάτω πίνακα περιλαμβάνονται κάποιες επιπλέον μελέτες που χρησιμοποιούν μεθόδους χρονοσειρών. Στον πίνακα προσδιορίζεται η μέθοδος χρονοσειρών που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 2.2: Μελέτες που χρησιμοποιούν μεθόδους χρονοσειρών

Papers	Time period	Time Series Model	Variables	Sector	Country
<i>Amarawickrama & Hunt (2008) [30]</i>	Long term	Econometric techniques	GDP per capita, Real electricity price, Underlying energy demand trend (UEDT)	Total	Sri Lanka
<i>Dilaver & Hunt (2011) [31]</i>	Long term	Structural time series technique (STSM)	Household total final consumption expenditure, Real energy prices, Underlying energy demand trend (UEDT)	Residential	Turkey
<i>Dilaver & Hunt (2011) [32]</i>	Long term	Structural time series technique (STSM)	GDP, electricity prices, UEDT (Underlying Energy Demand Trend)	Total	Turkey
<i>El-Shazly (2013) [33]</i>	Long term	Cointegration approach	Prices of electricity disaggregated by sector, Real income by sector, Population size, prices of substitutes	Industrial, agricultural, public utilities, commercial and others, residential, government	Egypt
<i>Pessanha & Leon (2015) [34]</i>	Long term	Decomposition model	Number of households, electricity consumption per unit consumer, electrification rate	Residential	Brazil

Μοντέλα Κινητού Μέσου Όρου

Ο Boran (2014) [35] παρουσιάζει την προσέγγιση Box Jenkins για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία. Για να αφαιρεθεί η εκθετική επίδραση, ο φυσικός λογαριθμικός μετασχηματισμός εφαρμόζεται στη δεδομένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο ARIMA (1,1,0) εφαρμόζεται και εξετάζεται υπολογίζοντας τρεις διαφορετικούς στατιστικούς δείκτες: τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται μελλοντικές προβλέψεις για την καθαρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία για τα επόμενα 5 χρόνια (2009-2013) χρησιμοποιώντας δεδομένα για την περίοδο 1970-2008. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το παρόν μοντέλο παράγει πιο ακριβή αποτελέσματα σε σύγκριση με άλλες μελέτες και έχει χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι Citroen et al (2015) [36] χρησιμοποιούν ένα αυτοπαλινδρομικό ολοκληρωμένο μοντέλο κινητού μέσου όρου για την πρόβλεψη του μακροχρόνιου φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας στο Μαρόκο. Χρησιμοποιούνται στοιχεία από το 1971-2012 και διεξάγονται προβλέψεις έως το 2025. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τις επίσημες προβλέψεις. Τα

αποτελέσματα της σύγκρισης δείχνουν ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μοντέλο Κινητού Μέσου Όρου χρησιμοποιείται επίσης στη μελέτη Pappas et al (2008) [37] που παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5.

Ο πίνακας 2.3 περιλαμβάνει κάποιες επιπλέον μελέτες που χρησιμοποιούν μοντέλα κινητού μέσου όρου.

Πίνακας 2.3: Μελέτες που χρησιμοποιούν μοντέλα κινητού μέσου όρου

Papers	Time period	Variables	Sector	Region
<i>Erdogdu (2007)</i> [38]	Long term	Real price of electricity, real income per capita, real GDP per capita	Total	Turkey
<i>Hussain et al (2016)</i> [39]	Long term		Total, household sector, the other government sector, agricultural, streetlight, traction, industrial and commercial sectors	Pakistan
<i>Kale & Pohekar (2014)</i> [40]	Long term	GDP growth rate, different values of elasticity of demands	Domestic, Commercial, Industry, Railway, Agriculture, Public Water Works (PWW), Street light	State of Maharashtra (India)
<i>Li-yao & Feng-mao (2013)</i> [41]	Long term		Total	China

Άλλα στατιστικά μοντέλα

Ο Pao (2006) [19] χρησιμοποιεί γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα για να διερευνήσει την επίδραση των τεσσάρων οικονομικών παραγόντων, που είναι το εθνικό εισόδημα, ο πληθυσμός, το ΑΕΠ και ο δείκτης τιμών καταναλωτή (CPI) στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ταϊβάν και στη συνέχεια να αναπτύσσει ένα οικονομικό μοντέλο πρόβλεψης. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται είναι: ένα πολλαπλό λογαριθμικό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης (LNREG), ένα παλινδρομικό μοντέλο απόκρισης επιφάνειας (RSREG), ένα μοντέλο ARMA με εξωγενή μεταβλητή (ARMAX) και ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Γίνονται προβλέψεις για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους. Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιούνται μηνιαία δεδομένα από το 1990 έως το 2000 και γίνονται μηνιαίες

προβλέψεις από τον Ιανουάριο του 2001 έως το Δεκέμβριο του 2002, ενώ στο δεύτερο γίνονται μηνιαίες προβλέψεις για την περίοδο 1997-2000. Όλες οι μέθοδοι συμφωνούν ότι ο πληθυσμός και το εθνικό εισόδημα επηρεάζουν περισσότερο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το ΑΕΠ λιγότερο. Τα αποτελέσματα των προβλέψεων υποδεικνύουν τα παρακάτω: 1) Το μοντέλο ARMAX παράγει καλύτερες προβλέψεις από τα άλλα γραμμικά μοντέλα όταν δέχεται σαν είσοδο μια μεγάλη ποσότητα ιστορικών στοιχείων, 2) Η επίδοση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι καλύτερη από των υπόλοιπων μοντέλων και στις δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους που εξετάζονται.

Ο Zachariadis (2010) [42] προβλέπει τη ζήτηση ηλεκτρική ενέργειας στην Κύπρο έως το 2030 κάνοντας χρήση μιας οικονομετρικής ανάλυσης η οποία επηρεάζεται από το εισόδημα, την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και τις καιρικές συνθήκες. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το Autoregressive Distributed Lag (ARDL) model μονής εξίσωσης. Σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να τριπλασιασθεί τα επόμενα 20-25 χρόνια, με τον οικιακό και εμπορικό τομέα να αυξάνουν το ήδη μεγάλο μερίδιό τους στη συνολική κατανάλωση. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται πέρα από το σενάριο αναφοράς και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με επίσημες προβλέψεις, η μέση θερμοκρασία στην περιοχή της Μεσογείου αναμένεται να αυξηθεί κατά 1°C κατά το 2030. Σύμφωνα με τις προβλέψεις του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη, αυτή η αλλαγή στη θερμοκρασία αναμένεται να οδηγήσει σε κατανάλωση ηλεκτρισμού το 2030 μεγαλύτερη κατά 2,9% της κατανάλωσης του σεναρίου αναφοράς.

2.4.2.2 Μέθοδοι Τεχνητής και Υπολογιστικής Νοημοσύνης

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι τα τελευταία χρόνια η πιο ενεργή περιοχή έρευνας για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκτεταμένη χρήση τους οφείλεται στα πολύ ακριβή αποτελέσματα που παράγουν.

Οι Chen & Lie (2010) [43] ερευνούν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στη Νέα Ζηλανδία. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης (feed forward backpropagation network). Οι κλιματολογικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι βαθμομέρες θέρμανσης, οι βαθμομέρες ψύξης και το ημερήσιο εύρος θερμοκρασιών (diurnal temperature range). Πραγματοποιούνται προβλέψεις για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο Auckland της Νέας Ζηλανδίας σε μεσοπρόθεσμη και

μακροπρόθεσμη βάση: σε ορίζοντα 2 εβδομάδων, σε ορίζοντα 6 μηνών και σε ορίζοντες 1 και 2 χρόνων. Αυτή η μελέτη δείχνει ότι το νευρωνικό δίκτυο είναι σε θέση να παρέχει πολύ ακριβείς προβλέψεις και είναι πολύ απλό στην υλοποίησή του. Επίσης δείχνει ότι οι μεταβολές στη θερμοκρασία έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην αναμενόμενη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι Cunkas & Altun (2010) [44] παρουσιάζουν μία μέθοδο για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία. Δύο δομές τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ένα δίκτυο τριπλού στρώματος με αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης (three-layered back-propagation network) και ένα επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο (recurrent neural network) έχουν σχεδιαστεί και δοκιμαστεί για το σκοπό αυτό. Οι προβλέψεις γίνονται για τα έτη 2008 έως 2014. Επειδή η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται κυρίως από οικονομικούς παράγοντες, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται σε οικονομικά δεδομένα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν, το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν, ο πληθυσμός, ο αριθμός των νοικοκυριών, ο δείκτης βιομηχανικής παραγωγής (IIP), η τιμή του πετρελαίου, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προβλέψεις των νευρωνικών δικτύων συγκρίνονται επίσης με τις επίσημες προβλέψεις. Το επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο προβλέπει τιμές πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα και παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιπλέον, και οι δύο δομές νευρωνικών δικτύων παράγουν καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα επίσημα αποτελέσματα.

Οι Deng (2010) [45] παρουσιάζουν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για τη μοντελοποίηση και πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα. Το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται είναι το πολυεπίπεδο Perceptron πρόσθιας τροφοδότησης με αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης [Feed forward Multilayer perceptron with backpropagation training algorithm (FF-BP-ANN)]. Η ηλεκτρική ενέργεια μοντελοποιείται σαν συνάρτηση οικονομικών παραγόντων όπως ο πληθυσμός, το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν, οι εισαγωγές και οι εξαγωγές. Χρησιμοποιούνται δεδομένα από το 1990 έως το 2008 και παράγονται προβλέψεις έως το 2050. Επίσης, γίνεται σύγκριση του νευρωνικού δικτύου με ένα πολλαπλό γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο με βάση τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE). Το νευρωνικό δίκτυο δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το παλινδρομικό μοντέλο σε όρους RMSE.

Στη μελέτη Saravanan et al (2012) [46] εφαρμόζεται ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (πολυεπίπεδο Perceptron) για την πρόβλεψη της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ινδία για περίοδο 10 ετών από το 2011 έως το 2020. Ο πληθυσμός και το κατά κεφαλήν ΑΕΠ λαμβάνονται ως οι ανεξάρτητες μεταβλητές και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι η

εξαρτημένη μεταβλητή. Χρησιμοποιούνται δεδομένα 27 χρόνων για την κατασκευή του δικτύου και 4 χρόνων για την αξιολόγηση του μοντέλου. Επίσης γίνεται σύγκριση με ένα παλινδρομικό μοντέλο σε όρους Μέσου Απόλυτου Ποσοστιαίου Σφάλματος (MAPE) για να εξεταστεί η ακρίβεια του νευρωνικού δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το νευρωνικό δίκτυο δίνει ακριβείς προβλέψεις και είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το μοντέλο παλινδρόμησης.

Άλλες μελέτες που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι οι Ghanbari et al (2009) [12], Gunay (2016) [13], Kaytez et al (2014) [18], Panklib et al (2015) [16], Pao (2006) [19]. Οι μελέτες αυτές παρουσιάζονται παραπάνω.

Στον πίνακα 2.4 φαίνονται κάποιες άλλες μελέτες που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Προσδιορίζεται επίσης το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται σε κάθε μελέτη.

Πίνακας 2.4: Μελέτες που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Papers	Time period	Network Type	Variables	Sector	Country
<i>Al Mamun & Nagasaka (2004) [47]</i>	Long term	Radial Basis Function Network (RBFN)	Gross National Product (GNP), GDP, Population, Number of households, Summer days, Cool days, Index of Industrial Production (IIP), Oil price, Electricity price, Maximum Electric Power	Total	Japan
<i>Azadeh et al (2007) [48]</i>	Mid term	Multilayer perceptron (MLP)	Electricity consumption in the previous 12 months	Total	Iran
<i>Ghiassi et al (2006) [49]</i>	Mid term	A dynamic artificial neural network model		Total	Taiwan
<i>Ghods & Kalantar (2010) [50]</i>	Long term	Radial Basis Function Networks (RBFNs)	1)GDP, 2)Population, 3)Number of households, 4)Hot days, 5)Index of Industrial Production (IIP), 6)Electricity price, 7)Maximum Electric Power	Total	Iran
<i>Hsu & Chen (2003) [51]</i>	Long term	A back-propagation network	Regional GDP, Regional population, Regional highest temperature	Total	Taiwan
<i>Ji et al (2009) [52]</i>	Mid term / Long term	Wavelet neutral network (WNN) and rough set theory	GDP, population, climate, electricity price	Total	China
<i>Kankal & Uzlu (2016) [53]</i>	Long term	Artificial neural network with teaching– learning-based optimization	Gross domestic product, population, import, and export	Total	Turkey

<i>Kavaklioglu et al (2009) [54]</i>	Long term	Multilayer perceptron neural network with back-propagation training algorithm	Population, gross national product, imports, exports	Total	Turkey
<i>Kermanshahi & Iwamiya (2002) [55]</i>	Long term	1)Recurrent Neural Network (Jordan type RNN), 2)Back Propagation Network (BP)	1)GNP, 2)GDP, 3)population, 4)number of households, 5)number of air conditioners, 6)amount of CO2 pollution, 7)index of industrial production, 8)oil price, 9)energy consumption, 10)electricity price	Total	Japan
<i>Kumaran & Ravi (2015) [56]</i>	Long term	Two artificial neural networks with biogeography-based optimization	Per capita GDP, population	Industrial, Agricultural, Domestic, Commercial, Railways, Others	India
<i>Sozen et al (2006) [57]</i>	Long term	Multilayer feed forward (MLFF) neural networks	Year, Population, Installed capacity, Gross generation	Total	Turkey

Μοντέλα Ασαφούς Λογικής

Οι Zahedi et al (2013) [58] χρησιμοποιούν ένα προσαρμοστικό νευρωνικό σύστημα ασαφούς λογικής (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS) για τη μοντελοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Οντάριο του Καναδά για την περίοδο 1976-2005. Το σύστημα ANFIS είναι ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο το οποίο εκπαιδεύεται με πειραματικά δεδομένα για να βρεθούν οι παράμετροι του συστήματος ασαφούς λογικής (FIS). Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι η απασχόληση, το ΑΕΠ, ο πληθυσμός, ο αριθμός των κατοικιών, οι βαθμομέρες θέρμανσης και οι βαθμομέρες ψύξης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν προβλέψεις για την περίοδο 2006-2015. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απασχόληση είναι η πιο σημαντική μεταβλητή για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, το μοντέλο που αναπτύχθηκε παρουσιάζει πολύ μεγάλη ακρίβεια, με Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE) 0,0016.

Ασαφή λογική χρησιμοποιούν επίσης οι Ucenic & Atsalakis (2006) [59] για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου στην Κρήτη. Η μελέτη αυτή παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5.

Στον πίνακα 2.5 περιλαμβάνονται κάποιες επιπλέον μελέτες που χρησιμοποιούν μοντέλα ασαφούς λογικής.

Πίνακας 2.5: Μελέτες που χρησιμοποιούν μοντέλα ασαφούς λογικής

Papers	Time period	Variables	Sector	Country
<i>Altinoz & Mengusoglu (2015) [60]</i>	Long term	Historical temperature and load data	Total	Turkey
<i>Azadeh et al (2013) [61]</i>	Long term	Gross domestic product (GDP), population	Total	Seven Industrialized Countries: USA, Canada, Germany, United Kingdom (UK), Japan, France and Italy
<i>Mollaiy-Berneti (2015) [62]</i>	Long term	Population, GDP, number of customers, electricity price, import, export.	Industrial	Iran
<i>Saravanan et al (2014) [63]</i>	Long term	Per capita GDP, population, import and export	Total	India
<i>Torrini et al (2016) [64]</i>	Long term	Population and the GDP additional value.	Residential, Commercial, Industrial, others	Brazil

Γενετικοί Αλγόριθμοι

Ο σκοπός της μελέτης Assareh et al (2013) [65] είναι η εκτίμηση της ζήτησης ενέργειας στο Ιράν με τη χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης βασισμένες στη δομή της βιομηχανίας και τις οικονομικές συνθήκες του Ιράν. Αυτή η μελέτη αναπτύσσει ένα σενάριο για την ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας και κάνει μελλοντικές προβλέψεις χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους (GA) και τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization - PSO). Τα μοντέλα αναπτύσσονται σε δύο μορφές (εκθετική και γραμμική) και εφαρμόζονται για την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας στο Ιράν. Η ζήτηση ενέργειας προβλέπεται από το 2006 μέχρι το 2030 χρησιμοποιώντας στοιχεία για τη ζήτηση ενέργειας για την περίοδο 1981-2005. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι ο πληθυσμός, το ΑΕΠ, οι εισαγωγές και οι εξαγωγές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν έρχονται σε μεγάλο βαθμό σύγκλισης με τα πραγματικά δεδομένα, αποδεικνύοντας ότι είναι ένα ικανοποιητικό εργαλείο για την επιτυχή πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας.

Στη μελέτη των Ozturk et al (2005) [66] παρουσιάζεται η χρήση γενετικών αλγορίθμων για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία. Η ζήτηση στο βιομηχανικό τομέα και σε συνολικό επίπεδο εκτιμάται με βάση τους βασικούς δείκτες του ΑΕΠ, του

πληθυσμού, των εισαγωγών και των εξαγωγών. Δύο διαφορετικά μη γραμμικά μοντέλα αναπτύσσονται με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Τα δύο μοντέλα αξιολογούνται με βάση τα πραγματικά δεδομένα, ενώ η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται για την περίοδο 2002 έως 2025. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και τα δύο μοντέλα γενετικών αλγορίθμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποιες άλλες μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους.

Πίνακας 2.6: Μελέτες που χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους

Papers	Time period	Variables	Sector	Country
<i>Amjadi et al (2010) [67]</i>	Long term	GDP, population, number of customers, average price of electricity	Total	Iran
<i>Azadeh & Tarverdian (2007) [68]</i>	Mid term	Previous 12 months electricity consumption	Total	Iran
<i>Azadeh et al (2006) [69]</i>	Long term	Price, value added, number of customers and consumption in the last periods	Agricultural	Iran
<i>Behrang et al (2011) [70]</i>	Long term	Number of customers, GDP, electricity production, electricity price.	Industrial	Iran
<i>Ceylan & Ozturk (2004) [71]</i>	Long term	Gross national product (GNP), population, import and export figures	Total	Turkey
<i>Cunkas & Taskiran (2011) [72]</i>	Long term	Annual data of the previous years	Total	Turkey

Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης

Οι Kaytez et al (2014) [18] εφαρμόζουν μία μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης ελαχίστων τετραγώνων [least squares support vector machines (LS-SVM)] για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία. Εκτός από αυτό, εφαρμόζεται ένα πολλαπλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης και ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Σαν ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιούνται η ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η εγκατεστημένη ισχύς και ο πληθυσμός, χρησιμοποιώντας ιστορικά στοιχεία από το 1970 έως το 2009. Οι προβλέψεις συγκρίνονται με βάση τους εξής στατιστικούς δείκτες: μέγιστο σφάλμα, μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE), μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE), ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων (SSE). Το μοντέλο LS-SVM είναι το πιο ακριβές από τα μοντέλα που εξετάζονται, ενώ και το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο δίνει ακριβή αποτελέσματα. Το μοντέλο

πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης δε δίνει ικανοποιητικές προβλέψεις παρουσιάζοντας υψηλά σφάλματα.

Οι Zhang & Gu (2007) [29] χρησιμοποιούν το κατά κεφαλήν ΑΕΠ, το ποσοστό της βαριάς βιομηχανίας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ως τις ανεξάρτητες μεταβλητές και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ως την εξαρτημένη. Μια σχέση ισορροπίας μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών αναλύεται με τη βοήθεια της ανάλυσης συνολοκλήρωσης (cointegration analysis). Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεταβλητές και την κατανάλωση ηλεκτρισμού σαν είσοδο μιας Μηχανής Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVM), προβλέπεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μια σχέση συνολοκλήρωσης μεταξύ της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και των τριών επεξηγηματικών μεταβλητών. Επίσης, τα αποτελέσματα των προβλέψεων αποδεικνύουν ότι η πολυμεταβλητή SVM είναι έγκυρη μέθοδος για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα.

Στον πίνακα 2.7 φαίνονται κάποιες άλλες μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης.

Πίνακας 2.7: Μελέτες που χρησιμοποιούν Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης.

Papers	Time period	Model	Sector	Region
<i>De Felice et al.(2015) [73]</i>	Mid term	Support Vector Machine (SVM)	Total	Italy
<i>Guo et al.(2006) [74]</i>	Mid term / Long term	Support vector machine (SVM)	Total	Hebei Province of China
<i>Pai & Hong (2005) [75]</i>	Long term	Recurrent support vector machines with genetic algorithms (RSVMG)	Total	Taiwan

Μέθοδος Grey Prediction

Στη μελέτη των Pi et al (2010) [76] εφαρμόζεται ένα μαθηματικό μοντέλο γνωστό ως grey model GM(1,1) για την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας στην Κίνα. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης, τα αρχικά GM (1,1) μοντέλα βελτιώνονται με τη χρήση των μεθοδολογιών των 3-σημείων μέσης τεχνολογίας (3-points average technology) και την τροποποίηση υπολοίπου (residual modification). Για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου διεξήχθησαν δυο πειράματα, ένα σχετικά με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ένα σχετικά με την παραγωγή ενέργειας την περίοδο 1984-2006 στην Κίνα. Επιπλέον, το βελτιωμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της παραγωγής ενέργειας για την περίοδο 2007-2015. Τα αποτελέσματα της μελέτης

δείχνουν ότι το τροποποιημένο μοντέλο πρόβλεψης είναι πιο αξιόπιστο και έχει υψηλότερη ακρίβεια πρόβλεψης από το απλό μοντέλο GM (1,1).

Στον πίνακα 2.8 περιλαμβάνονται κάποιες επιπλέον μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν τη μέθοδο Grey Prediction.

Πίνακας 2.8: Μελέτες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο Grey Prediction

Papers	Time period	Model	Sector	Region
Akay & Atak (2007) [77]	Long term	Grey prediction with rolling mechanism (GPRM)	Industrial, total	Turkey
Feng et al (2012) [78]	Long term	Grey Prediction Model [GM(1,1)]	Total	China
Hamzacebi & Es (2014) [79]	Long term	Optimized Grey Modeling (1,1)	Total	Turkey
Wang (2007) [80]	Long term	Grey Prediction with Rolling Mechanism (GPRM)	Industrial, Total	Shanghai, China
Zhou et al (2006) [81]	Mid term / Long term	Traditional grey model GM(1,1) with the trigonometric residual modification technique	Total	China

2.4.2.3 Υβριδικές Μέθοδοι

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια σαφής τάση για υβριδικές μεθόδους, οι οποίες συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνικές και παράγουν πολύ ακριβή αποτελέσματα.

Η μελέτη των Ghanbari et al (2011) [82] παρουσιάζει ένα υβριδικό μοντέλο (αποκαλούμενο ACO-GA) με την ενσωμάτωση της τεχνικής βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization), γενετικών αλγορίθμων και ασαφούς λογικής. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Ιράν. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι το πραγματικό ΑΕΠ, ο πληθυσμός, ο δείκτης τιμών χονδρικής και η ενεργειακή απόδοση. Χρησιμοποιούνται δεδομένα από το 1971 μέχρι το 2007. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με ένα προσαρμοστικό νευρωνικό σύστημα ασαφούς λογικής (adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS). Ο δείκτης του μέσου απολύτου ποσοστιαίου σφάλματος (MAPE) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υβριδικό μοντέλο παρουσιάζει πιο ακριβή αποτελέσματα από το μοντέλο ANFIS.

Οι Kiran et al (2011) [83] παρουσιάζουν ένα νέο υβριδικό μοντέλο βασισμένο στις τεχνικές βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) και βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization - ACO) για την πρόβλεψη

της ζήτησης ενέργειας στην Τουρκία. Το υβριδικό μοντέλο αναπτύσσεται σε γραμμική και τετραγωνική μορφή και χρησιμοποιεί σαν μεταβλητές το ΑΕΠ, τον πληθυσμό, τις εισαγωγές και τις εξαγωγές. Η μελλοντική ζήτηση εκτιμάται χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια. Χρησιμοποιούνται δεδομένα από το 1979 έως το 2005 και η πρόβλεψη γίνεται για την περίοδο 2006-2025. Για να αποδειχθεί η ακρίβεια του μοντέλου, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του και των αποτελεσμάτων που δίνουν οι τεχνικές PSO και ACO αν χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υβριδικό μοντέλο δίνει πιο ακριβείς προβλέψεις από τις μεθόδους PSO και ACO.

Ο Musa (2016) [84] παρουσιάζει έναν υβριδικό μοντέρνο και κλασσικό αλγόριθμο (hybrid modern and classical algorithm - HMCA) για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων πρόβλεψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέρνο μοντέλο είναι ένας γενετικός αλγόριθμος, ενώ το κλασσικό μοντέλο είναι ο αλγόριθμος του Nelder-Mead. Η απόδοση του υβριδικού μοντέλου ελέγχεται χρησιμοποιώντας δεδομένα για την πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ινδονησία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι η ιστορική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας την περίοδο 1970-2009, ο πληθυσμός, το ΑΕΠ, οι εισαγωγές και οι εξαγωγές. Πραγματοποιούνται προβλέψεις από το 2010 έως το 2030. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενσωμάτωση της σύγχρονης και κλασσικής μεθόδου είναι εφαρμόσιμη για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έχοντας μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης για να φτάσει στη βέλτιστη λύση. Το υβριδικό μοντέλο υπερτερεί των γενετικών αλγορίθμων τόσο σε ακρίβεια όσο και σε ταχύτητα.

Ο Toksari (2016) [85] παρουσιάζει την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα της Τουρκίας χρησιμοποιώντας ένα υβριδικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization - ACO) και της επαναληπτικής τοπικής αναζήτησης (Iterated Local Search - ILS). Χρησιμοποιούνται ορισμένοι οικονομικοί δείκτες όπως ο πληθυσμός, το ΑΕΠ, οι εισαγωγές και οι εξαγωγές για τη διαμόρφωση του υβριδικού μοντέλου. Το υβριδικό μοντέλο αναπτύσσεται σε δύο διαφορετικές μορφές, μία γραμμική και μία τετραγωνική και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της οικιακής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία μέχρι το 2030 κάτω από διαφορετικά σενάρια. Οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου είναι το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δύο υβριδικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν είναι πολύ αποτελεσματικά στην πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης δείχνουν ότι η τετραγωνική μορφή του υβριδικού μοντέλου παράγει καλύτερα αποτελέσματα

λόγω της ικανότητάς του να αντανακλά καλύτερα τις μεταβολές των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών.

Στον πίνακα 2.9 φαίνονται κάποιες άλλες μελέτες που χρησιμοποιούν υβριδικά μοντέλα και προσδιορίζεται κάθε φορά το υβριδικό μοντέλο που εφαρμόζεται.

Πίνακας 2.9: Μελέτες που χρησιμοποιούν υβριδικές μεθόδους

Papers	Time period	Hybrid Model	Variables	Sector	Region
<i>Baral & Sadegh (2016) [86]</i>	Long term	Ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm	Population, GDP, export and import data	Total	Iran
<i>Yu et al (2015) [87]</i>	Long term	Hybrid self-adaptive Particle Swarm Optimization – Genetic Algorithm – Radial Basis Function model	GDP, the resident population, the output share of tertiary industries in GDP, average annual temperature, industrial energy intensity	Total	Wuhan city of Hubei Province, China.
<i>Zhao & Guo (2016) [88]</i>	Long term	A hybrid optimized grey model: Grey Modelling (1, 1) optimized by Ant Lion Optimizer with Rolling mechanism (Rolling-ALO-GM (1, 1))		Total	1)China, 2)Shanghai city

2.5 Η Ελληνική Βιβλιογραφία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η έρευνα για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας την Ελλάδα.

Οι Christodoulakis et al (2000) [89] προσπαθούν να εκτιμήσουν τη μελλοντική ζήτηση για ενέργεια και την τροχιά των εκπομπών φυσικού αερίου στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο του Δεύτερου Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης στην αναπτυξιακή διαδικασία και τη διείσδυση του φυσικού αερίου στο ενεργειακό σύστημα. Οι πηγές ενέργειας που εξετάζονται είναι το πετρέλαιο, η ηλεκτρική ενέργεια και τα στερεά καύσιμα χρησιμοποιώντας δεδομένα από το 1974 έως το 1994. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική τελική κατανάλωση αυξάνεται σημαντικά, ενώ ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης των προβλεπόμενων εκπομπών

CO^2 για την περίοδο 1990-2012 κυμαίνεται από 1,8% έως 2,2%, ένα ποσοστό που είναι υψηλότερο από τις παγκόσμιες προβλέψεις.

Οι Dergiades et al (2012) [90] εξετάζουν τις γραμμικές και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ της συνολικής ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάπτυξη της ελληνικής οικονομίας, χρησιμοποιώντας ετήσια δεδομένα από το 1960 έως το 2008. Εκτός από την εφαρμογή της πρότυπης δοκιμής αιτιότητας κατά Granger (Granger, 1969), εφαρμόζεται και ο μη παραμετρικός έλεγχος των Hiemstra και Jones (Hiemstra and Jones 1994) για διαπίστωση μη γραμμικής αιτιότητας καθώς και η πρόσφατη τροποποίησή του που προτάθηκε από τους Dils και Panchenko (2006). Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι υπάρχει μία σημαντική μονόδρομη γραμμική και μη γραμμική σχέση αιτιότητας από την οικονομική ανάπτυξη στην κατανάλωση ενέργειας.

Ο Ekonomou (2010) [91] αναπτύσσει ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με σκοπό την πρόβλεψη της μακροχρόνιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Το νευρωνικό δίκτυο που αναπτύσσεται είναι το πολυεπίπεδο perceptron με αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης (backpropagation multilayer perceptron) και χρησιμοποιεί ως μεταβλητές τη θερμοκρασία, τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ και το ΑΕΠ. Πραγματοποιούνται ετήσιες προβλέψεις για τα έτη 2005-2008, 2010, 2012 και 2015. Επίσης, γίνεται σύγκριση των παραγόμενων από το νευρωνικό δίκτυο προβλέψεων για τα έτη 2005-2008 με τα αποτελέσματα που παράχθηκαν από ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, από μία μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης καθώς και με τα πραγματικά στοιχεία της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης επιβεβαιώνουν την ακρίβεια του νευρωνικού δικτύου αφού οι προβλέψεις βρίσκονται πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα και είναι πιο ακριβείς από τις προβλέψεις του γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου και της μηχανής διανυσμάτων υποστήριξης.

Ο Hondroyiannis (2004) [92] μελετάει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας χρησιμοποιώντας μηνιαία δεδομένα για την περίοδο 1986-1999. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, το εισόδημα και η σταθμισμένη μέση θερμοκρασία. Τεχνικές συνολοκλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα καθώς και για να εξετασθεί η ευαισθησία της στις μεταβολές του εισοδήματος και της τιμής τόσο μακροπρόθεσμα όσο και βραχυπρόθεσμα. Η μακροχρόνια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τις μεταβολές στις καιρικές συνθήκες σταθμισμένες με το μέγεθος του πληθυσμού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μακροχρόνια η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από μεταβολές στο εισόδημα, την τιμή του ηλεκτρισμού και τη σταθμισμένη μέση θερμοκρασία. Η ελαστικότητα ως προς το εισόδημα είναι 1,56 ενώ η ελαστικότητα της τιμής είναι -0,41. Βραχυχρόνια, η ζήτηση ηλεκτρισμού είναι ανελαστική ως προς το εισόδημα και

ανεξάρτητη από την τιμή, ενώ δε φαίνεται να υπάρχει κάποια επίδραση από τη μέση σταθμισμένη θερμοκρασία.

Οι Mirasgedis et al (2006) [93] αναπτύσσουν δύο στατιστικά μοντέλα για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα για έως και 12 μήνες χρησιμοποιώντας τις παρακάτω κλιματικές παραμέτρους: σχετική υγρασία, βαθμοήμερες θέρμανσης, βαθμοήμερες ψύξης. Αναπτύσσονται δύο μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης, εκ των οποίων το πρώτο παρέχει ημερήσιες και το δεύτερο μηνιαίες προβλέψεις. Τα δύο μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για το 2003 για τέσσερα εναλλακτικά μετεωρολογικά σενάρια. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι τα δύο μοντέλα παράγουν προβλέψεις υψηλής ακρίβειας. Το ημερήσιο αυτοπαλινδρομικό μοντέλο είναι σε θέση να προβλέψει τη μηνιαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με μέγιστο σφάλμα μικρότερο του 4,6% για ορίζοντα ενός έτους και μέγιστο σφάλμα μικρότερο του 2,8% για ορίζοντα ενός μήνα. Το μηνιαίο μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης είναι ικανό να προβλέψει τη μηνιαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε ορίζοντα ενός χρόνου με μέγιστο σφάλμα μικρότερο του 2,7%.

Οι Pappas et al (2008) [37] απευθύνονται στο πρόβλημα της μοντελοποίησης της ζήτησης ηλεκτρικό φορτίου στην Ελλάδα. Σαν δεδομένο χρησιμοποιείται η καθημερινή ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου για την περίοδο από τον Ιανουάριο του 2014 μέχρι το Δεκέμβριο του 2015. Η χρονοσειρά αποεποχικοποιείται και στη συνέχεια ένα αυτοπαλινδρομικό μοντέλο κινητού μέσου (ARMA) εφαρμόζεται στη νέα χρονοσειρά. Τα παραγόμενα αποτελέσματα υποστηρίζουν την ικανότητα της μεθόδου να αντιμετωπίσει με επιτυχία το πρόβλημα της μοντελοποίησης της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου. Για σκοπούς επαλήθευσης τα παραγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται με τρεις άλλες μεθόδους: Akaike Corrected Information Criterion (AICC), Akaike's Information Criterion (AIC) and Schwarz's Bayesian Information Criterion (BIC). Το παρόν μοντέλο μπορεί να είναι χρήσιμο σε μελέτες που αφορούν την πρόβλεψη της ζήτησης και της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο Polemis (2007) [94] επιχειρεί να εντοπίσει τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση ενέργειας στο βιομηχανικό τομέα της Ελλάδας. Για αυτό το λόγο, εκτιμήθηκαν οι ελαστικότητες της ζήτησης πετρελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας για την περίοδο 1970-2004. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βιομηχανική ζήτηση ενέργειας στην Ελλάδα είναι ανελαστική τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Επίσης, όπως φάνηκε από τη μελέτη, η ηλεκτρική ενέργεια και το πετρέλαιο είναι υποκατάστατα. Τέλος, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να μην επηρεάζεται από μεταβολές στη θερμοκρασία και στον αριθμό των καταναλωτών.

Οι Psiloglou et al (2009) [95] πραγματοποιούν μια συγκριτική ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Αθήνα και στο Λονδίνο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό της μελέτης ήταν η ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό και εμπορικό τομέα από το 1997 έως το 2001 καθώς και η ωριαία θερμοκρασία για το ίδιο χρονικό διάστημα. Αρχικά, εντοπίζονται και για τις δύο πόλεις οι ετήσιες τάσεις που συνδέονται με οικονομικούς, κοινωνικούς και δημογραφικούς παράγοντες καθώς και διάφορα άλλα γεγονότα όπως οι εργάσιμες μέρες, τα οποία δεν σχετίζονται με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν ανά κάτοικο για να αφαιρεθεί η τάση των δεδομένων και να απομονωθεί η επίδραση των κλιματικών συνθηκών στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ευρήματα της μελέτης δείχνουν ότι η θερμοκρασία παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στην έλεγχο της ζήτησης του ηλεκτρικού φορτίου. Επίσης, και για τις δύο πόλεις οι αιχμές ηλεκτρικού φορτίου εμφανίζονται το χειμώνα, ενώ στην Αθήνα εμφανίζεται μια δεύτερη αιχμή το καλοκαίρι και η οποία δεν υπάρχει στο Λονδίνο. Τέλος, και για τις δύο πόλεις η ευαισθησία της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη το χειμώνα.

Οι Rapanos & Polemis (2006) [96] επιχειρούν να εντοπίσουν τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση ενέργειας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας και να κάνουν μία σύγκριση με τις άλλες χώρες του ΟΟΣΑ. Για το σκοπό αυτό, εκτιμήθηκαν οι ελαστικότητες της ζήτησης ενέργειας ως προς το εισόδημα και την τιμή της ενέργειας για την περίοδο 1965-1999. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μακροπρόθεσμα η ζήτηση ενέργειας στον οικιακό τομέα είναι ανελαστική ως προς την τιμή αλλά ελαστική ως προς το εισόδημα. Αντίθετα, βραχυπρόθεσμα η ελαστικότητα ως προς το εισόδημα είναι μικρότερη της μονάδας (ανελαστική ζήτηση). Επίσης, καμία από τις δύο ενεργειακές κρίσεις (1973/79) δεν είχε κάποια θετική και σημαντική επίδραση στη ζήτηση ενέργειας. Όσον αφορά τις συγκρίσεις με τις άλλες χώρες του ΟΟΣΑ, φαίνεται ότι το μέγεθος της ελαστικότητας ως προς το εισόδημα διαφέρει αισθητά ανάμεσα στην Ελλάδα και τις άλλες χώρες. Ο οικιακός τομέας στην Ελλάδα φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητος στις μεταβολές του εισοδήματος από ό,τι σε άλλες χώρες, όπου η ζήτηση ενέργειας ως προς το εισόδημα είναι ανελαστική.

Οι Tsekouras et al (2007) [97] περιγράφουν ένα μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης πολλών μεταβλητών για την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας σε ετήσια βάση. Χρησιμοποιούνται δεδομένα από το 1986-2000 και παράγονται προβλέψεις από το 2001-2003. Το μοντέλο που αναπτύσσεται εφαρμόζεται στην περίπτωση της Ελλάδας και παράγονται προβλέψεις για το ελληνικό ενεργειακό σύστημα και για τρεις διαφορετικές κατηγορίες πελατών χαμηλής τάσης: βιομηχανικό, εμπορικό και τομέα φωτισμού. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που λαμβάνονται από

την εφαρμογή κλασικών μεθόδων παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος που αναπτύχθηκε παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και πιο ακριβείς προβλέψεις από τα κλασικά μοντέλα παλινδρόμησης και για τις τρεις παραπάνω κατηγορίες πελατών.

Οι Uscenic & Atsalakis (2006) [59] χρησιμοποιούν ένα νευρο-ασαφές μοντέλο για την πρόβλεψη της μεσοπρόθεσμης ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου στην Κρήτη. Το μοντέλο χρησιμοποιεί σαν είσοδο τη χρονοσειρά των μηνιαίων στοιχείων ηλεκτρικού φορτίου. Για την πρόβλεψη φορτίου χρησιμοποιείται ένα προσαρμοστικό νευρωνικό σύστημα ασαφούς λογικής (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα ενός μοντέλου Αυτοπαλινδρόμησης (AR) και ενός Αυτοπαλινδρομικού Μοντέλου Κινητού Μέσου όρου (ARMA). Το μοντέλο ANFIS δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα σε σύγκριση με τα κλασικά μοντέλα πρόβλεψης των AR και ARMA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.1 Ιστορική αναδρομή

Η εμφάνιση της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν καθοριστική στη δρομολόγηση της δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης [98]. Ο ηλεκτρισμός αντικατέστησε τον ατμό, το πετρέλαιο και το φωταέριο και οδήγησε σε ριζική αλλαγή των συνθηκών παραγωγής. Η ηλεκτρική ενέργεια προσέφερε μεγάλη οικονομία, ασφάλεια, υψηλή ποιότητα ενώ συνέβαλε στην προστασία του περιβάλλοντος καθώς οδηγούσε σε μικρότερη μόλυνσή του. Οι ηλεκτροκινητήρες ήταν μικροί και ευέλικτοι, δίνοντας τη δυνατότητα να επιλεγεί μια νέα παραγωγική δομή στα εργοστάσια. Η βιομηχανία και οι πόλεις πήραν νέα μορφή όταν ο ηλεκτρισμός άρχισε να παράγεται και να διανέμεται ευρύτερα.

Τα πάντα ξεκίνησαν στα τέλη του 19ου αιώνα. Το 1881 λειτούργησε η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ισχύος 746 KW, σε κάποιο σημείο μεταξύ Λονδίνου και Πόρτσμουθ. Το επόμενο έτος εγκαταστάθηκε η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Στουτγάρδη της Γερμανίας. Τα πρώτα μεγέθη ήταν πάρα πολύ μικρά σε σύγκριση με τα σημερινά. Χαρακτηριστικά, η πρώτη μονάδα παραγωγής της Στουτγάρδης παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια για περίπου 30 λάμπες πυρακτώσεως. Η δημιουργία δικτύων θα ξεκινήσει λίγο αργότερα στο Βερολίνο. Το δικαίωμα της εταιρείας παραγωγής αφορούσε την εγκατάσταση δικτύου ακτίνας 800 μέτρων από τη μονάδα παραγωγής.

Η δεκαετία 1880-1890 υπήρξε μια δεκαετία ραγδαίας ανάπτυξης και εξέλιξης της νέας τεχνολογίας. Εφευρέτες και κατασκευαστές θα προσπαθήσουν να επιλύσουν τα προβλήματα που συναντούσαν και να εξελίξουν τις μεθόδους και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε.

Ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα θα φτάσει το 1889 [99,100]. Σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία της ΔΕΗ Α.Ε., η Γενική Εταιρεία Εργοληψιών κατασκευάζει στην Αθήνα, στην οδό Αριστείδου, την πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Το πρώτο κτίριο που φωτίζεται είναι τα Ανάκτορα. Πολύ σύντομα ο ηλεκτροφωτισμός επεκτείνεται στο σημερινό ιστορικό κέντρο της πρωτεύουσας. Τον ίδιο χρόνο η Θεσσαλονίκη, που ήταν ακόμα σε Τουρκική κατοχή, θα δει κι αυτή το ηλεκτρικό φως καθώς Βελγική Εταιρεία αναλαμβάνει απ' τις Τουρκικές αρχές το φωτισμό και την τροchioδρόμηση της Πόλης με την κατασκευή εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Δέκα χρόνια αργότερα οι πρώτες πολυεθνικές εταιρείες ηλεκτρισμού κάνουν την εμφάνισή τους στην Ελλάδα. Η αμερικανική εταιρεία Thomson-Houston με τη συμμετοχή της Εθνικής Τράπεζας ιδρύουν την Ελληνική Ηλεκτρική Εταιρεία η οποία αναλαμβάνει την ηλεκτροδότηση και άλλων μεγάλων Ελληνικών πόλεων. Έτσι, μέχρι το 1929 θα έχουν

ηλεκτροδοτηθεί περίπου 250 πόλεις, με πάνω από 5.000 κατοίκους να έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια.

Στις πιο απομακρυσμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές ήταν οικονομικά ασύμφορο για τις μεγάλες εταιρείες να κατασκευάσουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Την ηλεκτροδότηση των περιοχών αυτών αναλαμβάνουν ιδιώτες ή δημοτικές και κοινοτικές αρχές κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια. Το έτος 1950 υπήρχαν στην Ελλάδα 385 εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εκ των οποίων οι 263 ήταν ιδιωτικές με απλή άδεια, οι 54 ιδιωτικές με προνομιακή άδεια και 58 δημοτικές ή κοινοτικές, ενώ υπήρχαν και 10 ιδιωτικές χωρίς άδεια. Κάθε πόλη είχε το δικό της εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα πρωτογενή καύσιμα που χρησιμοποιούνταν ήταν το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας, αμφότερα εισαγόμενα από το εξωτερικό.

Ο καταμερισμός της παραγωγής σε πολλές μικρές μονάδες, σε συνδυασμό με τα εισαγόμενα καύσιμα, εξωθούσε την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στα ύψη, φτάνοντας στο σημείο να έχει τριπλάσια μέχρι και πενταπλάσια τιμή έναντι των τιμών που ίσχυαν στις άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Η ηλεκτρική ενέργεια ήταν λοιπόν ένα αγαθό πολυτελείας, ενώ τις περισσότερες φορές παρεχόταν με ωράριο και οι ξαφνικές διακοπές ρεύματος ήταν ένα πολύ σύνηθες φαινόμενο.

Για να εξαπλωθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε όλη τη χώρα και για να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο στη βιομηχανία όσο και στην ύπαιθρο, έπρεπε να ικανοποιούνται μερικές προϋποθέσεις. Αυτές ήταν:

- Αξιοποίηση των εγχώριων πλουτοπαραγωγικών πόρων, που απαιτούσε όμως τεράστιες επενδύσεις, οι οποίες δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν από τους διάφορους μεμονωμένους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ενοποίηση της παραγωγής σε ένα ενιαίο διασυνδεδεμένο δίκτυο, ώστε όλα τα φορτία να επιμερίζονται σε εθνική κλίμακα.
- Ύπαρξη ενιαίου φορέα που θα επέτρεπε τον επιμερισμό του κόστους ανάμεσα στις κερδοφόρες και ζημιωγόνες περιοχές.

Τις προϋποθέσεις αυτές κάλυψε η ΔΕΗ με τον πλέον επιτυχή τρόπο.

Έτσι τον Αύγουστο του 1950 ιδρύθηκε η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού και όλες οι δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώθηκαν σε ένα δημόσιο φορέα. Η ΔΕΗ είχε ως στόχο να λειτουργήσει υπέρ του δημοσίου συμφέροντος με σκοπό τη χάραξη και εφαρμογή μιας εθνικής ενεργειακής πολιτικής, η οποία μέσα από την εντατική εκμετάλλευση των εγχώριων πόρων, να κάνει το ηλεκτρικό ρεύμα κτήμα και δικαίωμα του κάθε Έλληνα πολίτη, στην καλύτερη δυνατή τιμή.

Το αρχικό κεφάλαιο της ΔΕΗ αποτελούνταν από τα κεφάλαια σε συνάλλαγμα, δραχμές, μηχανήματα, υλικά και υπηρεσίες που παρέχονταν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ανόρθωσης της αμερικανικής βοήθειας, από τις ιταλικές επανορθώσεις καθώς και από κεφάλαια του κρατικού προϋπολογισμού.

Αμέσως μετά την ίδρυσή της, η ΔΕΗ στρέφεται προς την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας ενώ ξεκινά και η ενοποίηση όλων των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο Σύστημα. Τα πλούσια λιγνιτικά κοιτάσματα του ελληνικού υπεδάφους άρχισαν να εξορύσσονται και να χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που δημιουργούσε η ΔΕΗ. Ταυτόχρονα, ξεκίνησε και η αξιοποίηση της δύναμης των υδάτων με την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών στα μεγαλύτερα ποτάμια της χώρας.

Έξι χρόνια μετά την ίδρυση της ΔΕΗ, αποφασίστηκε η εξαγορά όλων των ιδιωτικών και δημοτικών επιχειρήσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να υπάρχει ένας ενιαίος εθνικός φορέας διαχείρισης. Σταδιακά, η ΔΕΗ εξαγόρασε όλες τις μεμονωμένες επιχειρήσεις και ενέταξε το προσωπικό τους στις τάξεις της.

Όταν ιδρύθηκε η ΔΕΗ το 1950, η κατανάλωση ανά κάτοικο ήταν 88 KWh το χρόνο και ο ηλεκτρισμός είχε φτάσει στο 50% του πληθυσμού της Ελλάδας. Πέντε χρόνια αργότερα η κατανάλωση έφτασε τις 150 KWh και ο ηλεκτροδοτούμενος πληθυσμός της χώρας έφτασε το 59,1%.

3.2 Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η απελευθέρωση της παγκόσμιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας κάνει την εμφάνισή της τη δεκαετία του '90 ξεκινώντας με μεγάλο ενθουσιασμό για την αλλαγή και την κατάργηση του μονοπωλίου που επικρατούσε μέχρι τότε [101]. Ο ενθουσιασμός αυτός τελείωσε με την πτώση της Enron και την χρεοκοπία μεγάλων εμπόρων ενέργειας των Η.Π.Α., όπως είναι οι Dynergy, Mirant και El Paso. Αυτές οι εταιρείες αναγκάστηκαν να κλείσουν τα γραφεία τους στην Ευρώπη και το κλίμα που δημιουργήθηκε για τις βιομηχανίες ηλεκτρικής ενέργειας ήταν δυσάρεστο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αμφισβητηθεί το έργο και ο ρόλος τους, η απελευθέρωσή τους και γενικότερα κάθε απελευθέρωση εμπορεύματος που βρισκόταν κάτω από το κρατικό μονοπώλιο.

Μετά από μια μακρά περίοδο αναζητήσεων, προετοιμασίας και μελετών τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο, δημιουργείται βαθμιαία η ελεύθερη αγορά στον τομέα της

ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό θα επιτρέψει σε πελάτες να επιλέγουν τον προμηθευτή τους και σε νέους παραγωγούς να ανταγωνιστούν τη ΔΕΗ, που ήταν μέχρι τότε ο μόνος παραγωγός.

Έτσι, στην Ελλάδα δημιουργείται η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) με βάση το Νόμο 2773/99 ο οποίος και αποτέλεσε το βασικό θεσμικό υπόβαθρο [99]. Η ΡΑΕ είναι μια ανεξάρτητη αρχή που φροντίζει, εισηγείται και προωθεί την ύπαρξη συνθηκών ίσων ευκαιριών και υγιούς ανταγωνισμού και παρέχει την άδεια λειτουργίας σε παραγωγούς, προμηθευτές και λοιπούς φορείς της αγοράς.

Το δικαίωμα ελεύθερης επιλογής Προμηθευτή Ηλεκτρικής Ενέργειας υφίσταται ήδη από το 2004, για όλους τους επαγγελματικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές. Το αντίστοιχο δικαίωμα για τους οικιακούς καταναλωτές, τέθηκε σε πλήρη εφαρμογή την 1η Ιουλίου 2007, με εξαίρεση τους καταναλωτές που είναι εγκατεστημένοι στα μη Διασυνδεδεμένα νησιά. Έτσι το 2007 θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως χρονιά ορόσημο για τις ενεργειακές αγορές σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, λόγω της πλήρους απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Σήμερα πολλοί Ευρωπαίοι καταναλωτές απολαμβάνουν στην καθημερινότητά τους το δικαίωμα επιλογής προμηθευτή. Ωστόσο, επειδή στην Ελλάδα και στις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες δεν έχουν ενεργοποιηθεί ιδιαίτερα άλλοι αξιόπιστοι προμηθευτές ενέργειας πέραν του Δεσπόζοντος, το δικαίωμα ελεύθερης επιλογής δεν έχει ασκηθεί για την πλειοψηφία των καταναλωτών.

Όμως, είναι γεγονός ότι η απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προχωράει με αργά αλλά σταθερά βήματα. Οι νόμοι έχουν δώσει το δικαίωμα σε ανεξάρτητους παραγωγούς και προμηθευτές να δραστηριοποιηθούν στην αγορά ηλεκτρικής ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζουν την πρόσβαση των χρηστών στο Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς διακρίσεις. Έτσι δραστηριοποιούνται στην Εμπορία & Προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας αρκετές εταιρείες και ήδη κάποιοι καταναλωτές προμηθεύονται ηλεκτρική ενέργεια από άλλους προμηθευτές πέραν της ΔΕΗ Α.Ε.. Παράλληλα ορισμένες βιομηχανίες εισάγουν ηλεκτρική ενέργεια για ίδια κατανάλωση.

Το 2011, η λιανική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από την αύξηση στην καταγραφή ποσοστών αλλαγής εκπροσώπησης ανά κατηγορία πελατών (supplier switching). Ειδικά στην κατηγορία των εμπορικών και βιομηχανικών πελατών της ΧΤ και ΜΤ το 12,3% και το 11,5% (ανά όγκο κατανάλωσης) των αντίστοιχων πελατών είχε αλλάξει προμηθευτή μέχρι το τέλος του 2011. Το μερίδιο αγοράς της ΔΕΗ Α.Ε. στο σύνολο της λιανικής αγοράς και όσον αφορά τον όγκο κατανάλωσης παρέμεινε ιδιαίτερα υψηλό και το 2011, αλλά αναπτύχθηκε κινητικότητα κυρίως προς 2 εναλλακτικούς προμηθευτές, γεγονός που υποδηλώνει και τη διάθεση των καταναλωτών για ανάπτυξη του ανταγωνισμού στο χώρο της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας.

3.3 Ανεξάρτητοι φορείς στην αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.3.1 Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) είναι ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή, η οποία συστήθηκε με το ν.2773/1999, στο πλαίσιο εναρμόνισης με τις Οδηγίες 2003/54/EK και 2003/55/EK για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο, με στόχο την παρακολούθηση της ελληνικής αγοράς ενέργειας [99]. Έχει την έδρα της στην Αθήνα, έχει νομική προσωπικότητα και παρίσταται αυτοτελώς σε δίκες που έχουν ως αντικείμενο πράξεις ή παραλείψεις της ή έννομες σχέσεις που την αφορούν. Η ΡΑΕ υπόκειται μόνο σε κοινοβουλευτικό και σε δικαστικό έλεγχο.

Σκοπός της ΡΑΕ είναι να εξασφαλίσει με θεσμικό τρόπο τους μακροχρόνιους στρατηγικούς στόχους της ενεργειακής πολιτικής και την εξυπηρέτηση του δημοσίου συμφέροντος. Τέτοιοι στόχοι είναι η επαρκής, ισότιμη και αξιόπιστη τροφοδοσία όλων των καταναλωτών, η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, η προστασία του περιβάλλοντος στο πλαίσιο και των διεθνών υποχρεώσεων της χώρας, η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των νέων τεχνολογιών, η ενίσχυση της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας της εθνικής οικονομίας και η εξασφάλιση επαρκούς υποδομής για την ενέργεια. Επίσης, έχει γνωμοδοτική αρμοδιότητα στη χορήγηση αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα καθώς και αποφασιστική αρμοδιότητα για τη χορήγηση αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, έχει την αποκλειστική αρμοδιότητα ελέγχου των υπολοίπων φορέων: ΛΑΓΗΕ, ΑΔΜΗΕ, ΔΕΔΔΗΕ και ΔΕΗ ΑΕ.

Τέλος, αναλαμβάνει διεθνείς συνεργασίες τόσο με τις χώρες των Βαλκανίων και της Ευρασίας, όσο και στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο ρόλος της ΡΑΕ ως εθνικής ρυθμιστικής αρχής ενέργειας αναβαθμίστηκε από το 2011 και μετά, με την επαύξηση και ενίσχυση των αρμοδιοτήτων της σχετικά με τη ρύθμιση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου.

3.3.2 Ο Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ Α.Ε.) αποτελεί το ελληνικό χρηματιστήριο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας [102]. Ιδρύθηκε με βάση το ν 4001/2011 για τη Λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις.

Ο ΛΑΓΗΕ είναι αρμόδιος για τη λειτουργία των δύο διακριτών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας:

- Της βραχυχρόνιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, η οποία ρυθμίζεται μέσω του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού
- Της μακροχρόνιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και της διαθεσιμότητας ισχύος

Ασκή τις δραστηριότητες που ασκούνταν από τον Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ ΑΕ), εκτός από εκείνες που μεταφέρθηκαν στον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ ΑΕ).

3.4 Η σύγχρονη ΔΕΗ Α.Ε.

Από 1.1.2001 η ΔΕΗ Α.Ε. λειτουργεί ως ανώνυμη εταιρεία ενώ από 12.12.2001 έχει εισαχθεί στα Χρηματιστήρια Αξιών Αθηνών και Λονδίνου.

Η ΔΕΗ Α.Ε. είναι σήμερα η μεγαλύτερη εταιρεία παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα [99,100]. Διαθέτει μια μεγάλη υποδομή σε εγκαταστάσεις ορυχείων λιγνίτη, παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατέχει περίπου το 64% της εγκατεστημένης ισχύος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα συμπεριλαμβάνοντας στο ενεργειακό της μείγμα λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, καθώς και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Το 2015 η ΔΕΗ παρήγαγε 34,1 TWh οι οποίες μαζί με τις 3,2 TWh που εισήγαγε, κάλυψαν το 63,4% της συνολικής ζήτησης. Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια προήλθε από λιγνίτη (57%), πετρέλαιο (13,4%), φυσικό αέριο (13%), ύδατα (15,8%) και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (0,8%). Οι περίπου 7,4 εκατομμύρια πελάτες της ΔΕΗ κατανάλωσαν κατά το 2015 το 96,4% της συνολικής ενέργειας που δόθηκε προς τελικούς πελάτες στην Ελλάδα.

Είναι ο 2ος μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση, καθώς παράγει σχεδόν το 50% της ηλεκτρικής της παραγωγής από λιγνίτη. Επίσης, σύμφωνα με την πρόσφατη ελληνική νομοθεσία (ν. 4001/2011) παραμένει στην ιδιοκτησία της το δίκτυο διανομής συνολικού μήκους 217.000 χλμ.(στοιχεία 2009), ενώ η κυριότητα του εθνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μήκους 11.650 χλμ. μεταβιβάζεται στον ΑΔΜΗΕ Α.Ε..

Μετά την απόσχιση από τη ΔΕΗ Α.Ε. των κλάδων Μεταφοράς και Διανομής, δημιουργήθηκαν δύο 100% θυγατρικές εταιρείες της ΔΕΗ Α.Ε., ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε.

(Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.) και ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.). Ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. έχει την ευθύνη της διαχείρισης, λειτουργίας, ανάπτυξης και συντήρησης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και των διασυνδέσεών του. Στην αρμοδιότητα του ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. εναπόκειται η διαχείριση, ανάπτυξη, λειτουργία και συντήρηση του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε. είναι 100% θυγατρική εταιρεία της ΔΕΗ Α.Ε. και έχει αναλάβει τη σκυτάλη της διαχείρισης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από τη μητρική εταιρεία, με στόχο την ανάπτυξη του κλάδου.

Οι θυγατρικές της ΔΕΗ παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.5.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει βασικά στοιχεία σχετικά με τη λειτουργική δραστηριότητα της Εταιρείας κατά την τελευταία τριετία.

Πίνακας 3.1: Η λειτουργική δραστηριότητα της ΔΕΗ Α.Ε. την τελευταία τριετία [100]

31η ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ	2015	2014	2013
Εγκατεστημένη ισχύς (GW)	13,0	12,6	12,9
Ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς στην Ελλάδα	64,0%	63,6%	64,9%
Καθαρή Παραγωγή (TWh)	34,1	35,3	37,5
Μερίδιο Παραγωγής (μέσο ετήσιο)	71,9%	74,9%	69,0%
Πωληθείσα Ηλεκτρική Ενέργεια στους τελικούς καταναλωτές (TWh)	49,2	49,5	50,8
Μερίδιο Πωλήσεων (μέσο ετήσιο)	96,4%	97,9%	98,3%
Αριθμός πελατών (σε εκατ.)	7,4	7,4	7,4
Αριθμός μισθοδοτούμενου προσωπικού	18.356	18.572	19.093
Πελάτες ανά εργαζόμενο	402	397	388
Πωλήσεις ανά εργαζόμενο (MWh)	2.683	2.663	2.661

3.5 Οι θυγατρικές της ΔΕΗ Α.Ε.

3.5.1 Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε. συστάθηκε σύμφωνα με το Ν. 4001/2011 και σε συμμόρφωση με την Οδηγία 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να αναλάβει τα καθήκοντα του Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) [99,103]. Ο ΑΔΜΗΕ είναι 100% θυγατρική της ΔΕΗ Α.Ε., ωστόσο είναι πλήρως ανεξάρτητος λειτουργικά και διοικητικά, έχοντας ουσιαστικές εξουσίες λήψης αποφάσεων, σύμφωνα και με τις απαιτήσεις ανεξαρτησίας που ενσωματώνονται στο Νόμο 4001/2011 και στην Οδηγία 2009/72/ΕΚ.

Αποστολή του ΑΔΜΗΕ είναι η διασφάλιση του εφοδιασμού της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια με τρόπο ασφαλής, αποδοτικό και αξιόπιστο, προωθώντας την ανάπτυξη του ελεύθερου ανταγωνισμού στην Ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και εξασφαλίζοντας την ισότιμη μεταχείριση των Χρηστών του ΕΣΜΗΕ.

Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει ως έργο τη λειτουργία, εκμετάλλευση, διασφάλιση της συντήρησης και μέριμνα για την ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ σε ολόκληρη τη χώρα, καθώς και των διασυνδέσεών του με τα άλλα δίκτυα έτσι ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια, κατά τρόπο επαρκή, ασφαλής, οικονομικά αποδοτικό και αξιόπιστο. Επιδίωξη του είναι η βέλτιστη κατανομή του φορτίου στο Σύστημα. Στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, ο αντίστοιχος φορέας είναι η ΔΕΗ Α.Ε.

Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς έχει ως αρμοδιότητες:

- να διασφαλίζει ότι το Σύστημα θα μπορεί να ανταποκρίνεται μακροχρόνια στη ζήτηση για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας
- να συμβάλλει στην ασφάλεια του εφοδιασμού της χώρας μέσω επαρκούς δυναμικού μεταφοράς και αξιοπιστίας του Συστήματος
- να διαχειρίζεται τις ροές ενέργειας στο Σύστημα με συνεκτίμηση των ανταλλαγών με άλλα διασυνδεδεμένα δίκτυα
- να μην κάνει διακρίσεις μεταξύ των χρηστών του Συστήματος
- να παρέχει στους χρήστες του Συστήματος όλες εκείνες τις πληροφορίες που χρειάζονται για την αποτελεσματική πρόσβαση σε αυτό.

3.5.2 Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε.) συστάθηκε με την απόσχιση του κλάδου Διανομής της ΔΕΗ Α.Ε. σύμφωνα με το Ν. 4001/2011 και σε συμμόρφωση με την Οδηγία 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σχετικά με την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να αναλάβει τα καθήκοντα του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής [99,104]. Είναι μια εταιρεία 100% θυγατρική της ΔΕΗ Α.Ε., ωστόσο όπως και ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. είναι ανεξάρτητη λειτουργικά και διοικητικά, τηρώντας όλες τις απαιτήσεις ανεξαρτησίας που ενσωματώνονται στο Νόμο 4001/2011 και στην Οδηγία 2009/72/ΕΚ.

Αποστολή του ΔΕΔΔΗΕ είναι η ανάπτυξη και λειτουργία του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και των συστημάτων ηλεκτρισμού των μη διασυνδεδεμένων νησιών και η διασφάλιση ισότιμης πρόσβασης σε αυτά, όλων των καταναλωτών, παραγωγών και προμηθευτών, με διαφάνεια και αντικειμενικότητα.

Οραμά του είναι να είναι μια εταιρεία - πρότυπο στον κλάδο της Ηλεκτρικής Ενέργειας, η οποία θα παρέχει άριστες υπηρεσίες στους πολίτες, θα λειτουργεί και θα αναπτύσσει το δίκτυο σύμφωνα με τα πρότυπα των πλέον προηγμένων χωρών, και γενικά θα εξασφαλίζει τη μέγιστη ικανοποίηση των χρηστών του Δικτύου, των εργαζομένων, των συνεργατών, των μετόχων και γενικά του κοινωνικού συνόλου.

Ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής έχει ως αρμοδιότητες:

- να διατηρεί το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ασφαλές, αξιόπιστο και αποδοτικό στην περιοχή που καλύπτει, λαμβάνοντας τη δέουσα μέριμνα για το περιβάλλον
- να αποφεύγει κάθε διάκριση μεταξύ των χρηστών του Δικτύου
- να παρέχει στους χρήστες του Δικτύου όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται για αποτελεσματική πρόσβαση στο Δίκτυο
- να παραχωρεί προτεραιότητα στις εγκαταστάσεις παραγωγής που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή απόβλητα, ή που παράγουν συνδυασμένα ενέργεια και θερμότητα (συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας)
- να προμηθεύει την ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών ενέργειας και να διατηρεί εφεδρικό δυναμικό στο δίκτυό του
- να λαμβάνει μέτρα για ενεργειακή απόδοση και διαχείριση της ζήτησης.

3.5.3 ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.

Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες, 100% θυγατρική της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού, συνεχίζει την παράδοση της ΔΕΗ, η οποία είναι η πρώτη εταιρεία στην Ελλάδα που από το 1982 δραστηριοποιήθηκε στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) [105]. Έχει παραλάβει τη σκυτάλη της διαχείρισης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας με στόχο την ανάπτυξη του κλάδου.

Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες έχει στην κατοχή της 21 αιολικά πάρκα, 16 μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς και 7 φωτοβολταϊκούς σταθμούς, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 144,7 MW. Έχει τοποθετηθεί δυναμικά στον ελληνικό χώρο των ΑΠΕ, κατέχοντας ήδη σχεδόν το 10% της αγοράς και η παραγωγή της το 2015 έφτασε τις 283.000 MWh.

Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες είναι στελεχωμένη από άριστα καταρτισμένους επιστήμονες, επενδύει στη δύναμη της φύσης, συνεργάζεται με τους μεγαλύτερους ενεργειακούς ομίλους και κατασκευαστές και εκμεταλλεύεται τις επιχειρηματικές ευκαιρίες, με στόχο την προώθηση έργων παραγωγής καθαρής ενέργειας.

Οι στόχοι της εταιρείας συνοψίζονται σε τρεις άξονες:

- **Καινοτομία:** Επενδύει σε όλες τις καινοτόμες ανανεώσιμες τεχνολογίες για παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας με μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Δημιουργεί νέα σύγχρονα έργα ενώ ταυτόχρονα αναβαθμίζει τη λειτουργικότητα και αποδοτικότητα των ήδη υπάρχουσων υποδομών.
- **Ανάπτυξη:** Εξασφαλίζει τα απαιτούμενα έργα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποιώντας τους φυσικούς πόρους με τις λιγότερες δυνατές επιπτώσεις στο περιβάλλον και βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα ζωής των κατοίκων των τοπικών κοινωνιών.
- **Ασφαλές περιβάλλον:** Δεσμεύεται για την ανάπτυξη έργων ΑΠΕ που εγγυώνται ένα καθαρό, οικολογικό και ασφαλές περιβάλλον για τους εργαζόμενους, τις τοπικές κοινωνίες αλλά και για τις επόμενες γενιές.

3.6 Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας είναι συνδεδεμένα τα νησιά του Ιονίου καθώς και ορισμένα νησιά του Αιγαίου στα επίπεδα υψηλής (150kV και 66kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV) και μαζί με το σύστημα αυτό αποτελούν το Διασυνδεδεμένο Σύστημα [103].

Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV, που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, κυρίως από το σπουδαιότερο για την χώρα μας ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Στην περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, στα οποία καταναλώνεται περίπου το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην Ελλάδα το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από εναέριες γραμμές των 400 kV, εναέριες, υποβρύχιες και υπόγειες γραμμές των 150 kV και από εναέριες και υποβρύχιες γραμμές των 66 kV.

Στο επόμενο πίνακα δίνεται το συνολικό μήκος των γραμμών του συστήματος μεταφοράς ανά κατηγορία και επίπεδο τάσης, σύμφωνα με στοιχεία Δεκεμβρίου 2014.

Πίνακας 3.2: Συνολικά Μήκη Γ.Μ. του Συστήματος [106]

ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ (kV)	ΕΙΔΟΣ Γ.Μ.	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (km)
66	Εναέριες	39
	Υποβρύχιες	15
150	Εναέριες	8149
	Υπόγειες	136
	Υποβρύχιες	143
400	Εναέριες	2647
	Υποβρύχιες	31

Επιπλέον, είναι εγκατεστημένα 200 km υπογείων καλωδίων 150 kV για τη μεταφορά ισχύος εντός των πυκνοκατοικημένων περιοχών της Πρωτεύουσας, τα οποία ανήκουν στο Δίκτυο 150 kV.

Τα υπόλοιπα νησιά, τα οποία αναφέρονται ως «Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά», εξυπηρετούνται από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι λειτουργούν με πετρέλαιο. Συμπληρωματικά σε ορισμένα νησιά η ζήτηση καλύπτεται από ΑΠΕ. Οι μεγαλύτεροι σταθμοί παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά βρίσκονται στην Κρήτη και τη Ρόδο (με συνολική ισχύ θερμικών σταθμών μεγαλύτερη των 1.000 MW).

3.6.1 Διεθνείς διασυνδέσεις

Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα επαναλειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα υπό το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) [106]. Η παράλληλη λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος με το Ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών Γ.Μ., κυρίως 400 kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας και της ΠΓΔΜ (FYROM). Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος) με την Ιταλία. Από το Σεπτέμβριο του 2010, το Ελληνικό Σύστημα έχει συνδεθεί και με το Σύστημα της Τουρκίας.

Αναλυτικά, το Ελληνικό ηλεκτρικό Σύστημα συνδέεται:

- Με το ηλεκτρικό δίκτυο της FYROM μέσω μιας γραμμής υπερυψηλής τάσης 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ KYT Θεσσαλονίκης και Dubrono στην ΠΓΔΜ και μιας γραμμής 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ KYT Μελίτης και Bitola στην ΠΓΔΜ.
- Με το Αλβανικό Σύστημα μέσω μίας γραμμής 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ KYT Καρδιάς και Zemblak. Επίσης, συνδέεται μέσω μιας γραμμής 150 kV ελαφρού τύπου μεταξύ Υ/Σ Μούρτου και ΥΗΣ Bistrica στην Αλβανία, ονομαστικής ικανότητας μεταφοράς 100 MW περίπου. Η Γ.Μ. αυτή επί του παρόντος αποτελεί ακτινική σύνδεση μικρής ικανότητας και σημασίας.
- Με το Βουλγαρικό Σύστημα η Ελλάδα συνδέεται μέσω μίας Γ.Μ. 400 kV μεταξύ KYT Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad.
- Με το Τουρκικό Σύστημα μέσω μιας γραμμής μεταφοράς 400 kV στο τμήμα KYT Φιλίππων – KYT Ν. Σάντας – Babaeski (Τουρκία). Η Γ.Μ. αυτή είναι διπλού κυκλώματος στο τμήμα KYT Φιλίππων – Ν. Σάντα και μονού κυκλώματος στο τμήμα Ν. Σάντα - Babaeski.
- Με το Ιταλικό Σύστημα. Η διασύνδεση της Ελλάδας με την Ιταλία είναι σύνδεση μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος μεταξύ του KYT Αράχθου και του Υ/Σ Galatina. Η διασύνδεση Σ.Ρ. των Συστημάτων Ελλάδας και Ιταλίας μέσω υποβρυχίου καλωδίου έχει τεθεί σε εμπορική λειτουργία από το τέλος του 2002.

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η τοπολογία των υφιστάμενων και υπό ανάπτυξη διασυνδέσεων, όπου παριστάνονται με διαφορετικούς χρωματισμούς οι υφιστάμενες, οι υπό κατασκευή, οι προγραμματισμένες και οι υπό μελέτη διασυνδέσεις.



Σχήμα 3.1: Σχηματικό Διάγραμμα των Διασυνδεδεμένων Συστημάτων της Βαλκανικής [106]

3.7 Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνο για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στους καταναλωτές σε όλη την επικράτεια, τόσο στην περιοχή του διασυνδεδεμένου συστήματος, όσο και στο νησιωτικό χώρο.

Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, εκκινούν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής, στους γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση, την οποία και χρησιμοποιούν οι περισσότεροι τελικοί καταναλωτές. Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι [104]:

- Πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών

- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.

Σύμφωνα με στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ για το 2005, το δίκτυο διανομής έχει συνολικό μήκος 236.290 χλμ. και περιλαμβάνει:

- Το δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης (20kV), συνολικού μήκους 111.130 χλμ., το οποίο μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους Υποσταθμούς μεταφοράς στους Υποσταθμούς διανομής.
- Το δίκτυο διανομής Χαμηλής Τάσης (220/380V), μήκους 125.160 χλμ., το οποίο μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους Υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

Υπεύθυνος για τη λειτουργία, εκμετάλλευση, συντήρηση και ανάπτυξη του ελληνικού δικτύου διανομής είναι ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε.).

3.8 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση διαφορετικών πρωτογενών πηγών ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο, λιγνίτης), οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ή άλλες σύγχρονες τεχνολογίες (πχ. μεγάλα υδροηλεκτρικά). Τα νησιά του μη διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτροδοτούνται από αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο από τοπικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο πετρέλαιο, βαρύ (μαζούτ) ή και ελαφρύ (ντίζελ), και τους σταθμούς ΑΠΕ (κυρίως αιολικούς και φωτοβολταϊκούς)

3.8.1 Ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα είναι ο λιγνίτης, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο.

Λιγνίτης:

Ο λιγνίτη είναι μια μορφή άνθρακα. Αποτελεί τη μοναδική γηγενή πρωτογενή πηγή ενέργειας και η συνεισφορά του στην ηλεκτροδότηση και ανάπτυξη της Ελλάδας υπήρξε καθοριστική.

Η πρώτη σοβαρή προσπάθεια για την εκμετάλλευση λιγνιτικών κοιτασμάτων στη χώρα μας άρχισε στο Αλιβέρι (Εύβοια) το 1873. Δυστυχώς μια φοβερή πλημμύρα το 1897 κατέστρεψε όλες τις επιφανειακές και υπόγειες εγκαταστάσεις εξόρυξης. Η εκμετάλλευση ξανάρχισε μετά τον πρώτο Παγκόσμιο πόλεμο. Το 1922 η ετήσια παραγωγή έφθασε τους 23.000 τόνους και διατηρήθηκε μέχρι το 1927. Το επόμενο έτος η εκμετάλλευση σταμάτησε για οικονομικούς λόγους. Η ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα βασίστηκε μεταπολεμικά στο λιγνίτη.

Παλαιότερα ο λιγνίτης κάλυπτε το 80% της ηλεκτροπαραγωγής. Ενδεικτικά, το 1997 η παραγωγή των λιγνιτικών μονάδων κάλυψε το 76,3% της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη από το διασυνδεδεμένο σύστημα. Ωστόσο, επειδή η χρονική διάρκεια ζωής των ήδη γνωστών εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων λιγνίτη δεν υπερβαίνει τα 35 χρόνια, έχει διατυπωθεί η άποψη ότι θα πρέπει να μπουν στο ελληνικό ισοζύγιο ηλεκτρισμού νέα καύσιμα, όπως ο λιθάνθρακας, ώστε να παραταθεί η διαθεσιμότητα και η χρήση του λιγνίτη σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου [99].

Έτσι, η συμμετοχή του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Το 2011 η συνεισφορά του στην εγχώρια παραγωγή της χώρας ήταν 53,15%, ενώ το 2015 είχε συνεισφορά κάτω του 40% στο ισοζύγιο παραγωγής του Διασυνδεδεμένου Ηλεκτρικού Συστήματος της χώρας [106]. Παρόλα αυτά, αναμένεται να συνεχίσει τη συμμετοχή του με βελτιωμένο βαθμό απόδοσης ώστε να περιορισθεί η ενεργειακή εξάρτηση της χώρας από εισαγόμενα καύσιμα και παράλληλα να υπάρξει σταθερό, προβλέψιμο και χαμηλό κόστος παραγωγής και θέσεις εργασίας στην περιφέρεια.

Φυσικό αέριο:

Το ΦΑ είναι το μόνο ορυκτό καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύριο εργαλείο γεφύρωσης ανάμεσα στη σημερινή πραγματικότητα και τη μελλοντική του 2050, όπου προβλέπονται σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων από την ηλεκτροπαραγωγή. Αυτό οφείλεται στις χαμηλές εκπομπές CO₂ ανά παραγόμενη ηλεκτρική κιλοβατώρα και την ευελιξία των μονάδων ΦΑ η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρισμού με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η εισαγωγή του φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή προβλεπόταν να φθάσει το 12%. Το 2004 συμμετείχε στην ηλεκτροπαραγωγή σε ποσοστό 15,5%, ενώ το 2011 ο ρόλος του στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν πολύ σημαντικός αφού συμμετείχε σε ποσοστό 27,5%. Ωστόσο, η άνοδος στην τιμή του πετρελαίου καθιστά την παραγωγή με φυσικό αέριο απαγορευτικά ακριβή, με τη συνεισφορά του να μειώνεται σε 12,57% το 2014 και 14,13% το 2015 [106].

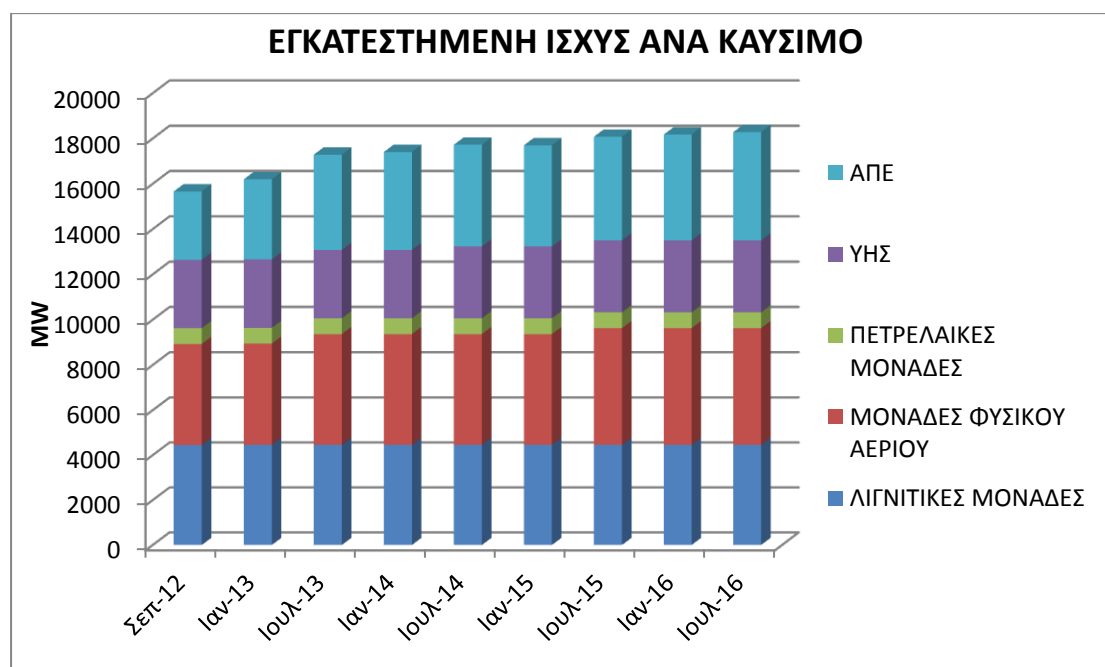
Πετρέλαιο:

Το πετρέλαιο έχει περιορισμένη συνεισφορά στην ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδας. Ωστόσο, έχει σημαντικό ρόλο στην τοπική ασφάλεια εφοδιασμού των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων

3.8.2 Εγκατεστημένη ισχύς στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία του Λειτουργού της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας για τον Ιούλιο 2016 [107] για την καθαρή ισχύ των μονάδων του Διασυνδεδεμένου Συστήματος, οι λιγνιτικές ανέρχονται σε 4456 MW, οι πετρελαϊκές σε 698 MW, οι μονάδες φυσικού αερίου σε 5170 MW, οι μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες (ΥΗΣ) σε 3173 MW και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σε 4784 MW. Το σύνολο των θερμικών μονάδων ξεπερνά τα 10.000 MW (10.324 MW), ενώ το σύνολο των μονάδων ΑΠΕ και ΥΗΣ φθάνει τα 7.957 MW. Η συνολική καθαρή ισχύς του συνόλου των μονάδων του Διασυνδεδεμένου Συστήματος, ανέρχεται σε 18.281 MW.

Στο παρακάτω γράφημα αναπαρίσταται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ανά καύσιμο από το Σεπτέμβριο του 2012 μέχρι τον Ιούλιο του 2016.

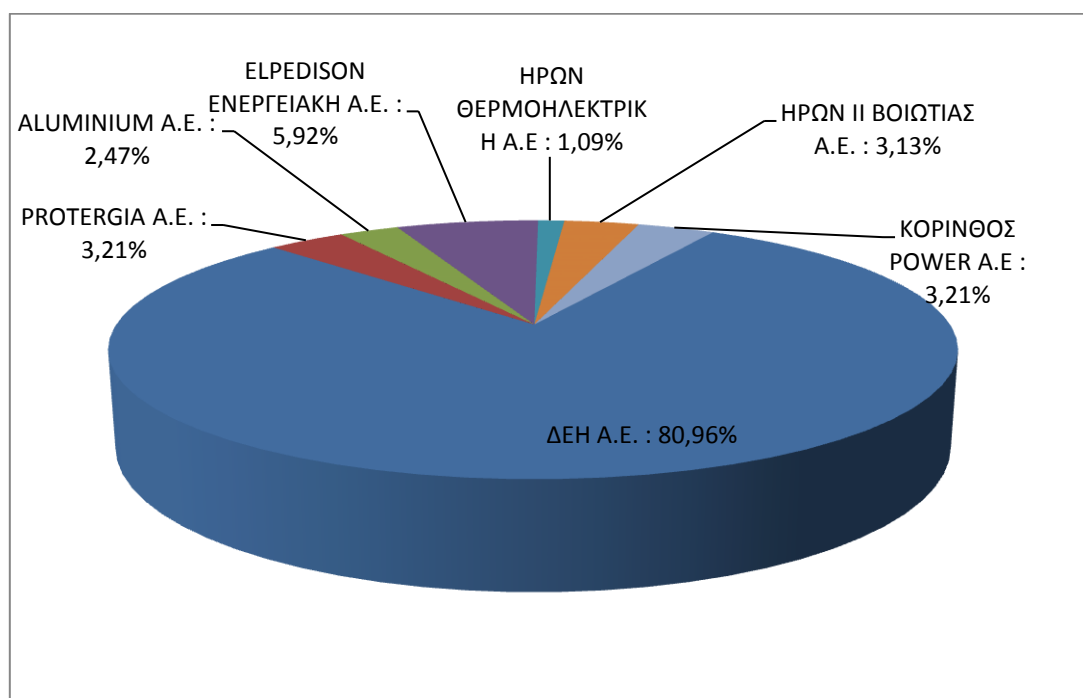


Σχήμα 3.2: Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύς του Διασυνδεδεμένου Συστήματος στην Ελλάδα για την περίοδο 2012 έως 2016 [108]

Παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος που βασίζεται στο λιγνίτη αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και παραμένει σταθερό αυτά τα χρόνια.
- Η εγκατεστημένη ισχύς στις θερμικές μονάδες φυσικού αερίου αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης, με αύξηση 692 MW από το 2012 στο 2016.
- Η εγκατεστημένη ισχύς στις πετρελαϊκές μονάδες είναι μικρή και σταθερή.
- Νέοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί συνολικής καθαρής ισχύος 155 MW ενσωματώθηκαν στο διασυνδεδεμένο σύστημα το Φεβρουάριο του 2014.
- Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας παίζουν έναν διαρκώς αυξανόμενο ρόλο στην ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδας, με την εγκατεστημένη ισχύ των ΑΠΕ να είναι δεύτερη πίσω από την εγκατεστημένη ισχύ των θερμικών μονάδων φυσικού αερίου. Νέες μονάδες ΑΠΕ συνολικής ισχύος 1766 MW ενσωματώθηκαν στο σύστημα από το Σεπτέμβριο του 2012 μέχρι τον Ιούλιο του 2016.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος ανά παραγωγό (πλην ΑΠΕ) στο σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος σύμφωνα με στοιχεία του ΛΑΓΠΕ για τον Ιούλιο του 2016.



Σχήμα 3.3: Ποσοστό (%) της Ισχύος ανά Παραγωγό (πλην ΑΠΕ) στο Σύνολο της Εγκατεστημένης Ισχύος [107]

3.8.3 Εγκατεστημένη ισχύς στο μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Στο μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα, τον Ιούνιο του 2016 η εγκατεστημένη ισχύς έφθασε στα 2262,5 MW, 78,7% της οποίας είναι η συνολική ισχύς των θερμικών μονάδων (1780 MW), ενώ η συνολική ισχύς που παράγεται από ΑΠΕ είναι 482,5 MW (21,3%). Από την τελευταία κατηγορία, τα 322,7 MW (14,3%) είναι αιολικοί σταθμοί, τα 159,5 MW (7%) είναι μονάδες Φ/Β, ενώ οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί συνεισφέρουν ισχύ 0,3 MW [109].

3.8.4 Ηλεκτροπαραγωγή Διασυνδεδεμένου Συστήματος

Στην Ελλάδα, στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα, το μείγμα ηλεκτροπαραγωγής στο τέλος του 2015, σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία του ΑΔΜΗΕ [110], είναι :

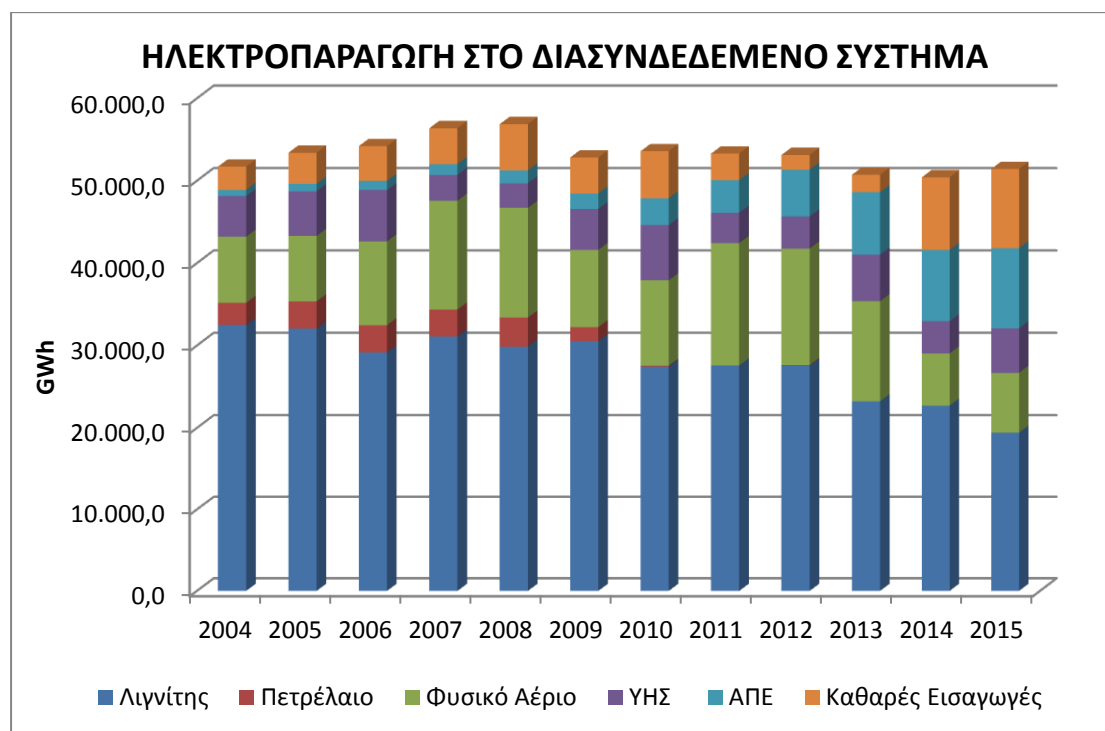
- Λιγνίτης (19418 KWh) 38%
- Φυσικό αέριο (7267 KWh) 14%
- ΑΠΕ (9745 KWh) 19%
- Υδροηλεκτρικά (5391 KWh) 10%
- Εισαγωγές (9609 KWh) 19%

Ο πίνακας 3.3 δείχνει το μείγμα ηλεκτροπαραγωγής από το 2004 μέχρι το 2015, σύμφωνα με επίσημα στοιχεία των ΑΔΜΗΕ και ΛΑΓΗΕ [110,111].

Πίνακας 3.3: Ποσοστιαία κατανομή παραγωγής ενέργειας για τα έτη 2004-2015 [110,111]

ΕΤΟΣ	Λιγνιτική	Πετρέλαιο	Φυσικό Αέριο	ΥΗΣ	ΑΠΕ	Καθαρές Εισαγωγές
2004	62,82%	5,20%	15,54%	9,53%	1,47%	5,45%
2005	60,03%	6,18%	14,88%	10,15%	1,68%	7,08%
2006	53,80%	6,10%	18,76%	11,49%	2,09%	7,75%
2007	55,15%	5,79%	23,43%	5,57%	2,33%	7,72%
2008	52,52%	6,18%	23,44%	5,23%	2,76%	9,87%
2009	57,82%	3,21%	17,75%	9,38%	3,57%	8,27%
2010	51,21%	0,21%	19,34%	12,51%	6,08%	10,65%
2011	51,73%	0,02%	27,86%	6,90%	7,43%	6,06%
2012	51,86%	0,15%	26,61%	7,32%	10,70%	3,36%
2013	45,80%	0,00%	23,96%	11,12%	14,97%	4,15%
2014	45,04%	0,00%	12,57%	7,75%	17,14%	17,49%
2015	37,76%	0,00%	14,13%	10,48%	18,95%	18,68%

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα της καθαρής παραγωγής του Διασυνδεδεμένου Συστήματος για το διάστημα 2004 έως 2015. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ, ενώ η λιγνιτική παραγωγή και η παραγωγή από ΦΑ έχουν μειωθεί αισθητά. Επίσης φαίνεται ότι η Ελλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.4: Ανάλυση της ηλεκτροπαραγωγής του Διασυνδεδεμένου Συστήματος για την περίοδο 2004-2015 [110,111]

3.8.5 Ηλεκτροπαραγωγή μη Διασυνδεδεμένου Συστήματος

Στο μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα για το έτος 2015 η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανήλθε σε 5,61 TWh. Οι θερμικές μονάδες παραγωγής με καύσιμο το πετρέλαιο είχαν την κυρίαρχη συνεισφορά με ποσοστό 81,5% (4,57 TWh). Το υπόλοιπο 18,5% (1,04 TWh) της παραγωγής καλύφθηκε από ΑΠΕ (Αιολικά 13,6% , Φ/Β 4,8% και Μικροί ΥΗΣ 0,1%) [109].

3.9 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα

3.9.1 Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης

Η κοινή ενεργειακή πολιτική και στρατηγική που προωθείται στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης προτείνει την κατάρτιση Εθνικού Σχεδίου Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας για κάθε κράτος-μέλος της. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκπονήθηκε στο πλαίσιο εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής σε σχέση με τη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, την Εξοικονόμηση Ενέργειας και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου, με στόχο την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Για το σύνολο των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπονται:

- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 20%.
- Διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20%, σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/EK.
- Μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 κατά 20% σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/EK.

Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση.

Η Ελληνική κυβέρνηση με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%. Συγκεκριμένα:

- Συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό 40% στην ηλεκτροπαραγωγή
- Συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης
- Συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό 10% στις μεταφορές

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η Υπουργική Απόφαση για την επιδιωκόμενη εγκατεστημένη ισχύ μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ για τα έτη 2014 και 2020.

Πίνακας 3.4: Εθνικοί στόχοι για την επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ (MW) για τα έτη 2014 και 2020 [112]

	2014	2020
Υδροηλεκτρικά	3700	4650
Μικρά (0-15 MW)	300	350
Μεγάλα (>15 MW)	3400	4200
Φωτοβολταϊκά	1500	2200
Ηλιοθερμικά	120	250
Αιολικά	4000	7500
Βιομάζα	200	350

3.9.2 Η παρούσα κατάσταση

Στην κατεύθυνση επίτευξης των στόχων έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος. Κατά το έτος 2012 τα ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένων και των μεγάλων ΥΗΣ, κάλυψαν ποσοστό 18% της συνολικής ζήτησης στο Σύστημα, ενώ κατά το 2013 το αντίστοιχο ποσοστό ξεπέρασε το 26% της συνολικής ζήτησης. Για το έτος 2014, η συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο έπεσε στο 24,9%, έχοντας σημαντικά μικρότερη συνεισφορά από τους μεγάλους ΥΗΣ. Το έτος 2015, το ποσοστό αυτό αυξήθηκε εκ νέου, φτάνοντας στο 29,43% της συνολικής ζήτησης. Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η συμμετοχή των ΑΠΕ και των μεγάλων ΥΗΣ στη ζήτηση από το 2004 μέχρι σήμερα.



Σχήμα 3.5: Συμμετοχή των ΑΠΕ και ΥΗΣ στη ζήτηση από το 2004 μέχρι σήμερα [110,111]

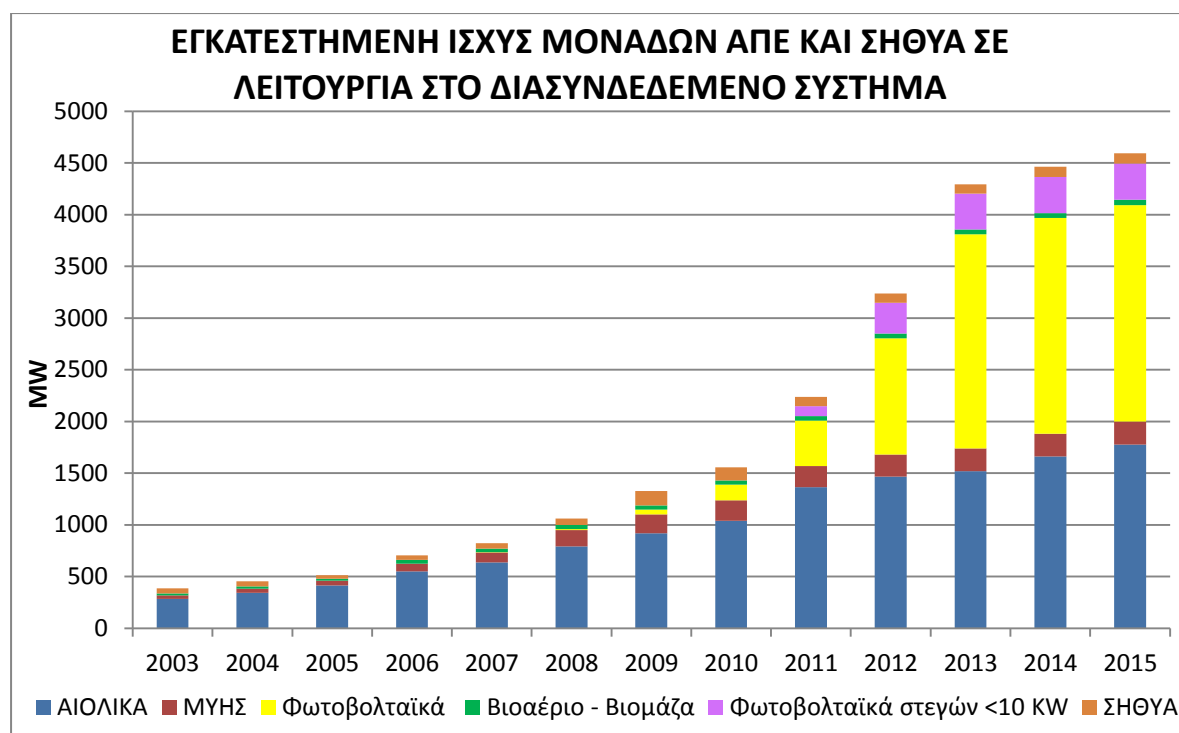
Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα η συμμετοχή αυξήθηκε από το 11% το 2004 σε 29,4% το 2015.

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία ΑΠΕ τόσο στο διασυνδεδεμένο όσο και στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα από το 2000 μέχρι σήμερα. Είναι ορατό ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ σημείωσε πολύ σημαντική αύξηση από το 2009 μέχρι το 2013, κυρίως λόγω της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών.

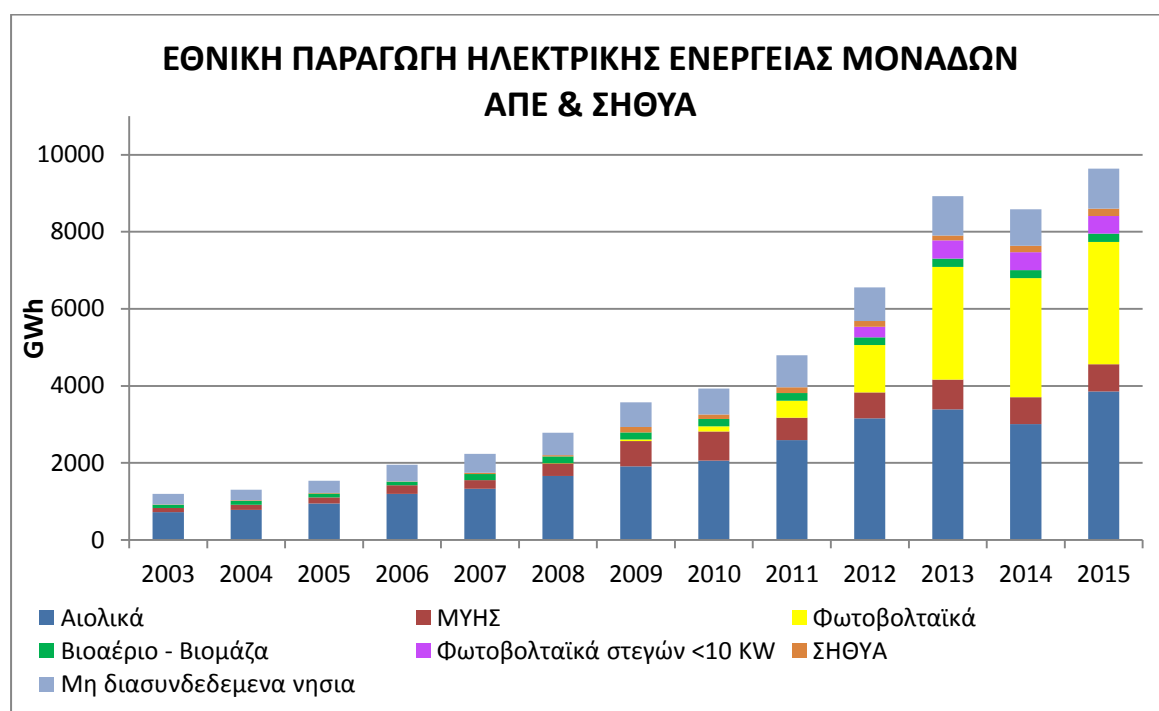
Πίνακας 3.5: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια [109,111,113]

	Αιολικά	Φωτοβολταϊκά	ΜΥΗΣ	Βιομάζα	Σύνολο
2000	226	0	42	1	269
2001	270	1	45	22	338
2002	287	1	45	22	355
2003	371	1	50	22	444
2004	472	1	59	24	556
2005	491	1	64	24	580
2006	749	5	77	24	855
2007	846	9	95	39	989
2008	1020	12	158	40	1230
2009	1172	48	180	41	1441
2010	1298	191	197	41	1727
2011	1640	522	205	45	2412
2012	1753	1238	213	45	3249
2013	1810	2206	220	46	4282
2014	1978	2221	220	47	4466
2015	2092	2229	224	52	4597

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ σε λειτουργία στο διασυνδεδεμένο σύστημα από το 2003 μέχρι σήμερα. Από το σχήμα φαίνεται ότι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στο Σύστημα οφείλεται κυρίως στην αύξηση των εγκαταστάσεων Φ/Β λόγω των ιδιαίτερα ελκυστικών τιμών που είχαν θεσμοθετηθεί. Αυτό το γεγονός ενδεχομένως λειτούργησε σε βάρος άλλων τεχνολογιών ΑΠΕ που δεν σημείωσαν σημαντική αύξηση.



Σχήμα 3.6: Η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ σε λειτουργία στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα για την περίοδο 2003-2015 [111]



Σχήμα 3.7: Εθνική ηλεκτροπαραγωγή μονάδων ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ από το 2003 μέχρι σήμερα [109,111]

Στο σχήμα 3.7 δίνεται η εξέλιξη της παραγόμενης ενέργειας από τους σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ στο Σύστημα καθώς και η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ στα μη διασυνδεδεμένα νησιά από το 2003 και μετά.

Από τα δύο παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι για το 2014 ενώ σημειώθηκε αύξηση στην εγκατεστημένη των ΑΠΕ, η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε ήταν μικρότερη από το έτος 2013. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μειωμένη παραγωγή των Α/Π και των ΜΥΗΣ.

3.9.3 Η μελλοντική κατάσταση

Στον τομέα της επίτευξης των Εθνικών Στόχων για το 2020, να σημειωθεί ότι ο συνολικός αριθμός των Δεσμευτικών και μη Δεσμευτικών προσφορών σύνδεσης υπερκαλύπτει ήδη το στόχο που έχει τεθεί από την Πολιτεία για κάλυψη της ηλεκτρικής ζήτησης της χώρας κατά 40% από ΑΠΕ και μεγάλα υδροηλεκτρικά μέχρι το 2020.

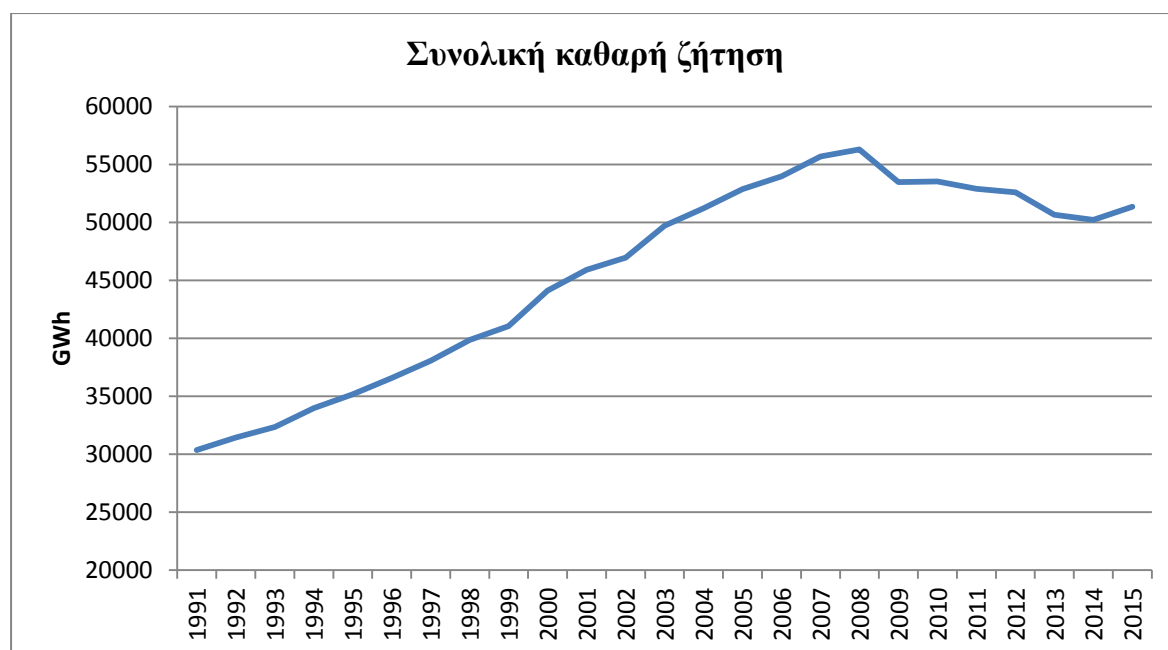
Αυτό που πρέπει να διαχειριστεί ο ΑΔΜΗΕ είναι η διαρκώς συνεχιζόμενη ροή αιτημάτων σύνδεσης η οποία οδηγεί σε ένα σύνολο παραγωγής ΑΠΕ που δεν μπορεί να διακινηθεί και να απορροφηθεί από το Σύστημα. Επίσης, λόγω της μεγάλης στοχαστικότητας και τυχαιότητας που παρουσιάζει η παραγωγή των ΑΠΕ, θα χρειαστεί η αύξηση και της δυνατότητας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως με χρήση αντλητικών υδροηλεκτρικών σταθμών, ώστε να αμβλύνονται οι επιπτώσεις της τυχαιάς παραγωγής από ΑΠΕ.

3.10 Η Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

3.10.1 Η Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια, και έπειτα από μία μακρά περίοδο συνεχών αυξήσεων στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με αποκορύφωμα το 2008 όπου πήρε τη μέγιστη τιμή της, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα έχει μειωθεί. Ο βασικότερος παράγοντας σε αυτή τη μείωση είναι η παγκόσμια οικονομική κρίση που ξέσπασε το 2009.

Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται η εξέλιξη της Συνολικής Καθαρής Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας του Συστήματος (έχει αφαιρεθεί το φορτίο άντλησης) από το 1991 και μετά. Η Συνολική Καθαρή Ζήτηση περιλαμβάνει και αυτήν που εξυπηρετείται απευθείας σε επίπεδο Διανομής από διεσπαρμένη παραγωγή. Την περίοδο 1991-2008 υπήρξε συνεχής αύξηση της συνολικής καθαρής ζήτησης. Έκτοτε, ως επακόλουθο της οικονομικής κρίσης, παρατηρείται συνεχής μείωση, με εξαίρεση το 2015, όπου σημειώθηκε μικρή αύξηση.



Σχήμα 3.8: Εξέλιξη της Συνολικής Καθαρής Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας κατά την περίοδο 1991 – 2015 [106,114,115]

Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της συνολικής καθαρής ζήτησης κατά τη δεκαετία 1991-2000 ήταν 4,24%, υπερδιπλάσιος από τον αντίστοιχο της δεκαετίας 2001-2010 που ήταν 1,72%. Το 2008 η συνολική καθαρή ζήτηση (χωρίς το φορτίο άντλησης) στο Σύστημα ανήλθε στις 56,3 TWh που αποτελεί ιστορικό μέγιστο, σημειώνοντας αύξηση 1,11% σε σχέση με το 2007. Το 2009 χαρακτηρίστηκε από σημαντική μείωση της συνολικής καθαρής ζήτησης στο Σύστημα, κατά 5,01%. Από το 2010 και μετά η συνολική καθαρή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα υποχωρεί ελαφρώς κάθε χρόνο, με εξαίρεση το 2013 όπου σημειώθηκε σημαντική μείωση κατά 3,7% έναντι του 2012 και το 2015 όπου αυξήθηκε κατά 2,2% έναντι του 2014.

Στον επόμενο πίνακα καταγράφεται το Καθαρό Φορτίο Συστήματος, στο οποίο δεν περιλαμβάνεται η διεσπαρμένη παραγωγή, καθώς και η Συνολική Καθαρή Ζήτηση, όπου περιλαμβάνεται και η διεσπαρμένη παραγωγή, από το 1991 και μετά. Παρατηρείται ότι μέχρι το 2004 τα δύο μεγέθη ταυτίζονται. Από το 2004 και μετά τα δύο μεγέθη διαφοροποιούνται λόγω της αύξησης της διεσπαρμένης παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στο Δίκτυο.

Πίνακας 3.6: Εξέλιξη της Καθαρής Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας στο ΕΣΜΗΕ την περίοδο 1991-2015. [106,114,115]

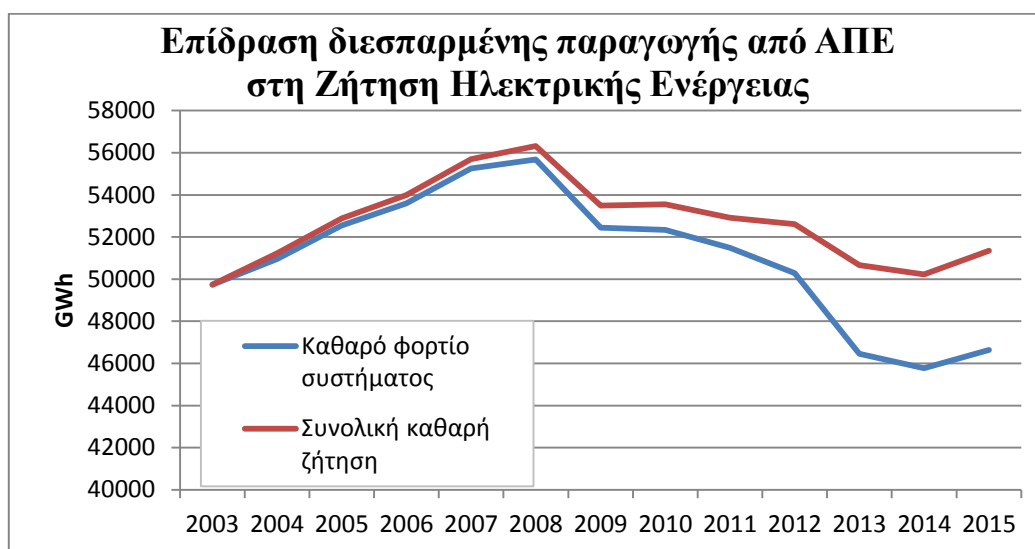
ΕΤΟΣ	Καθαρό φορτίο συστήματος (GWh)	Ετήσια μεταβολή	Συνολική καθαρή ζήτηση (GWh)	Ετήσια μεταβολή	Μέση Ετήσια Μεταβολή				
					17-ετία 1999-2015	10-ετία 2006-2015	8-ετία 2000-2007/2008-2015	5-ετία 2011-2015	3-ετία 2013-2015
1991	30352		30352						
1992	31445	3,60%	31445	3,60%					
1993	32345	2,86%	32345	2,86%					
1994	33977	5,05%	33977	5,05%					
1995	35159	3,48%	35159	3,48%					
1996	36588	4,06%	36588	4,06%					
1997	38067	4,04%	38067	4,04%					
1998	39862	4,72%	39862	4,72%					
1999	41060	3,01%	41060	3,01%					
2000	44108	7,42%	44108	7,42%					
2001	45915	4,10%	45915	4,10%					
2002	46974	2,31%	46974	2,31%					
2003	49732	5,87%	49732	5,87%					
2004	50954	2,46%	51225	3,00%			3,39%		
2005	52553	3,14%	52880	3,23%					
2006	53597	1,99%	53990	2,10%					
2007	55253	3,09%	55690	3,15%	1,41%				
2008	55675	0,76%	56310	1,11%					
2009	52436	-5,82%	53490	-5,01%					
2010	52329	-0,20%	53545	0,10%					
2011	51492	-1,60%	52915	-1,18%					
2012	50289	-2,34%	52611	-0,57%					
2013	46450	-7,63%	50664	-3,70%					
2014	45766	-1,47%	50228	-0,86%					
2015	46641	1,91%	51355	2,24%					

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνονται τα εξής :

- Κατά το 2005 η διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ ανήλθε σε 327 GWh, το 2010 ανήλθε σε 1216 GWh, ενώ το 2015 η συνεισφορά από ΑΠΕ ανήλθε σε 4714 GWh και σε ποσοστό 9,2% της συνολικής ζήτησης, σημειώνοντας πολύ σημαντική αύξηση.
- Κατά την περίοδο 1991-2015, η συνολική καθαρή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 2,22%, έναντι 1,81 % μέσης ετήσιας αύξησης του καθαρού φορτίου στα όρια του Συστήματος.

- Κατά την περίοδο 1999-2015, η συνολική καθαρή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 1,41%, έναντι 0,8% μέσης ετήσιας αύξησης του καθαρού φορτίου στα όρια του Συστήματος.
- Κατά τη δεκαετία 2006-2015, η συνολική καθαρή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε με μέσο ρυθμό 0,55%, έναντι 1,53% μέσης μείωσης του καθαρού φορτίου στα όρια του Συστήματος.
- Κατά την οκταετία 2000-2007 η συνολική καθαρή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 3,39%, ενώ την οκταετία 2008-2015 μειώθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 1,31%.
- Κατά την πενταετία 2011-2015, η μέση ετήσια μείωση της συνολικής καθαρής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ήταν της τάξεως του 0,75%, έναντι 2,44% μείωσης του καθαρού φορτίου στα όρια του Συστήματος.
- Κατά την τριετία 2013-2015, η μέση ετήσια αύξηση της συνολικής καθαρής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ήταν της τάξεως του 0,68%, έναντι 0,21% αύξησης του καθαρού φορτίου στα όρια του Συστήματος.
- Το 2015 η συνολική καθαρή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 2,24% σε σχέση με το 2014 (έναντι αύξησης 1,91% του καθαρού φορτίου στα όρια του Συστήματος).

Στο παρακάτω σχήμα, αναπαρίσταται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται, η διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.9: Επίδραση Διεσπαρμένης Παραγωγής στη Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

Στον επόμενο πίνακα δίνεται το καθαρό φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο εξυπηρετείται από το Σύστημα Μεταφοράς για την περίοδο 2005-2015.

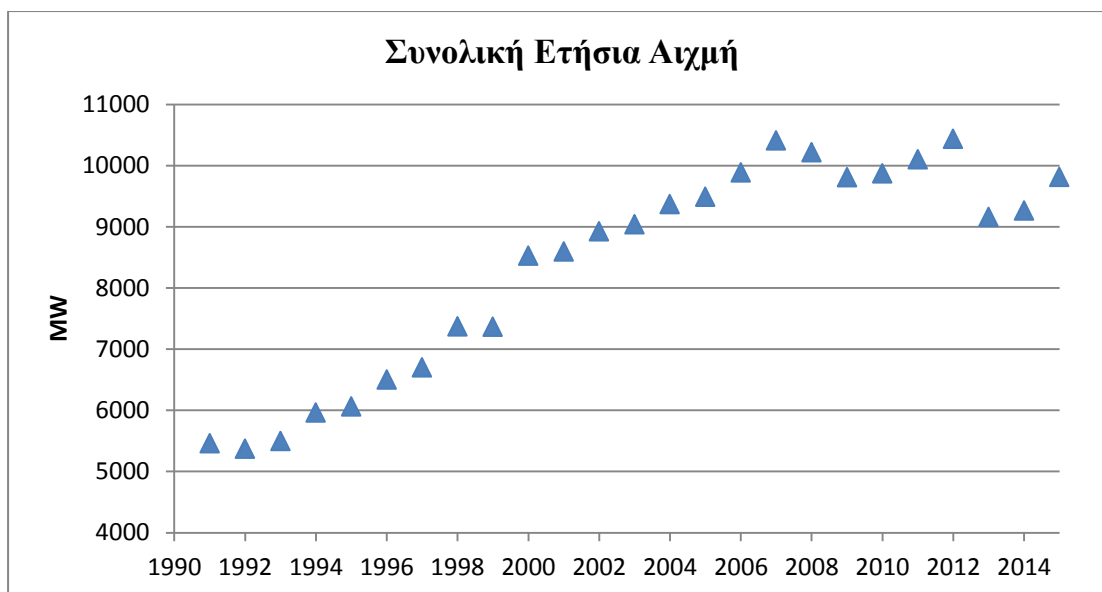
Πίνακας 3.7: Μηνιαίο Καθαρό Φορτίο Ηλεκτρικής Ενέργειας για την περίοδο 2005-2015
[106,114,116,117]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ιαν.	4515	4810	4595	4861	4564	4545	4477	4637	4461	4210	4518
Φεβ.	4170	4251	4206	4491	4174	3994	4049	4288	3843	3684	4004
Μαρ.	4236	4324	4422	4208	4289	4196	4288	4067	3783	3699	4130
Απρ.	3948	3788	3971	4029	3793	3790	3725	3389	3277	3266	3309
Μάιος	4042	4239	4282	4349	4113	4073	3846	3643	3382	3298	3363
Ιουν.	4353	4541	4863	4971	4571	4474	4102	4304	3778	3635	3530
Ιουλ.	5228	4992	5836	5787	5408	5270	5371	5438	4419	4434	4527
Αυγ.	4798	5156	5152	5300	4756	5382	4764	4765	4344	4256	4234
Σεπ.	4197	4269	4368	4561	4135	4171	4280	3825	3599	3522	3700
Οκτ.	4089	4154	4346	4238	4104	4034	3946	3727	3454	3587	3484
Νοε.	4328	4359	4387	4263	4096	3962	4250	3770	3651	3879	3558
Δεκ.	4649	4715	4825	4617	4433	4438	4394	4436	4459	4296	4284
Σύνολο	52553	53598	55253	55675	52436	52329	51492	50289	46450	45766	46641

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, το καθαρό φορτίο ηλεκτρικής στα όρια του Συστήματος αυξάνεται μέχρι το 2008. Το 2009 σημείωσε πολύ σημαντική μείωση η οποία οφείλεται στην παγκόσμια οικονομική κρίση που ξέσπασε. Έκτοτε, και μέχρι το 2012, παρουσιάζει μικρή μείωση. Στη συνέχεια, και καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου 2012-2014, παρατηρείται σημαντική μείωση, η οποία οφείλεται αφενός στις δυσμενείς οικονομικές συνθήκες που επικρατούν και αφετέρου στην ολοένα αυξανόμενη παραγωγή από ΑΠΕ. Τέλος, το 2015 παρατηρείται αύξηση 1,91% σε σχέση με το 2014.

3.10.2 Η Αιχμή Φορτίου

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η εξέλιξη της ετήσιας αιχμής φορτίου (μέση ωριαία τιμή) την περίοδο 1991-2015. Η τιμή της αιχμής φορτίου αυξάνεται συνεχώς μέχρι το 2007, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια μειώνεται μέχρι το 2009, για να αρχίσει στη συνέχεια να αυξάνεται εκ νέου μέχρι το 2012, όπου παίρνει την ιστορικά μέγιστη τιμή της (10438 MW). Το 2013 η τιμή της αιχμής φορτίου σημειώνει σημαντική μείωση, για να αυξηθεί ελαφρώς τα δύο επόμενα χρόνια και να φτάσει στα 9813 MW το 2015.



Σχήμα 3.10: Εξέλιξη της Συνολικής Ετήσιας Αιχμής κατά την περίοδο 1991 – 2015
[106,114,115,118]

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η εξέλιξη της ετήσιας αιχμής φορτίου (μέση ωριαία τιμή) καθώς και η εξέλιξη της συνολικής ετήσιας αιχμής (στην οποία συμπεριλαμβάνεται το φορτίο που καλύφθηκε από διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ) από το 1991 και μετά. Μέχρι το 2008 η ετήσια αιχμή στα όρια του συστήματος και η συνολική ετήσια αιχμή ταυτίζονται. Από το 2009 και μετά τα δύο μεγέθη διαφοροποιούνται λόγω της αύξησης της διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ στο Δίκτυο.

Από τον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα εξής :

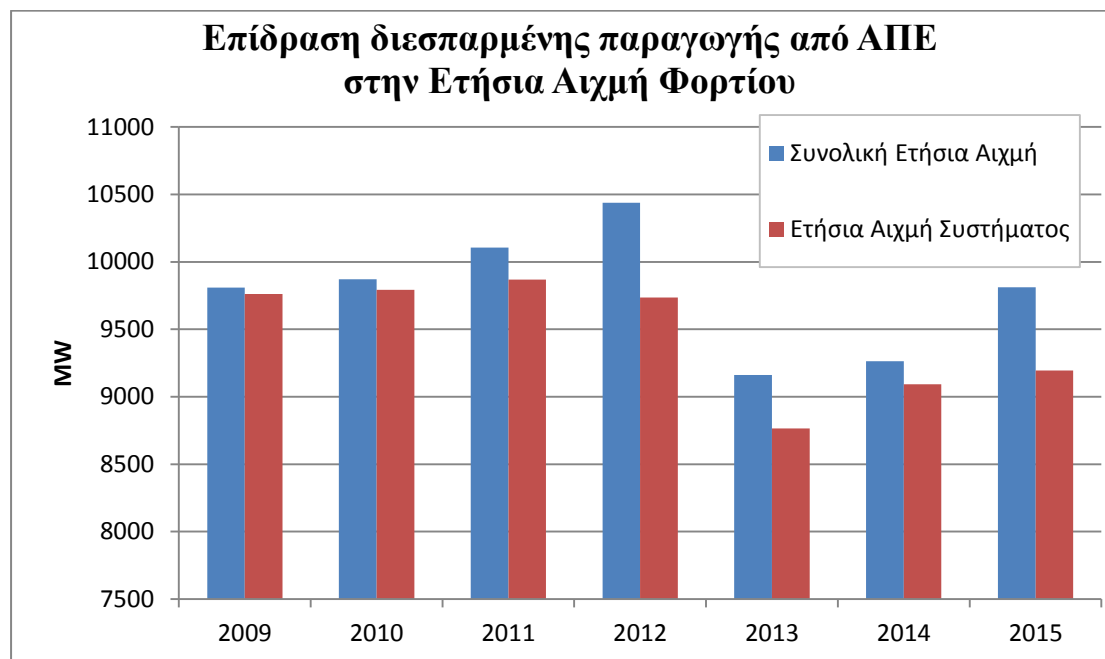
- Το 2009 η ετήσια αιχμή που οφείλεται σε διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ ανήλθε σε 47 MW, ενώ το 2015 ανήλθε σε 618 MW.
- Κατά την περίοδο 1991-2015, η συνολική ετήσια αιχμή (λαμβάνοντας υπόψιν δηλαδή τη διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ στο Δίκτυο) αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 2,47%, έναντι 2,2% μέσης ετήσιας αύξησης της ετήσιας αιχμής στα όρια του Συστήματος.
- Κατά την περίοδο 1999-2015 η συνολική ετήσια αιχμή αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 1,81%, έναντι 1,4% μέσης ετήσιας αύξησης της ετήσιας αιχμής στα όρια του Συστήματος.
- Κατά την τελευταία δεκαετία (2006-2015), η συνολική ετήσια αιχμή μειώθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 0,086%, ενώ η ετήσια αιχμή στα όρια του Συστήματος μειώθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 0,81%.

- Κατά την οκταετία 2000-2007, η συνολική ετήσια αιχμή αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 2,89%, ενώ την οκταετία 2008-2015 μειώθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 0,57%.
- Κατά την πενταετία 2011-2015, η συνολική ετήσια αιχμή μειώθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 0,73%, έναντι μέσης ετήσιας μείωσης 1,75 % της ετήσια αιχμής στα όρια του Συστήματος.
- Κατά την τριετία 2013-2015, η συνολική ετήσια αιχμή αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 3,5%, ενώ η ετήσια αιχμή στα όρια του Συστήματος αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 2,43%.

Πίνακας 3.8: Εξέλιξη της ετήσιας αιχμής φορτίου στο ΕΣΜΗΕ [106,114,115,118]

ΕΤΟΣ	Ετήσια Αιχμή Συστήματος (MW)	Ετήσια μεταβολή	Συνολική Ετήσια Αιχμή (MW)	Ετήσια μεταβολή	Μέση Ετήσια Μεταβολή				
					17-ετία 1999-2015	10-ετία 2006-2015	8-ετία 2000-2007/ 2008-2015	5-ετία 2011-2015	3-ετία 2013-2015
1991	5460		5460						
1992	5371	-1,63%	5371	-1,63%					
1993	5498	2,36%	5498	2,36%					
1994	5963	8,46%	5963	8,46%					
1995	6063	1,68%	6063	1,68%					
1996	6503	7,26%	6503	7,26%					
1997	6703	3,08%	6703	3,08%					
1998	7370	9,95%	7370	9,95%					
1999	7364	-0,08%	7364	-0,08%					
2000	8529	15,82%	8529	15,82%					
2001	8598	0,81%	8598	0,81%					
2002	8924	3,79%	8924	3,79%					
2003	9042	1,32%	9042	1,32%			2,89%		
2004	9370	3,63%	9370	3,63%					
2005	9491	1,29%	9491	1,29%					
2006	9889	4,19%	9889	4,19%					
2007	10411	5,28%	10411	5,28%	1,81%				
2008	10217	-1,86%	10217	-1,86%					
2009	9762	-4,45%	9809	-3,99%					
2010	9794	0,33%	9872	0,64%					
2011	9868	0,76%	10105	2,36%		-0,086%			
2012	9735	-1,35%	10438	3,30%			-0,57%		
2013	8764	-9,97%	9161	-12,23%				-0,73%	
2014	9092	3,74%	9263	1,11%					3,50%
2015	9195	1,13%	9813	5,94%					

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η διαφοροποίηση της συνολικής ετήσιας αιχμής από την ετήσια αιχμή στα όρια του Συστήματος, λόγω της διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ.



Σχήμα 3.11: Επίδραση Διεσπαρμένης Παραγωγής στην ετήσια αιχμή

Στον επόμενο πίνακα δίνονται οι μηνιαίες αιχμές στα όρια του Συστήματος για την περίοδο 2005-2015.

Πίνακας 3.9: Μηνιαία Αιχμή Φορτίου (μέση ωριαία) για την περίοδο 2005-2015

[106,114,116,117]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ιαν	8023	8712	8550	8825	8332	8714	8027	8734	8764	8109	9195
Φεβ.	8321	8641	8272	8796	8288	8317	8153	8529	7996	8136	8848
Μαρ.	7916	8142	8015	7842	7718	7863	8299	8080	7854	7819	7898
Απρ.	7356	7338	7605	7866	7157	7065	7041	6726	6516	6612	7287
Μάιος	7205	8149	7929	8550	7461	7341	6755	6517	6558	6321	6406
Ιουν.	8858	9602	10962	10175	9035	9732	7564	8361	7516	7546	6976
Ιουλ.	9186	9167	11110	10543	9762	9794	9868	9735	8263	8000	8683
Αυγ.	9800	9961	9661	9764	9329	9441	8314	8809	7789	7697	7700
Σεπ.	8044	8611	8776	9119	8294	7588	7981	7440	7307	6874	7634
Οκτ.	7526	7756	7797	7650	7290	7349	7298	6973	6593	7096	6765
Νοε.	8377	7912	8244	8031	7711	7251	7965	7279	7601	7878	7085
Δεκ.	8740	8447	9085	9125	8060	8457	7834	8470	8525	9092	8929

Μέχρι το 2012 οι ετήσιες αιχμές εμφανίζονται κατά τη θερινή περίοδο και συγκεκριμένα τον Ιούλιο, με εξαίρεση το 2005 και 2006 όπου οι ετήσιες αιχμές εμφανίστηκαν τον Αύγουστο. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την αυξανόμενη χρήση κλιματιστικών τους θερινούς μήνες. Από το 2013 και μετά ωστόσο το μοτίβο έχει αλλάξει και οι ετήσιες αιχμές του Συστήματος καταγράφονται πλέον το χειμώνα. Συγκεκριμένα εμφανίζονται τον Ιανουάριο για τα έτη 2013 και 2015 και τον Δεκέμβριο για το έτος 2014. Καθοριστικός παράγοντας στην αλλαγή αυτή είναι η συνεχώς αυξανόμενη τάση των καταναλωτών να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για θέρμανση το χειμώνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα δύο γραμμικά προβλήματα που υλοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της μακροχρόνιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Επίσης, παρουσιάζονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται οι πηγές τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στους στατιστικούς δείκτες σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και για τις ανεξάρτητες μεταβλητές για την περίοδο 1999-2015. Ο ορίζοντας της πρόβλεψης των μοντέλων είναι 10 χρόνια. Έτσι τα μελλοντικά δεδομένα εκτείνονται μέχρι το 2025.

Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στη Ελλάδα σε μέσο-μακροπρόθεσμη βάση είναι οι εξής [106]:

- Η οικονομική ανάπτυξη της χώρας, με βασικό δείκτη μέτρησης το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ).
- Οι αλλαγές στις καταναλωτικές συνήθειες λόγω βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου. Για παράδειγμα τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση των κλιματιστικών για θέρμανση το χειμώνα, η χρήση του ηλεκτρισμού στις μεταφορές και η χρήση των υπολογιστών. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης συγκεκριμένων πληθυσμιακών ομάδων (π.χ. οικονομικοί μετανάστες).
- Η γενικότερη κατάσταση του ενεργειακού τομέα και της αγοράς ηλεκτρισμού. Για παράδειγμα το επίπεδο των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και ο ανταγωνισμός με άλλες πηγές ενέργειας όπως το Φυσικό Αέριο και το Πετρέλαιο Θέρμανσης.
- Ειδικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η υλοποίηση έργων Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης.
- Διάφορα μέτρα εξειδίκευσης πολιτικών, όπως εξοικονόμηση ενέργειας, αντιστάθμιση αέργου ισχύος, περιβαλλοντικοί περιορισμοί, τα έξυπνα δίκτυα κτλ.

4.2 Μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν

Στο σημείο αυτό περιγράφονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στα προβλήματα πρόβλεψης καθώς και οι πηγές τους. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις μεταβλητές αφορούν την περίοδο 1999-2015.

Τιμή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας επιδρά με αρνητικό τρόπο στη ζήτηση ηλεκτρισμού, δηλαδή μία αύξηση στην τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης.

Τα δεδομένα για την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για την περίοδο 1999-2015 προήλθαν από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας [119]. Όσον αφορά τα μελλοντικά δεδομένα, αυτά προήλθαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή [120].

Τιμή Φυσικού Αερίου

Η τιμή του Φυσικού Αερίου έχει θετική επιρροή στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η αύξηση της τιμής του οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης ηλεκτρισμού.

Τα δεδομένα για την τιμή του φυσικού αερίου αντλήθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας [119]. Τα μελλοντικά στοιχεία για την τιμή του φυσικού αερίου βρέθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. [120]

Τιμή Πετρελαίου Θέρμανσης

Η τιμή του πετρελαίου θέρμανσης επηρεάζει θετικά τη ζήτηση ηλεκτρισμού, αφού το πετρέλαιο και η ηλεκτρική ενέργεια είναι υποκατάστατα αγαθά.

Τα παρελθοντικά δεδομένα για την τιμή του πετρελαίου θέρμανσης αντλήθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας [119]. Όσον αφορά τα μελλοντικά δεδομένα του πετρελαίου θέρμανσης, αυτά προήλθαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. [120]

Βαθμομέρες Θέρμανσης

Σαν Βαθμομέρες Θέρμανσης ορίζεται η ετήσια αθροιστική ποσότητα καθημερινών μέσων θερμοκρασιών οι οποίες είναι κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία κατωφλίου. Η θερμοκρασία κατωφλίου επιλέγεται έτσι ώστε να αναπαριστά μία εξωτερική θερμοκρασία αναφοράς [121]. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέγεται θερμοκρασία κατωφλίου 20°C [97]. Αν η εξωτερική θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία αναφοράς, ενεργοποιείται η θέρμανση προκειμένου να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία. Όσο χαμηλότερη είναι η εξωτερική θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερο είναι το άθροισμα βαθμομερών θέρμανσης και τόσο μεγαλύτερη είναι η ζήτηση ενέργειας για θέρμανση.

Για τον υπολογισμό των βαθμομερών θέρμανσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για 10 περιφέρειες της Ελλάδας, τόσο για τα παρελθοντικά όσο και για τα μελλοντικά στοιχεία [122]. Οι βαθμομέρες θέρμανσης υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου όρου.

Βαθμομέρες Ψύξης

Σαν Βαθμομέρες Ψύξης ορίζεται η ετήσια αθροιστική ποσότητα καθημερινών μέσων θερμοκρασιών οι οποίες είναι πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία κατωφλίου [121]. Όπως και στις βαθμομέρες θέρμανσης, η θερμοκρασία κατωφλίου επιλέγεται έτσι ώστε να αναπαριστά μία εξωτερική θερμοκρασία αναφοράς. Για την περίπτωση της Ελλάδας επιλέγεται θερμοκρασία κατωφλίου 25°C [97]. Αν η εξωτερική θερμοκρασία υπερβαίνει τη θερμοκρασία αναφοράς, απαιτείται ενέργεια για την ψύξη των κτιρίων. Όσο υψηλότερη είναι η εξωτερική θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερο είναι το άθροισμα βαθμομερών ψύξης αφού τόσο μεγαλύτερη είναι η ζήτηση ενέργειας για ψύξη.

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό των βαθμομερών θέρμανσης προήλθαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για 10 περιφέρειες της Ελλάδας, τόσο για τα παρελθοντικά όσο και για τα μελλοντικά στοιχεία [122]. Οι βαθμομέρες υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου όρου.

Συνολικός πληθυσμός

Ο πληθυσμός έχει θετική επίδραση στη ζήτηση ηλεκτρισμού καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των κατοίκων τόσο αυξάνονται οι απαιτήσεις για ενέργεια. Τα παρελθοντικά και μελλοντικά δεδομένα για το συνολικό πληθυσμό της Ελλάδας προήλθαν από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης [123].

Ποσοστό Ανεργίας

Το ποσοστό ανεργίας έχει, όπως και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, αρνητική επιρροή στη ζήτηση. Οι πηγές για το ποσοστό ανεργίας την περίοδο 1999-2015 προήλθαν από την EUROSTAT [124], ενώ οι τιμές της περιόδου 2016-2025 από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή [125].

Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης ODEX

Ο ODEX είναι ο δείκτης που χρησιμοποιείται από το ODYSSEE-MURE για τη μέτρηση της προόδου της ενεργειακής απόδοσης ανά κύριο τομέα (βιομηχανία, μεταφορές, οικιακό) καθώς και για το σύνολο της οικονομίας. Για κάθε τομέα, ο δείκτης υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των επιμέρους δεικτών της προόδου της ενεργειακής απόδοσης. Οι δείκτες ODEX αντιπροσωπεύουν μία καλύτερη εναλλακτική για την αξιολόγηση των τάσεων

της ενεργειακής απόδοσης σε ένα συγκεντρωτικό επίπεδο (πχ. το σύνολο της οικονομίας, τη βιομηχανία, τα νοικοκυριά, τις μεταφορές, τις υπηρεσίες) από ό,τι οι παραδοσιακοί δείκτες ενεργειακής έντασης, αφού δεν επηρεάζεται από τις διαρθρωτικές αλλαγές και από άλλους παράγοντες που δεν σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση. Για παράδειγμα, ένας δείκτης ODEX ίσως με 90 σημαίνει ένα 10% κέρδος σε ενεργειακή απόδοση.

Στο παρόν πρόβλημα χρησιμοποιείται ο δείκτης ODEX για το σύνολο της οικονομίας και τα δεδομένα προέρχονται από το ODYSEE-MURE [126].

Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ)

Στα 4 από τα 8 μοντέλα πρόβλεψης που υλοποιούνται χρησιμοποιείται το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν, ενώ στα υπόλοιπα 4 αυτό αντικαθίσταται από την ακαθάριστη προστιθέμενη αξία των 10 τομέων δραστηριότητας που το συνθέτουν. Οι τομείς αυτοί είναι:

- Γεωργία, δασοκομία και αλιεία
- Τέχνες, διασκέδαση και ψυχαγωγία, επισκευές ειδών νοικοκυριού και άλλες υπηρεσίες
- Κατασκευές
- Χρηματοπιστωτικές και ασφαλιστικές δραστηριότητες
- Ορυχεία και λατομεία, μεταποίηση, ενέργεια, παροχή νερού, επεξεργασία λυμάτων, διαχείριση αποβλήτων, εξυγίανση
- Ενημέρωση και επικοινωνία
- Επαγγελματικές, επιστημονικές και τεχνικές δραστηριότητες, διοικητικές και υποστηρικτικές δραστηριότητες
- Δημόσια διοίκηση και άμυνα, υποχρεωτική κοινωνική ασφάλιση, εκπαίδευση, δραστηριότητες σχετικές με την ανθρώπινη υγεία και την κοινωνική μέριμνα
- Διαχείριση ακίνητης περιουσίας
- Χονδρικό και λιανικό εμπόριο, επισκευές οχημάτων και μοτοσυκλετών, μεταφορά και αποθήκευση, υπηρεσίες παροχής καταλύματος και υπηρεσίες εστίασης

Τα δεδομένα για το ΑΕΠ και τις ισοδύναμες του μεταβλητές για την περίοδο 1999-2015 προέρχονται από την Ελληνική Στατιστική Αρχή [127]

Τα μελλοντικά δεδομένα για το ΑΕΠ προήλθαν από τον ΑΔΜΗΕ [106] ενώ τα αντίστοιχα δεδομένα των ισοδύναμων μεταβλητών του από την ΕΛΣΤΑΤ [127].

4.3 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (εξαρτημένη μεταβλητή) εξαρτάται από το σύνολο των παραγόντων (ανεξάρτητες μεταβλητές) που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Το μοντέλο αυτό υλοποιείται 4 φορές με διαφορετικές επιλογές ανεξάρτητων μεταβλητών. Τα 2 από τα 4 διαφορετικά προβλήματα περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Στο παρόν κεφάλαιο θεωρείται ότι T είναι ο χρονικός ορίζοντας, n ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών και y ο αριθμός των μεταβλητών που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Με βάση τα προηγούμενα, η εξίσωση παλινδρόμησης έχει την ακόλουθη μορφή:

$$Y_t = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_{it} \quad (1)$$

όπου Y_t είναι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τη χρονική περίοδο t , X_{it} είναι η τιμή του i παράγοντα τη χρονική περίοδο t και b_i είναι οι εκτιμώμενοι συντελεστές της παλινδρόμησης (για $i = 0, 1, \dots, n$).

Στην παραπάνω μοντελοποίηση πρέπει να σημειωθεί η ύπαρξη του σταθερού όρου b_0 ο οποίος υποδηλώνει το ελάχιστο επίπεδο ζήτησης ηλεκτρισμού για οποιαδήποτε χρονική περίοδο.

Το μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που μορφοποιείται με χρήση της εξίσωσης παλινδρόμησης (1) ελαχιστοποιεί το άθροισμα των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων και έχει την εξής μορφή:

$$[\min] F = \sum_{j=1}^T (\sigma_j^+ + \sigma_j^-)$$

υπό τους περιορισμούς

$$b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_{ij} + \sigma_j^- - \sigma_j^+ = Y_j, \text{ για } j = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 0, 1, \dots, n - y$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = n - y + 1, n$$

$$\sigma_j^-, \sigma_j^+ \geq 0 \text{ for } j = 1, 2, \dots, T$$

όπου σ_j^- και σ_j^+ είναι αντίστοιχα τα σφάλματα υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης τη χρονική περίοδο j , ενώ $j = t-1998$ είναι η περίοδος του χρονικού ορίζοντα, σε σχέση με το έτος t .

Αξίζει να σημειωθεί η ύπαρξη περιορισμών αρνητικότητας για τις μεταβλητές που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Λόγω αστάθειας και αβεβαιότητας των δεδομένων κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή ανάλυσης ευστάθειας των αποτελεσμάτων που δίνει το γραμμικό πρόγραμμα (2). Η ανάλυση ευστάθειας αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης, στο οποίο εκτιμούνται τα διαστήματα τιμών στα οποία μεταβάλλονται οι συντελεστές παλινδρόμησης b_i . Στη συγκεκριμένη περίπτωση μορφοποιούνται και επιλύονται γραμμικά προβλήματα διπλάσια σε πλήθος από τον αριθμό των συντελεστών b_i , με την ακόλουθη μορφή:

$$\left\{ \begin{array}{l} [min]F' = b_i \text{ για } i = 0,1, \dots, n \\ \text{υπό τους περιορισμούς} \\ F \leq (1 + \varepsilon)F^* \\ \text{όλοι οι περιορισμοί του ΓΠ (2)} \end{array} \right. \quad \text{και} \quad \left\{ \begin{array}{l} [max]F'' = b_i \text{ for } i = 0,1, \dots, n \\ \text{υπό τους περιορισμούς} \\ F \leq (1 + \varepsilon)F^* \\ \text{όλοι οι περιορισμοί του ΓΠ (2)} \end{array} \right.$$

όπου ε είναι ένας μικρός θετικός αριθμός (ποσοστό παραχώρησης σφαλμάτων) και F^* είναι η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του γραμμικού προγράμματος (2).

Για τα συγκεκριμένα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 έχει επιλεγεί $\varepsilon = 1\%$. Ωστόσο, στο πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή του ε .

Η τελική λύση των συντελεστών b_i υπολογίζεται ως η μέση τιμή όλων των προηγούμενων γραμμικών προβλημάτων. Επίσης, με βάση αυτή την τιμή των b_i υπολογίζεται εκ νέου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (ζήτηση προβλήματος μεταβελτιστοποίησης).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαφορετικά προβλήματα που υλοποιήθηκαν ανάλογα με τις μεταβλητές που επιλέχθηκαν.

4.3.1 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 1^η έκδοση

Στο παρόν πρόβλημα χρησιμοποιούνται 8 ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, με δύο από αυτές να επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση. Έτσι, στις παραπάνω εξισώσεις θεωρούνται $n=8$ και $y=2$.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράγοντες του μοντέλου πρόβλεψης μαζί με τις μονάδες μέτρησής τους και τους συμβολισμούς τους.

Πίνακας 4.1: Δεδομένα μοντέλου πρόβλεψης

Παράγοντες	Μονάδα μέτρησης	Συμβολισμός	Συντελεστής παλινδρόμησης
Σταθερός	MWh	-	b_0
Τιμή φυσικού αερίου	Ευρώ/10 ⁷ kcal	X_{1t}	b_1
Τιμή πετρελαίου θέρμανσης	Ευρώ/1000 λίτρα	X_{2t}	b_2
Βαθμοήμερες θέρμανσης	Ημέρες	X_{3t}	b_3
Βαθμοήμερες ψύξης	Ημέρες	X_{4t}	b_4
Συνολικός πληθυσμός	Χιλιάδες κάτοικοι	X_{5t}	b_5
Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ)	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{6t}	b_6
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	Ευρώ/KWh	X_{7t}	b_7
Ποσοστό ανεργίας	Ποσοστιαίες μονάδες	X_{8t}	b_8

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, οι συντελεστές παλινδρόμησης της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και του ποσοστού ανεργίας έχουν αρνητική τιμή. Πιο συγκεκριμένα, οι περιορισμοί για τους συντελεστές παλινδρόμησης είναι:

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 0,1, \dots, 6$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = 7,8 .$$

4.3.2 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 2^η έκδοση

Στο μοντέλο αυτό, εκτός από τις μεταβλητές του μοντέλου 4.3.1, χρησιμοποιείται και ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης ODEX. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι $n=9$ και το πλήθος των μεταβλητών που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση είναι $y=2$ (τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό ανεργίας), αφού ο δείκτης ODEX έχει θετική επιρροή στη ζήτηση.

4.3.3 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 3^η έκδοση

Στο μοντέλο αυτό το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν αντικαθίσταται από τις 10 συνιστώσες ακαθάριστης προστιθέμενης αξίας των επιμέρους τομέων δραστηριότητας που έχουν περιγραφεί στην ενότητα 4.2. Οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι οι ίδιες με αυτές του προβλήματος 4.3.1. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι $n=17$ και το πλήθος των μεταβλητών που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση είναι $y=2$.

4.3.4 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 4^η έκδοση

Στο μοντέλο αυτό, εκτός από τις μεταβλητές του μοντέλου 4.3.3, χρησιμοποιείται και ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης ODEX. Έτσι, στις παραπάνω εξισώσεις είναι $n=18$ και $y=2$, αφού οι μοναδικές μεταβλητές που έχουν αρνητική επιρροή στη ζήτηση είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό ανεργίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράγοντες του μοντέλου πρόβλεψης μαζί με τις μονάδες μέτρησής τους και τους συμβολισμούς τους.

Πίνακας 4.2: Δεδομένα μοντέλου πρόβλεψης

Παράγοντες	Μονάδα μέτρησης	Συμβολισμός	Συντελεστής παλινδρόμησης
Σταθερός	MWh	-	b_0
Τιμή φυσικού αερίου	Ευρώ/10 ⁷ kcal	X_{1t}	b_1
Τιμή πετρελαίου θέρμανσης	Ευρώ/1000 λίτρα	X_{2t}	b_2
Βαθμοήμερες θέρμανσης	Ημέρες	X_{3t}	b_3
Βαθμοήμερες ψύξης	Ημέρες	X_{4t}	b_4
Συνολικός πληθυσμός	Χιλιάδες κάτοικοι	X_{5t}	b_5
Γεωργία, δασοκομία και αλιεία	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{6t}	b_6
Τέχνες, διασκέδαση και ψυχαγωγία, επισκευές ειδών νοικοκυριού και άλλες υπηρεσίες	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{7t}	b_7
Κατασκευές	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{8t}	b_8
Χρηματοπιστωτικές και ασφαλιστικές δραστηριότητες	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{9t}	b_9
Ορυχεία και λατομεία, μεταποίηση, ενέργεια, παροχή νερού, επεξεργασία λυμάτων, διαχείριση αποβλήτων, εξυγίανση	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{10t}	b_{10}
Ενημέρωση και επικοινωνία	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{11t}	b_{11}
Επαγγελματικές, επιστημονικές και τεχνικές δραστηριότητες, διοικητικές και υποστηρικτικές δραστηριότητες	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{12t}	b_{12}
Δημόσια διοίκηση και άμυνα, υποχρεωτική κοινωνική ασφάλιση, εκπαίδευση, δραστηριότητες σχετικές με την ανθρώπινη υγεία και την κοινωνική μέριμνα	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{13t}	b_{13}
Διαχείριση ακίνητης περιουσίας	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{14t}	b_{14}

Χονδρικό και λιανικό εμπόριο, επισκευές οχημάτων και μοτοσυκλετών, μεταφορά και αποθήκευση, υπηρεσίες παροχής καταλύματος και υπηρεσίες εστίασης	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	X_{15t}	b_{15}
Δείκτης ενεργειακής απόδοσης ODEX	Ποσοστιαίες μονάδες	X_{16t}	b_{16}
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	Ευρώ/KWh	X_{17t}	b_{17}
Ποσοστό ανεργίας	Ποσοστιαίες μονάδες	X_{18t}	b_{18}

Οι περιορισμοί για τους συντελεστές παλινδρόμησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 0,1, \dots, 16$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = 17,18 .$$

4.4 Γραμμικό μοντέλο διαφορών

Το γραμμικό μοντέλο διαφορών ακολουθεί παρόμοια συλλογιστική μοντελοποίησης με το γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών, με τη διαφορά ότι επικεντρώνεται στις ποσοστιαίες μεταβολές των εξεταζομένων ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Η αναγκαιότητα της συγκεκριμένης μοντελοποίησης δικαιολογείται από την ύπαρξη μιας έντονης αυτοσυσχέτισης που παρατηρήθηκε στα δεδομένα της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μοντέλο αυτό υλοποιείται 4 φορές με διαφορετικές επιλογές ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως και το γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών. Τα 2 από τα 4 διαφορετικά προβλήματα περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Όμοια με το γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών, T είναι ο χρονικός ορίζοντας, n ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών και y ο αριθμός των μεταβλητών που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, το γραμμικό μοντέλο διαφορών υποθέτει ότι η ετήσια μεταβολή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τις ετήσιες μεταβολές των n παραγόντων που επιλέγονται. Έτσι, η εξίσωση παλινδρόμησης έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta Y_t = \sum_{i=1}^n b_i \Delta X_{it} \quad (3)$$

όπου ΔY_t είναι η ετήσια % μεταβολή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας τη χρονική περίοδο t , ΔX_{it} είναι η ετήσια % μεταβολή του i παράγοντα τη χρονική περίοδο t και b_i είναι οι εκτιμώμενοι συντελεστές της παλινδρόμησης (για $i = 1,2, \dots, n$).

Θα πρέπει να σημειωθεί η έλλειψη του σταθερού όρου, λόγω της μορφής της συγκεκριμένης μοντελοποίησης.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (3), το συγκεκριμένο μοντέλο προβλέπει έμμεσα τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι ο βασικός στόχος είναι η πρόβλεψη της ετήσιας μεταβολής της εξαρτημένης αυτής μεταβλητής. Για το λόγο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί πιο ευαίσθητο στις μεταβολές των διαθέσιμων δεδομένων.

Με βάση τα προηγούμενα, το συγκεκριμένο μοντέλο διαφορών ελαχιστοποιεί το άθροισμα των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων και έχει την εξής μορφή:

$$[min]F = \sum_{j=1}^T \sigma_j^+ + \sigma_j^-,$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{i=1}^n b_i \Delta X_{ij} + \sigma_j^- - \sigma_j^+ = \Delta Y_j, \text{ για } j = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

$$b_i \geq 0 \text{ για } i = 1, 2, \dots, n - y$$

$$b_i \leq 0 \text{ για } i = n - y + 1, n$$

$$\sigma_j^-, \sigma_j^+ \geq 0 \text{ για } j = 1, 2, \dots, T$$

όπου σ_j^- και σ_j^+ είναι αντίστοιχα τα σφάλματα υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης τη χρονική περίοδο j και $j = t - 1999$ είναι η περίοδος του χρονικού ορίζοντα σε σχέση με το έτος t .

Και σε αυτή την περίπτωση, οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας εισέρχονται στο μοντέλο με αρνητικούς συντελεστές.

Η εφαρμογή μιας ανάλυσης μεταβελτιστοποίησης κρίνεται απαραίτητη και σε αυτή την περίπτωση, όμοια με αυτά που αναφέρονται στην παράγραφο 4.3. Και σε αυτή την περίπτωση, μορφοποιούνται και επιλύονται γραμμικά προβλήματα διπλάσια σε αριθμό από το πλήθος των συντελεστών b_i , με την ακόλουθη μορφή:

$$\left\{ \begin{array}{l} [min]F' = b_i \text{ για } i = 1, 2, \dots, n \\ \text{υπό τους περιορισμούς} \\ F \leq (1 + \varepsilon)F^* \\ \text{όλοι οι περιορισμοί του ΓΠ (4)} \end{array} \right. \quad \text{και} \quad \left\{ \begin{array}{l} [max]F'' = b_i \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \\ \text{υπό τους περιορισμούς} \\ F \leq (1 + \varepsilon)F^* \\ \text{όλοι οι περιορισμοί του ΓΠ (4)} \end{array} \right.$$

όπου ε είναι ένας μικρός θετικός αριθμός (ποσοστό παραχώρησης σφαλμάτων) και F^* είναι η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του γραμμικού προγράμματος (4).

Για τα συγκεκριμένα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 έχει επιλεγεί $\varepsilon = 1\%$. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή του ε .

Όμοια, η τελική λύση των συντελεστών b_i υπολογίζεται ως η μέση τιμή όλων των προηγούμενων γραμμικών προβλημάτων. Επίσης, με βάση τη μέση τιμή των b_i υπολογίζεται εκ νέου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (ζήτηση προβλήματος μεταβελτιστοποίησης).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαφορετικά προβλήματα που υλοποιήθηκαν, ανάλογα με τις μεταβλητές που επιλέχθηκαν στην κάθε περίπτωση.

4.4.1 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 1^η έκδοση

Στο παρόν πρόβλημα χρησιμοποιούνται 8 ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, με δύο από αυτές να επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι $n=8$ και το πλήθος των μεταβλητών που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση είναι $y=2$.

4.4.2 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 2^η έκδοση

Στην παρακάτω μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται 9 ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από τις μεταβλητές του προβλήματος 4.4.1 χρησιμοποιείται και ο δείκτης ODEX. Αρνητική επιρροή στη ζήτηση έχουν μόνο η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό ανεργίας. Έτσι, στις παραπάνω εξισώσεις θεωρούνται $n=9$ και $y=2$.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι μεταβλητές του μοντέλου πρόβλεψης μαζί με τις μονάδες μέτρησής τους και τους συμβολισμούς τους.

Πίνακας 4.3: Μεταβλητές μοντέλου πρόβλεψης

Παράγοντες	Μονάδα μέτρησης	Συμβολισμός	Συντελεστής παλινδρόμησης
Τιμή φυσικού αερίου	Ευρώ/10 ⁷ kcal	ΔX_{1t}	b_1
Τιμή πετρελαίου θέρμανσης	Ευρώ/1000 λίτρα	ΔX_{2t}	b_2
Βαθμοημέρες θέρμανσης	Ημέρες	ΔX_{3t}	b_3
Βαθμοημέρες ψύξης	Ημέρες	ΔX_{4t}	b_4
Συνολικός πληθυσμός	Χιλιάδες κάτοικοι	ΔX_{5t}	b_5
Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ)	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{6t}	b_6
Δείκτης ενεργειακής απόδοσης ODEX	Ποσοστιαίες μονάδες	ΔX_{7t}	b_7
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	Ευρώ/KWh	ΔX_{8t}	b_8
Ποσοστό ανεργίας	Ποσοστιαίες μονάδες	ΔX_{9t}	b_9

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, οι περιορισμοί για τους συντελεστές παλινδρόμησης είναι:

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, 7$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = 8, 9.$$

4.4.3 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 3^η έκδοση

Στο μοντέλο αυτό το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν αντικαθίσταται από τις 10 συνιστώσες ακαθάριστης προστιθέμενης αξίας των επιμέρους τομέων δραστηριότητας που έχουν περιγραφεί προηγουμένως. Οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι ίδιες με του προβλήματος 4.4.1. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι $n=17$ και το πλήθος των μεταβλητών που επηρεάζουν αρνητικά τη ζήτηση είναι $y=2$.

4.4.4 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 4^η έκδοση

Στο μοντέλο αυτό εκτός από τις μεταβλητές του προβλήματος 4.4.3 χρησιμοποιείται και ο δείκτης ODEX. Έτσι, στις παραπάνω εξισώσεις είναι $n=18$ και $y=2$, αφού οι μοναδικές μεταβλητές που έχουν αρνητική επιρροή στη ζήτηση είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό ανεργίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράγοντες του μοντέλου πρόβλεψης μαζί με τις μονάδες μέτρησής τους και τους συμβολισμούς τους.

Πίνακας 4.4: Μεταβλητές μοντέλου πρόβλεψης

Παράγοντες	Μονάδα μέτρησης	Συμβολισμός	Συντελεστής παλινδρόμησης
Τιμή φυσικού αερίου	Ευρώ/ 10^7 kcal	ΔX_{1t}	b_1
Τιμή πετρελαίου	Ευρώ/1000 λίτρα	ΔX_{2t}	b_2
Βαθμοημέρες θέρμανσης	Ημέρες	ΔX_{3t}	b_3
Βαθμοημέρες ψύξης	Ημέρες	ΔX_{4t}	b_4
Συνολικός πληθυσμός	Χιλιάδες κάτοικοι	ΔX_{5t}	b_5
Γεωργία, δασοκομία και αλιεία	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{6t}	b_6
Τέχνες, διασκέδαση και ψυχαγωγία, επισκευές ειδών νοικοκυριού και άλλες υπηρεσίες	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{7t}	b_7
Κατασκευές	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{8t}	b_8

Χρηματοπιστωτικές και ασφαλιστικές δραστηριότητες	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{9t}	b_9
Ορυχεία και λατομεία, μεταποίηση, ενέργεια, παροχή νερού, επεξεργασία λυμάτων, διαχείριση αποβλήτων, εξυγίανση	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{10t}	b_{10}
Ενημέρωση και επικοινωνία	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{11t}	b_{11}
Επαγγελματικές, επιστημονικές και τεχνικές δραστηριότητες, διοικητικές και υποστηρικτικές δραστηριότητες	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{12t}	b_{12}
Δημόσια διοίκηση και άμυνα, υποχρεωτική κοινωνική ασφάλιση, εκπαίδευση, δραστηριότητες σχετικές με την ανθρώπινη υγεία και την κοινωνική μέριμνα	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{13t}	b_{13}
Διαχείριση ακίνητης περιουσίας	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{14t}	b_{14}
Χονδρικό και λιανικό εμπόριο, επισκευές οχημάτων και μοτοσικλετών, μεταφορά και αποθήκευση, υπηρεσίες παροχής καταλύματος και υπηρεσίες εστίασης	Σταθερές τιμές (σε εκατ. €) από το προηγούμενο έτος	ΔX_{15t}	b_{15}
Δείκτης ενεργειακής απόδοσης ODEX	Ποσοστιαίες μονάδες	ΔX_{16t}	b_{16}
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	Ευρώ/KWh	ΔX_{17t}	b_{17}
Ποσοστό ανεργίας	Ποσοστιαίες μονάδες	ΔX_{18t}	b_{18}

Οι περιορισμοί για τους συντελεστές παλινδρόμησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, 16$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = 17, 18.$$

4.5 Δείκτες Σφαλμάτων

Η ακρίβεια της πρόβλεψης είναι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της μεθόδου πρόβλεψης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται διάφοροι στατιστικοί δείκτες για τη μέτρηση της ακρίβειας των μοντέλων.

Θεωρείται ως A_t η πραγματική τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας το χρόνο t , F_t η προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και T ο συνολικός αριθμός των χρόνων που εξετάστηκαν. Ακόμα, θεωρούνται \bar{A} , \bar{F} οι μέσες τιμές της πραγματικής και της προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα.

Το σφάλμα της πρόβλεψης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$e_t = A_t - F_t$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικοί στατιστικοί δείκτες σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν [128]:

- Ποσοστιαίο Σφάλμα (Percentage Error)

$$e_t \% = \frac{A_t - F_t}{A_t} * 100$$

Εκφράζει την ποσοστιαία απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική τιμή δίνοντας σημασία στο πρόσημο.

- Απόλυτο Σφάλμα (Absolute Error)

$$Absolute\ Error = |A_t - F_t|$$

Εκφράζει την απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική τιμή χωρίς να δίνει σημασία στο πρόσημο.

- Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (Absolute Percentage Error)

$$APE = \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| * 100 \%$$

Εκφράζει την απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική τιμή.

- Μέσο Σφάλμα (Mean Forecasting Error)

$$MFE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T A_t - F_t$$

Προκύπτει ως ο μέσος όρος των σφαλμάτων και εκφράζει ένα μέτρο συστηματικότητας του σφάλματος. Όταν το σφάλμα παίρνει θετικές τιμές σημαίνει ότι υπάρχει απαισιοδοξία στις προβλέψεις, ενώ όταν λαμβάνει αρνητικές τιμές υπάρχει αισιοδοξία. Τιμές του σφάλματος κοντά στο 0 υποδηλώνουν ότι τα σφάλματα χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα. Διατηρεί τις μονάδες μέτρησης της αρχικής χρονοσειράς.

- Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |A_t - F_t|$$

Προκύπτει ως ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων και λαμβάνει θετικές τιμές. Όπως και το μέσο σφάλμα, διατηρεί τις μονάδες μέτρησης της αρχικής χρονοσειράς. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ χρονοσειρών που έχουν διαφορετική μονάδα μέτρησης.

- Μέσο Ποσοστιαίο Σφάλμα (Mean Percentage Error)

$$MPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{A_t - F_t}{A_t} * 100\%$$

Προκύπτει ως ο μέσος όρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων. Επειδή χρησιμοποιούνται οι αλγεβρικές τιμές των σφαλμάτων, θετικές και αρνητικές τιμές μπορεί να αντισταθμίσουν η μία την άλλη. Ένα βασικό μειονέκτημα του δείκτη είναι ότι δεν ορίζεται όταν η πραγματική τιμή έχει τιμή 0.

- Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error)

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| * 100\%$$

Αποτελεί τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στατιστικό δείκτη σφάλματος. Λαμβάνει μόνο θετικές τιμές και δίνει την ίδια βαρύτητα σε όλες τις προβλέψεις. Λειτουργεί καλύτερα όταν δεν υπάρχουν ακραίες τιμές στα δεδομένα. Παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα. Όταν η πραγματική τιμή είναι 0 οδηγείται σε απροσδιοριστία. Επίσης, ενώ για χαμηλές προβλέψεις δεν μπορεί να υπερβεί το 100%, για πολύ υψηλές προβλέψεις δεν υπάρχει ανώτατο όριο για το ποσοστιαίο σφάλμα.

- Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Squared Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (A_t - F_t)^2}{T}}$$

Είναι ένας αξιόπιστος δείκτης, αλλά μόνο για να συγκρίνει σφάλματα μεταξύ χρονοσειρών που έχουν την ίδια μονάδα μέτρησης, καθώς διατηρεί τις μονάδες μέτρησης της αρχικής χρονοσειράς. Επηρεάζεται έντονα από τα μεγάλα σφάλματα, ενώ δίνει μικρή βαρύτητα στα μικρά.

- Κανονικοποιημένη Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος

$$NRMSE = \frac{RMSE}{A_{t,max} - A_{t,min}}$$

Αποτελεί τροποποίηση της Ρίζας του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος. Όντας καθαρός αριθμός, επιτρέπει τις συγκρίσεις μεταξύ χρονοσειρών που έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης.

- Coefficient of Determination (r^2)

$$r^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (A_t - \bar{A})(F_t - \bar{F})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (A_t - \bar{A})^2 * \sum_{t=1}^T (F_t - \bar{F})^2}}$$

Υποδεικνύει τη διακύμανση μίας μεταβλητής η οποία είναι προβλέψιμη από την άλλη. Πρόκειται για ένα μέτρο που υποδηλώνει πόσο σίγουρος μπορεί να είναι κάποιος όταν κάνει προβλέψεις χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο μοντέλο. Η δομή του δείκτη αυτού είναι τέτοια έτσι ώστε $0 \leq r^2 \leq 1$ και δηλώνει τη δύναμη της γραμμικής σύνδεσης μεταξύ των δύο μεταβλητών.

- Μέσος Δείκτης Ευστάθειας (Average Stability Index)

$$ASI = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n (b_i)^2 - (\sum_{j=1}^n b_i)^2}{n - 1}}$$

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται στα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης του γραμμικού μοντέλου διαφορών. Ορίζεται ως η μέση τιμή της κανονικοποιημένης τυπικής απόκλισης των εκτιμώμενων βαρών των κριτηρίων του προβλήματος. n είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών.

- Average Fitting Index

$$AFI = 1 - \frac{F^*}{T}$$

Και αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται στα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης του γραμμικού μοντέλου διαφορών. Ο δείκτης αυτός εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και τον αριθμό των χρόνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης όπως αναπτύχθηκαν στο λογισμικό AIMMS. Επίσης, περιγράφεται το λογισμικό αυτό και επιδεικνύεται η σπουδαιότητά του. Τα δεδομένα εισέρχονται στο πρόγραμμα από ένα αρχείο Microsoft Excel. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα δεδομένα του προγράμματος εύκολα και γρήγορα. Επίσης, τα αποτελέσματα του προγράμματος εξάγονται, μετά την υλοποίηση, σε ένα νέο αρχείο Excel. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα για μελλοντική επέκταση.

5.2 Το λογισμικό AIMMS

Το AIMMS (Advanced Interactive Multidimensional Modeling System) είναι ένα λογισμικό σχεδιασμένο για τη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας καθώς και προβλημάτων προγραμματιστικού τύπου (πχ. προγραμματισμός παραγωγής) [128,129]. Πρωτοεμφανίστηκε το 1993 σαν ένα νέο εργαλείο μαθηματικής μοντελοποίησης - ένας συνδυασμός μιας γλώσσας μοντελοποίησης, ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη και αριθμητικών επιλυτών. Το AIMMS είναι ένα από τα πιο προηγμένα περιβάλλοντα ανάπτυξης για το σχεδιασμό εφαρμογών υποστήριξης αποφάσεων που βασίζονται στη βελτιστοποίηση καθώς και το σχεδιασμό προηγμένων συστημάτων σχεδιασμού.

Επίσης, προσφέρει μια σειρά από προηγμένες δυνατότητες μοντελοποίησης που δεν υπάρχουν σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού, καθώς και ένα ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον τόσο για τους προγραμματιστές όσο και για τους τελικούς χρήστες. Περιλαμβάνει λύτες παγκόσμιας κλάσης για γραμμικό, μικτό ακέραιο και μη γραμμικό προγραμματισμό, όπως BARON, CPLEX, CONOPT, GUROBI, KNITRO, PATH, SNOPT και XA και μπορεί εύκολα να επεκταθεί έτσι ώστε να ενσωματώσει και άλλους προηγμένους λύτες διαθέσιμους στη σημερινή αγορά. Επιπλέον, έννοιες όπως ο στοχαστικός προγραμματισμός και η εύρωστη βελτιστοποίηση είναι διαθέσιμες να συμπεριλάβουν την αβεβαιότητα των δεδομένων στα μοντέλα.

Προγραμματιστές και ειδικοί ερευνητικών δραστηριοτήτων χρησιμοποιούν το AIMMS προκειμένου να αναπτύξουν σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης και να δημιουργήσουν ένα γραφικό περιβάλλον γύρω από το μοντέλο. Το AIMMS δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να χρησιμοποιήσουν τις πιο εξελιγμένες τεχνικές μαθηματικής μοντελοποίησης

βοηθώντας τους να βελτιώσουν την ποιότητα, εξυπηρέτηση, κερδοφορία και ανταπόκριση των δραστηριοτήτων τους.

Θεωρείται μια από τις πέντε πιο σημαντικές γλώσσες αλγεβρικής μοντελοποίησης (οι υπόλοιπες είναι οι AMPL, GAMS, LINDO/LINGO και MPL). Επίσης, ο δημιουργός του (Johannes J. Bisschop) έχει βραβευτεί με το INFORMS Impact Prize για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης γλώσσας.

Χρησιμοποιείται σήμερα από κορυφαίες επιχειρήσεις σε ένα ευρύ φάσμα τομέων όπως η διαχείριση ενέργειας, ο προγραμματισμός της παραγωγής, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας καθώς και η διαχείριση των κινδύνων, των εσόδων και του κεφαλαίου. Επίσης, χρησιμοποιείται από κορυφαία πανεπιστήμια σε όλο τον κόσμο για ερευνητικούς σκοπούς καθώς και στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών.

Μερικές από τις κορυφαίες επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν το AIMMS είναι [129]:

- ABN AMRO
- Areva
- Bayer
- Bluescope Steel
- BP
- CST
- ExxonMobil
- Gaz de France
- Heineken
- Innovene
- Lufthansa
- Merck
- Owens Corning
- Perdigao
- Petrobras
- Philips
- PriceWaterhouseCoopers
- Reliance
- Repsol
- Shell
- Statoil
- Unilever

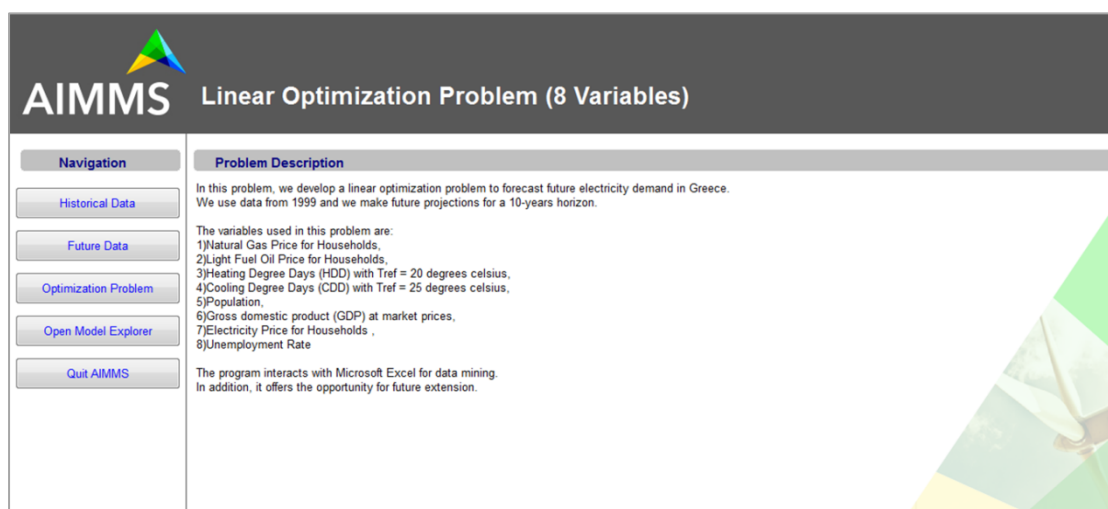
Μερικά από τα πανεπιστήμια που χρησιμοποιούν το AIMMS είναι [129]:

- Budapest University of Technology
- George Mason University
- Georgia Institute of Technology
- Harvard University
- Japan Advanced Institute of Science and Technology
- London School of Economics
- Massachusetts Institute of Technology
- Nanyang Technological University
- Technical University of Eindhoven
- Technische Universitt Berlin

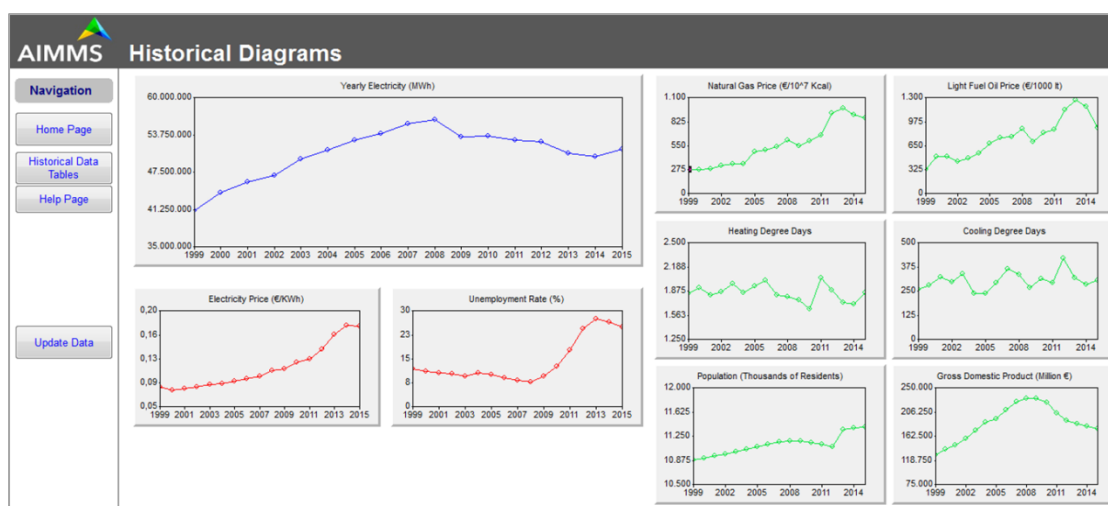
5.3 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών

5.3.1 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 1^η έκδοση

Στην εικόνα 5.1 φαίνεται η αρχική σελίδα του προγράμματος. Στη σελίδα αυτή δίνεται μια αρχική περιγραφή του προβλήματος: ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης, οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται καθώς και κάποια άλλα features του προγράμματος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης στις άλλες σελίδες, μία εντολή για να ανοίξει ο Model Explorer προκειμένου να μπορεί ο προγραμματιστής να επέμβει και να αλλάξει το πρόγραμμα καθώς και μία εντολή για το κλείσιμο του προγράμματος.



Εικόνα 5.1: Η αρχική σελίδα του προγράμματος



Εικόνα 5.2: Τα διαγράμματα ιστορικών δεδομένων

Στην εικόνα 5.2 αναπαρίστανται οι καμπύλες των ιστορικών δεδομένων. Η καμπύλη της ιστορικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αναπαρίσταται με μπλε χρώμα, οι μεταβλητές που επηρεάζουν θετικά τη ζήτηση με πράσινο και οι μεταβλητές που έχουν αρνητική επιρροή με

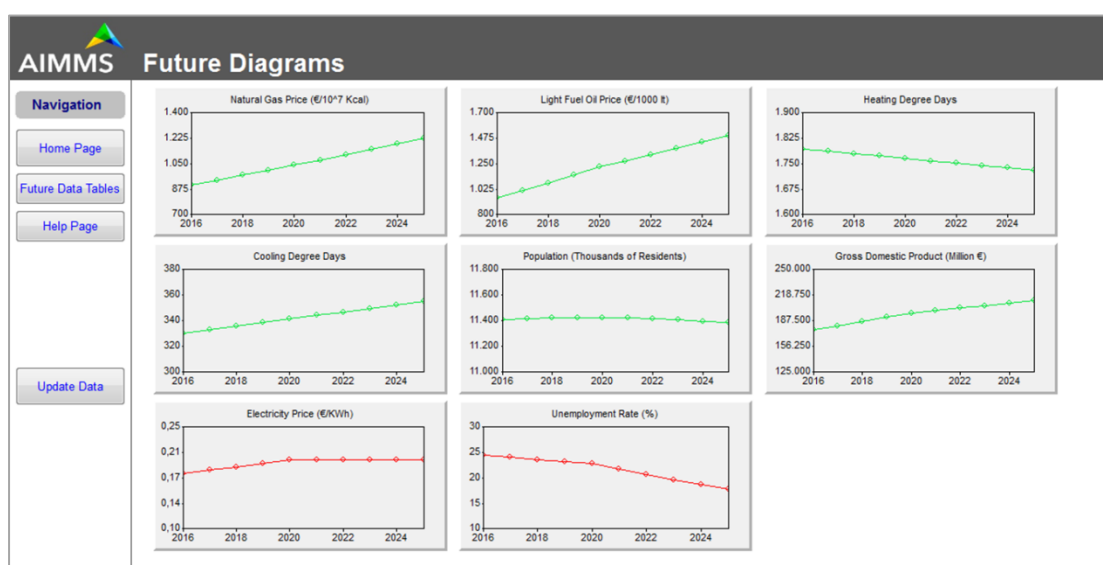
κόκκινο. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν τρία κουμπιά πλοήγησης: ένα για επιστροφή στην αρχική σελίδα, ένα για μετάβαση στους πίνακες με τα ιστορικά δεδομένα και ένα για μετάβαση σε βοηθητική σελίδα. Επίσης, υπάρχει μία εντολή με την οποία ενημερώνονται τα δεδομένα του προγράμματος ανάλογα με τις τιμές που δίνει ο χρήστης στο Excel.

Στην εικόνα 5.3 παρέχεται ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές τους που αφορούν σε ιστορικά στοιχεία. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στα διαγράμματα και τους πίνακες ιστορικών δεδομένων.

	Measurement Unit	Sources
Constant	MWh	-
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	IEA (2007,2016)
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	IEA (2007,2016)
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
GDP at market prices	Constant prices, million euro	ELSTAT
Electricity Price	Euros per kWh	IEA, EUTOSTAT
Unemployment Rate	%	EUROSTAT

Εικόνα 5.3: Βοηθητική σελίδα για τα ιστορικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.4 φαίνονται τα διαγράμματα με τα μελλοντικά δεδομένα των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα, στους πίνακες με τα μελλοντικά στοιχεία και σε μια βοηθητική σελίδα.



Εικόνα 5.4: Τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία. Σε αυτήν υπάρχει ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές τους. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στα διαγράμματα και τους πίνακες μελλοντικών δεδομένων.

The screenshot shows the 'AIMMS Help Page (Future)' interface. On the left, there is a 'Navigation' sidebar with buttons for 'Future Data Tables' and 'Future Diagrams'. The main content area features a table with three columns: 'Constant', 'Measurement Unit', and 'Sources'.

Constant	Measurement Unit	Sources
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	EC (2014) Commission Staff Working Document
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	EC (2014) Commission Staff Working Document
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
GDP at market prices	Constant prices, million euro	IPTO (2016) DPA 2017-2026
Electricity Price	Euros per kWh	EC Communication (2014)
Unemployment Rate	%	EC (2014)_The 2015 Ageing Report

Εικόνα 5.5: Βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.6 δίνεται μια περιγραφή του μοντέλου πρόβλεψης μαζί με έναν πίνακα με τους συντελεστές των μεταβλητών. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά για μετάβαση στην αρχική σελίδα του προγράμματος καθώς και στην πρόβλεψη της παρελθοντικής και μελλοντικής ζήτησης.

The screenshot shows the 'AIMMS Optimization Problem' page. On the left, there is a 'Navigation' sidebar with buttons for 'Home Page', 'Past Optimization', and 'Future Optimization'. The main content area contains a text description of the linear optimization model, a mathematical formula for electricity demand, and a table of regression coefficients.

The basic linear optimization model assumes that electricity demand depends on the 8 parameters that have been presented. The regression formula of this model has the following form:

$$Y_t = b_0 + \sum_{i=1}^8 b_i X_{it}$$

where Y_t is the electricity demand in year t , X_{it} is the price of parameter i in year t and b_i are the estimated regression coefficients (for $i=0,1,\dots,8$).

The existence of the constant term b_0 must be referred. This particular term indicates the minimum level of electricity demand for any period of time.

Based on the previous assumptions applied, this specific linear optimization model minimizes the sum of the errors' absolute values and is as follows:

$$\begin{cases} [\min] F = \sum_{j=1}^T \sigma_j^+ + \sigma_j^- \\ \text{under the following constraints} \\ b_0 + \sum_{i=1}^8 b_i X_{ij} + \sigma_j^- - \sigma_j^+ = Y_j, \text{ for } j = 1, 2, \dots, T \\ b_i \geq 0 \text{ for } i = 0, 1, \dots, 6 \\ b_i \leq 0 \text{ for } i = 7, 8 \\ \sigma_j^-, \sigma_j^+ \geq 0 \text{ for } j = 1, 2, \dots, T \end{cases}$$

where σ_j^- and σ_j^+ are the underestimation and overestimation errors for the year t , respectively, while $j=t-1998$ is the period of time compared to year t .

The parameters of unemployment and electricity price have negative correlation with electricity demand and are incorporated in the model with negative correlation coefficients.

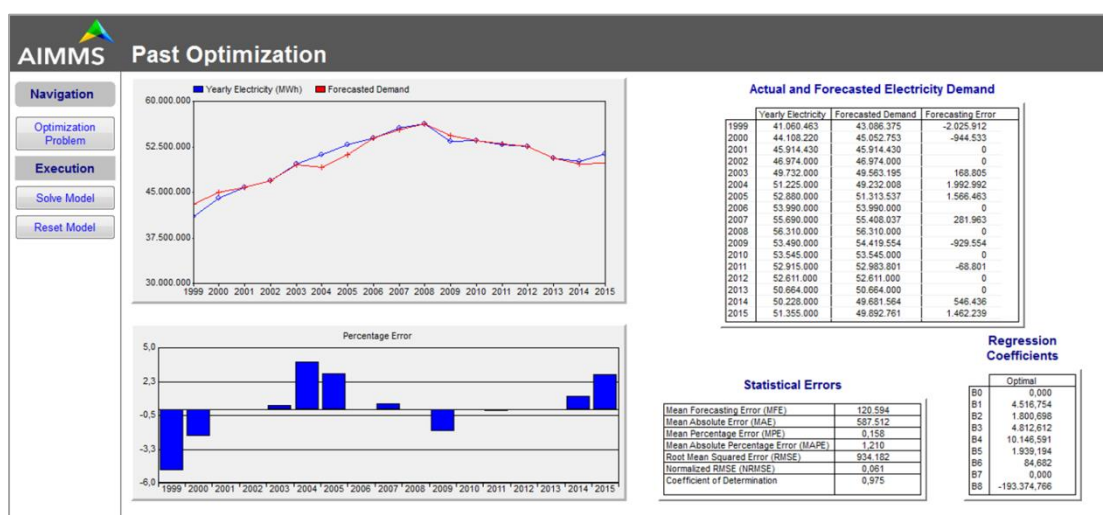
The factors of the forecast problem are presented below:

Factor	Symbol	Regression Coefficient
Constant	-	b_0
Natural Gas Price	X_{1t}	b_1
Light Fuel Oil Price	X_{2t}	b_2
Heating Degree Days	X_{3t}	b_3
Cooling Degree Days	X_{4t}	b_4
Population	X_{5t}	b_5
GDP at market prices	X_{6t}	b_6
Electricity Price	X_{7t}	b_7
Unemployment Rate	X_{8t}	b_8

Εικόνα 5.6: Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στην εικόνα 5.7 φαίνονται οι πληροφορίες που αφορούν την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για τα προηγούμενα έτη. Σε αυτήν υπάρχει ένα διάγραμμα της πραγματικής και της προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ένας πίνακας με τα στοιχεία της πραγματικής, της προβλεπόμενης ζήτησης και του σφάλματος πρόβλεψης, ένα διάγραμμα με το ποσοστιαίο σφάλμα, ένας πίνακας με τις τιμές των δεικτών σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ένας πίνακας με τους συντελεστές παλινδρόμησης του προβλήματος. Από τις τιμές των δεικτών βγαίνει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση πρόβλεψης της ζήτησης με 8 μεταβλητές. Χαρακτηριστικά παρουσιάζει μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ίσο με 1,21%. Επίσης, φαίνεται ότι ο σταθερός όρος b_0 είναι 0 και ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν επηρεάζει τη ζήτηση (έχει συντελεστή παλινδρόμησης ίσο με το 0).

Στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει μία εντολή για τη λύση του προβλήματος και μία για το μηδενισμό όλων των στοιχείων του.

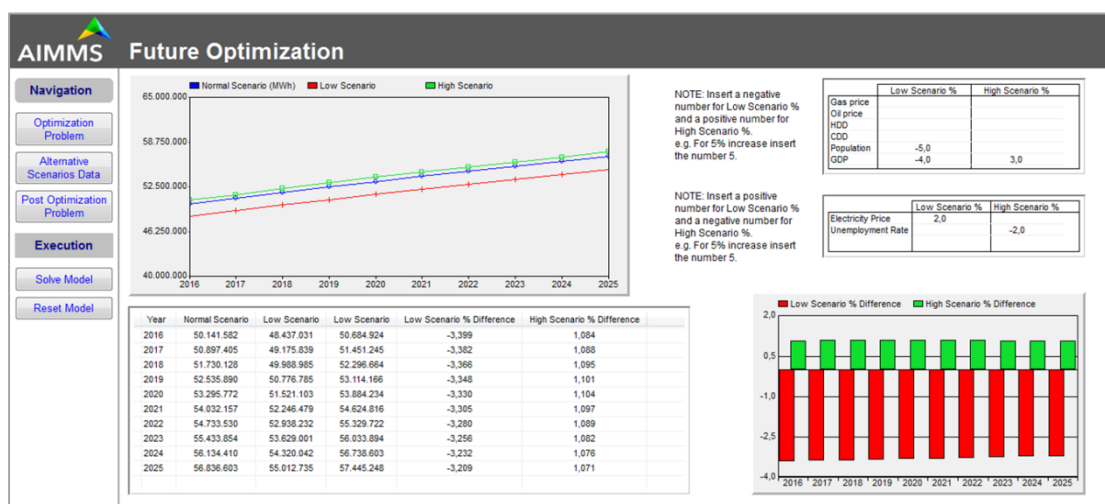


Εικόνα 5.7: Πρόβλεψη της παρελθοντικής ζήτησης

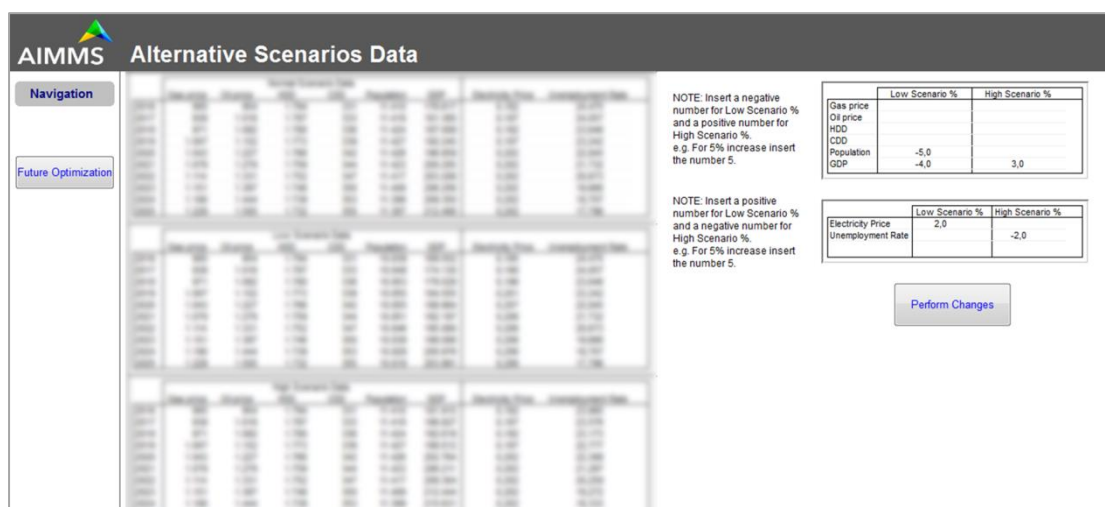
Στην εικόνα 5.8 φαίνονται οι πληροφορίες για τη μελλοντική πρόβλεψη της ζήτησης. Πραγματοποιούνται προβλέψεις με βάση 3 διαφορετικά σενάρια. Ένα σενάριο αναφοράς, ένα σενάριο χαμηλής ζήτησης και ένα σενάριο υψηλής ζήτησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που αναπαριστά τα τρία σενάρια και ένας πίνακας που δείχνει τις τιμές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα σενάρια καθώς και την ποσοστιαία % απόκλιση των σεναρίων χαμηλής και υψηλής ζήτησης από το σενάριο αναφοράς. Στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης μπορεί να επέμβει ο χρήστης επιλέγοντας την ποσοστιαία % μεταβολή της τιμής της κάθε μεταβλητής από την τιμή που έχει στο σενάριο αναφοράς. Για τις μεταβλητές που έχουν θετική επιρροή στη ζήτηση επιλέγεται αρνητική ποσοστιαία μεταβολή στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και θετική στο σενάριο υψηλής ζήτησης, ενώ για αυτές που

έχουν αρνητική επιρροή επιλέγεται θετική ποσοστιαία μεταβολή στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και αρνητική στο σενάριο υψηλής ζήτησης. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν δύο πίνακες στο δεξί μέρος της σελίδας. Επίσης, υπάρχει ένα διάγραμμα που δείχνει την ποσοστιαία διαφορά των δύο σεναρίων από το σενάριο αναφοράς. Στη συγκεκριμένη εκτέλεση, για το σενάριο χαμηλής ζήτησης επιλέχθηκε μείωση 5% στην τιμή του πληθυσμού, 4% για το ΑΕΠ και αύξηση 2% στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σενάριο υψηλής ζήτησης επιλέχθηκε ποσοστιαία αύξηση 3% στο ΑΕΠ και μείωση 2% στο ποσοστό ανεργίας.

Στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης, μία εντολή για μετάβαση στα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια και μία για μετάβαση στο πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Επιπλέον, όπως και στη σελίδα πρόβλεψης της παρελθοντικής ζήτησης, υπάρχει μία εντολή για τη λύση του προβλήματος και μία για το μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



Εικόνα 5.8: Πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης

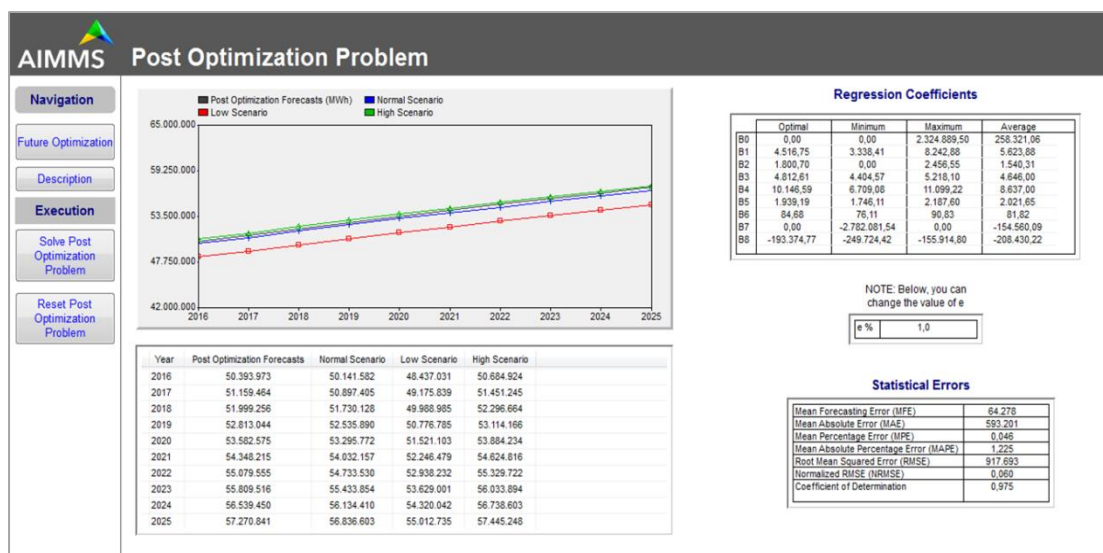


Εικόνα 5.9: Δεδομένα στα διάφορα σενάρια

Στην εικόνα 5.9 φαίνονται τα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια. Υπάρχουν 3 πίνακες οι οποίοι δείχνουν τις τιμές που παίρνουν οι διάφορες μεταβλητές στα 3 διαφορετικά σενάρια. Επίσης, υπάρχουν και εδώ δύο πίνακες στους οποίους ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την ποσοστιαία μεταβολή της τιμής της κάθε μεταβλητής από την τιμή που έχει στο σενάριο αναφοράς. Κάτω από αυτούς τους πίνακες υπάρχει η εντολή “Perform Changes”, με την οποία αλλάζουν οι τιμές των μεταβλητών στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης ανάλογα με τις τιμές που δίνει ο τελικός χρήστης. Τέλος, στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για επιστροφή στη σελίδα για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης.

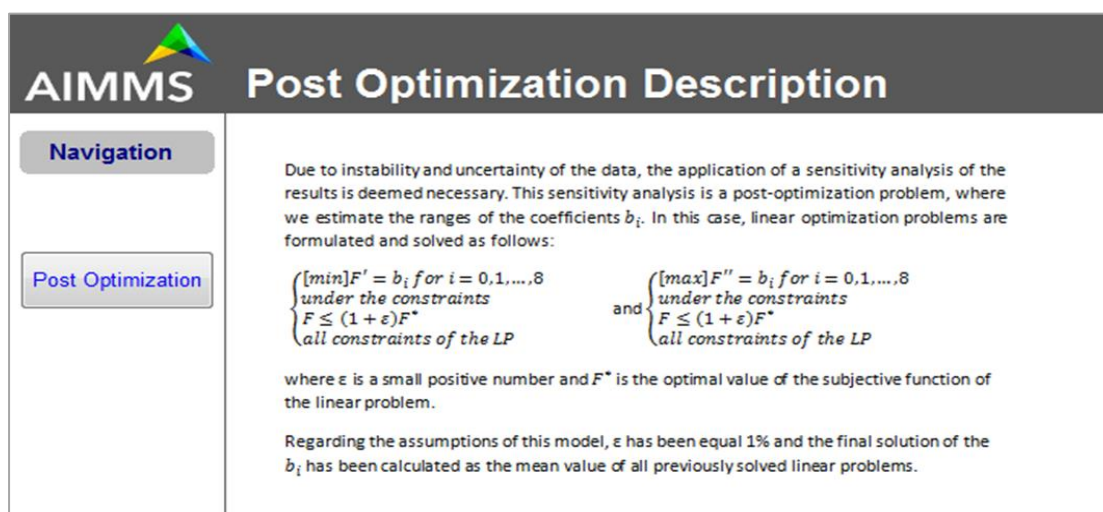
Στην εικόνα 5.10 φαίνεται το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Σε αυτό προβλέπεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το μέσο όρο των συντελεστών b_i . Η τιμή αυτή των b_i προκύπτει ως η μέση τιμή όλων των προβλημάτων μεταβελτιστοποίησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που δείχνει την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης με βάση τα τρία σενάρια και την πρόβλεψη με βάση το μέσο όρο των b_i καθώς και ένας πίνακας που δείχνει την τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις διάφορες περιπτώσεις. Επίσης, υπάρχει ένας πίνακας με τις τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης σε 4 διαφορετικές περιπτώσεις: την τιμή τους στο αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους καθώς και τη μέση τιμή τους από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπολογίστηκαν τα σφάλματα που δίνει το μοντέλο στην περίπτωση της πρόβλεψης με βάση το μέσο όρο των b_i και συγκεντρώθηκαν σε έναν πίνακα. Οι τιμές των δεικτών είναι ικανοποιητικές και το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η τιμή του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος είναι παραπλήσια με την τιμή που είχε ο δείκτης στο απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης (1,225%). Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή του ε (ποσοστό παραχώρησης σφαλμάτων).

Στην αριστερή στήλη υπάρχουν δύο κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στο πρόβλημα μελλοντικής βελτιστοποίησης και για μετάβαση στην περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Επίσης υπάρχει μία εντολή για τη λύση του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης και μία για το μηδενισμό των στοιχείων του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης.



Εικόνα 5.10: Το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης

Στην εικόνα 5.11 δίνεται μια περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Στην αριστερή στήλη υπάρχει μια εντολή για επιστροφή στα αποτελέσματα του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης.

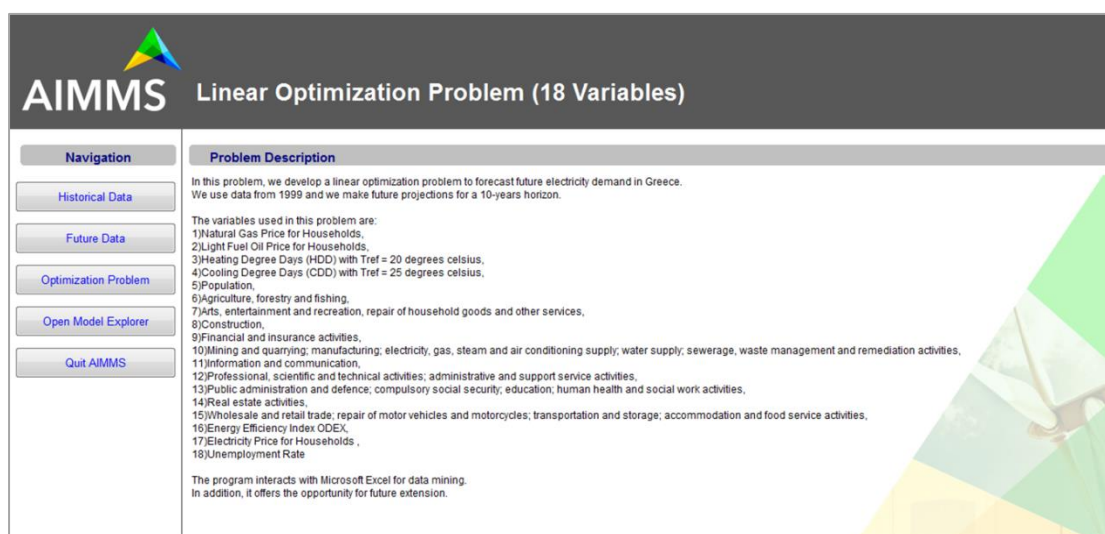


Εικόνα 5.11: Περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης

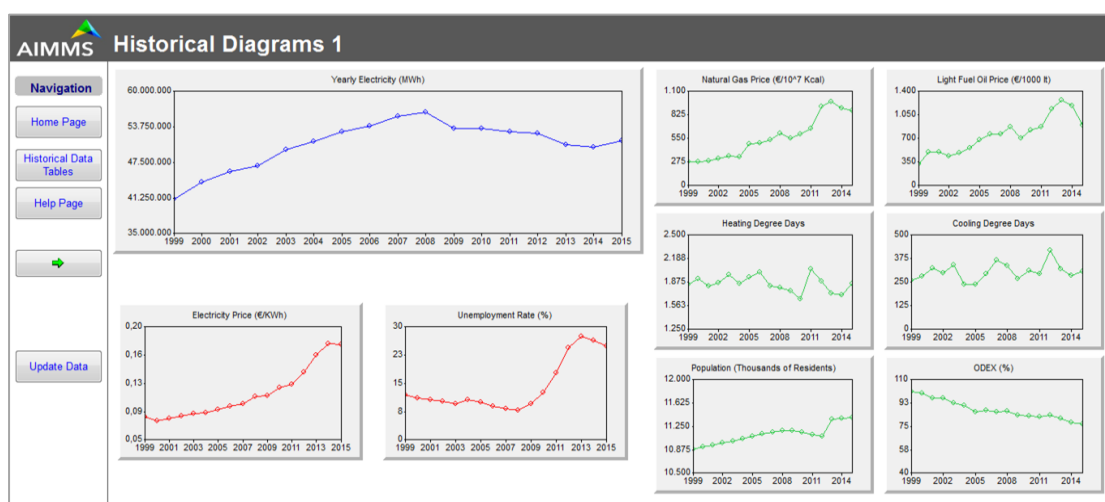
5.3.2 Γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών – 4^η έκδοση

Στην εικόνα 5.12 φαίνεται η αρχική σελίδα του προγράμματος. Στη σελίδα αυτή περιγράφεται η περίοδος συλλογής δεδομένων, ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης, οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται καθώς και κάποια άλλα features του προγράμματος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν 3 κουμπιά πλοήγησης στις άλλες σελίδες: ένα για μετάβαση στα ιστορικά δεδομένα, ένα για τα μελλοντικά δεδομένα των ανεξάρτητων μεταβλητών και ένα

για μετάβαση στις σελίδες πρόβλεψης. Επίσης, υπάρχει μία εντολή για να ανοίξει ο Model Explorer προκειμένου να μπορεί ο προγραμματιστής να επέμβει και να πραγματοποιήσει αλλαγές στο πρόγραμμα, καθώς και μία εντολή για έξοδο από αυτό.



Εικόνα 5.12: Η αρχική σελίδα του προγράμματος

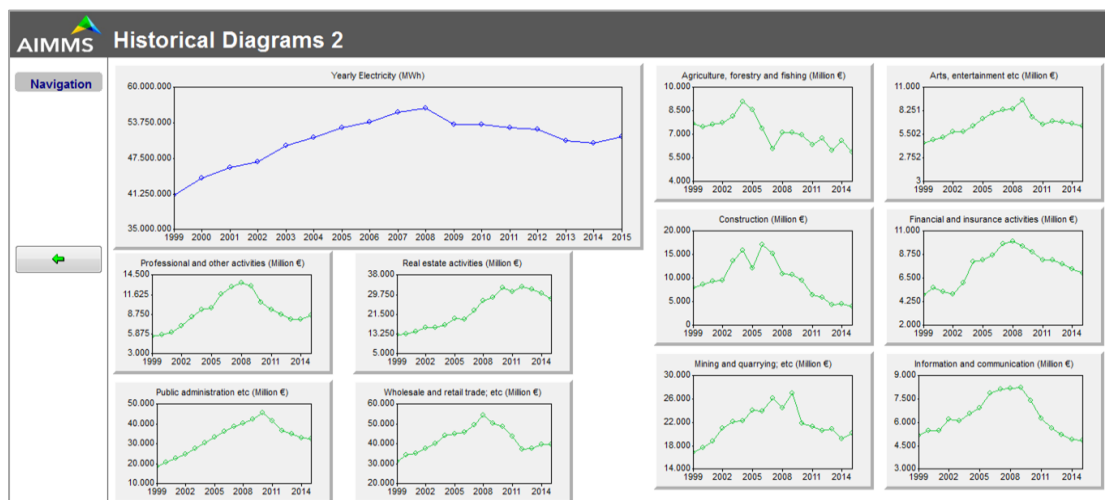


Εικόνα 5.13: Τα διαγράμματα ιστορικών δεδομένων (1)

Στην εικόνα 5.13 φαίνεται η πρώτη σελίδα με τα διαγράμματα των ιστορικών δεδομένων. Σε αυτήν υπάρχουν διαγράμματα με τα ιστορικά στοιχεία της ηλεκτρικής ενέργειας και των 8 από τις 18 ανεξάρτητων μεταβλητών. Τα υπόλοιπα διαγράμματα είναι στην επόμενη σελίδα. Η καμπύλη της ιστορικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αναπαρίσταται με μπλε χρώμα, οι μεταβλητές που έχουν θετική επιρροή στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πράσινο ενώ αυτές που έχουν αρνητική έχουν κόκκινο. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα, στους πίνακες με τα ιστορικά δεδομένα, σε μια βοηθητική σελίδα και μία εντολή για μετάβαση στη σελίδα με τα υπόλοιπα διαγράμματα

καθώς και μία εντολή με την οποία ανανεώνονται οι τιμές των μεταβλητών ανάλογα με τις τιμές που πληκτρολογεί ο χρήστης στο Excel.

Τα ιστορικά διαγράμματα των υπόλοιπων 10 μεταβλητών φαίνονται στην εικόνα 5.14. Στην αριστερή στήλη υπάρχει επιλογή για επιστροφή στη σελίδα της εικόνας 5.13.



Εικόνα 5.14: Τα διαγράμματα ιστορικών δεδομένων (2)

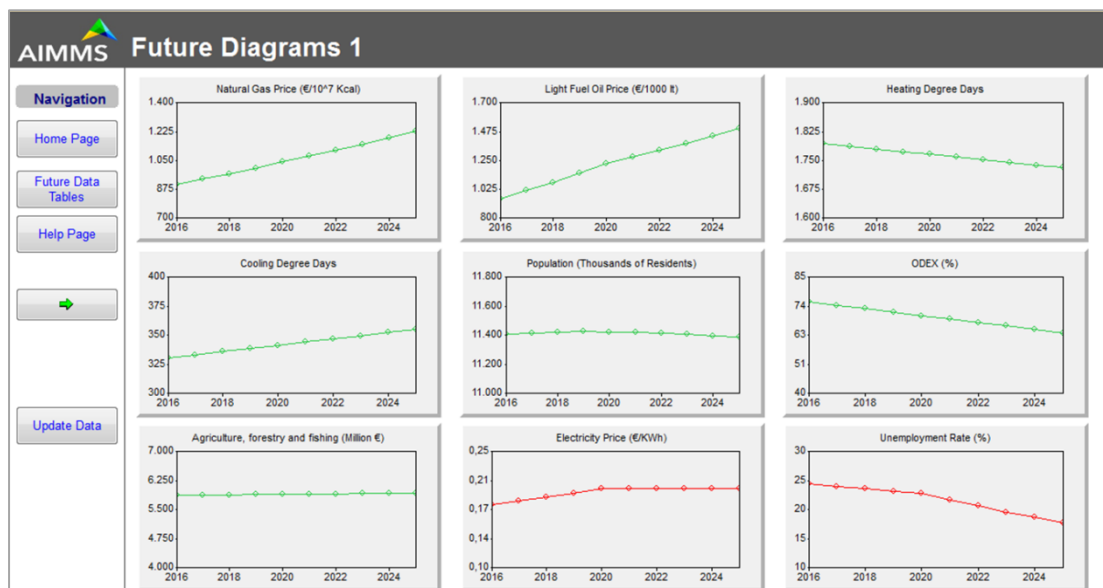
Στην εικόνα 5.15 υπάρχει ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα ιστορικά δεδομένα τους. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στα διαγράμματα και τους πίνακες ιστορικών δεδομένων.

	Measurement Unit	Sources
Constant	MWh	
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	EA (2007,2016)
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	EA (2007,2016)
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
Agriculture, forestry and fishing	Constant prices, million euros	ELSTAT
Arts, entertainment and recreation, repair of household goods and other services	Constant prices, million euros	ELSTAT
Construction	Constant prices, million euros	ELSTAT
Financial and insurance activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Mining and quarrying; manufacturing; electricity, gas, steam and air conditioning supply; water supply; sewerage, waste management and remediation activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Information and communication	Constant prices, million euros	ELSTAT
Professional, scientific and technical activities; administrative and support service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Public administration and defence; compulsory social security; education; human health and social work activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Real estate activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles; transportation and storage; accommodation and food service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
ODEX	%	ODYSEE-MURE
Electricity Price	Euros per kWh	EA, EUTOSTAT
Unemployment Rate	%	EUROSTAT

Εικόνα 5.15: Βοηθητική σελίδα για τα ιστορικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.16 φαίνεται η πρώτη σελίδα με τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων. Σε αυτήν υπάρχουν διαγράμματα με τα μελλοντικά στοιχεία για τις 9 από τις 18 ανεξάρτητες μεταβλητές. Τα υπόλοιπα διαγράμματα είναι στην επόμενη σελίδα. Ομοίως, οι μεταβλητές που έχουν θετική επιρροή στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα ενώ αυτές που έχουν αρνητική με κόκκινο. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα, στους πίνακες μελλοντικών στοιχείων, σε μια βοηθητική σελίδα και στη σελίδα με τα υπόλοιπα διαγράμματα καθώς και μία εντολή με την

οποία ανανεώνονται οι τιμές των μεταβλητών ανάλογα με τις τιμές που πληκτρολογεί ο χρήστης στο Excel.



Εικόνα 5.16: Τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων (1)

Στην εικόνα 5.17 φαίνεται η βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία. Σε αυτήν υπάρχει ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές τους που αφορούν τα μελλοντικά δεδομένα. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στους πίνακες και τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων.

The figure shows a software interface titled 'AIMMS Help Page (Future)'. It contains a table with the following columns: Variable Name, Measurement Unit, and Sources.

Variable Name	Measurement Unit	Sources
Constant	-	-
Natural Gas Price	MWh	EC (2014) Commission Staff Working Document
Light Fuel Oil Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	EC (2014) Commission Staff Working Document
Heating Degree Days	Euros per 1000 litres	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
Agriculture, forestry and fishing	Constant prices, million euros	ELSTAT
Arts, entertainment and recreation, repair of household goods and other services	Constant prices, million euros	ELSTAT
Construction	Constant prices, million euros	ELSTAT
Financial and insurance activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Mining and quarrying; manufacturing; electricity, gas, steam and air conditioning supply; water supply; sewerage, waste management and remediation activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Information and communication	Constant prices, million euros	ELSTAT
Professional, scientific and technical activities; administrative and support service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Public administration and defence; compulsory social security; education; human health and social work activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Real estate activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles; transportation and storage; accommodation and food service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
ODEX	%	ODYSSEUS-IRE
Electricity Price	Euros per kWh	EC Communication (2014)
Unemployment Rate	%	EC (2014)_The 2015 Ageing Report

Εικόνα 5.17: Βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.18 δίνεται μια περιγραφή του μοντέλου πρόβλεψης μαζί με έναν πίνακα με τους συντελεστές των μεταβλητών του προβλήματος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στην αρχική σελίδα του προγράμματος καθώς και στην πρόβλεψη της παρελθοντικής και μελλοντικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Optimization Problem

Navigation

Home Page

Past Optimization

Future Optimization

The basic linear optimization model assumes that electricity demand depends on the 18 parameters that have been presented. The regression formula of this model has the following form:

$$Y_t = b_0 + \sum_{i=1}^{18} b_i X_{it}$$

where Y_t is the electricity demand in year t , X_{it} is the price of parameter i in year t and b_i are the estimated regression coefficients (for $i=0,1,\dots,18$).

The existence of the constant term b_0 must be referred. This particular term indicates the minimum level of electricity demand for any period of time.

Based on the previous assumptions applied, this specific linear optimization model minimizes the sum of the errors' absolute values and is as follows:

$$[\min] F = \sum_{j=1}^T \sigma_j^+ + \sigma_j^-$$

under the following constraints

$$b_0 + \sum_{i=1}^{18} b_i X_{ij} + \sigma_j^+ - \sigma_j^- = Y_j, \text{ for } j = 1, 2, \dots, T$$

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 0, 1, \dots, 16$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = 17, 18$$

$$\sigma_j^+, \sigma_j^- \geq 0 \text{ for } j = 1, 2, \dots, T$$

where σ_j^- and σ_j^+ are the underestimation and overestimation errors for the year t , respectively, while $j=t-1998$ is the period of time compared to year t .

The parameters of unemployment and electricity price have negative correlation with electricity demand and are incorporated in the model with negative correlation coefficients.

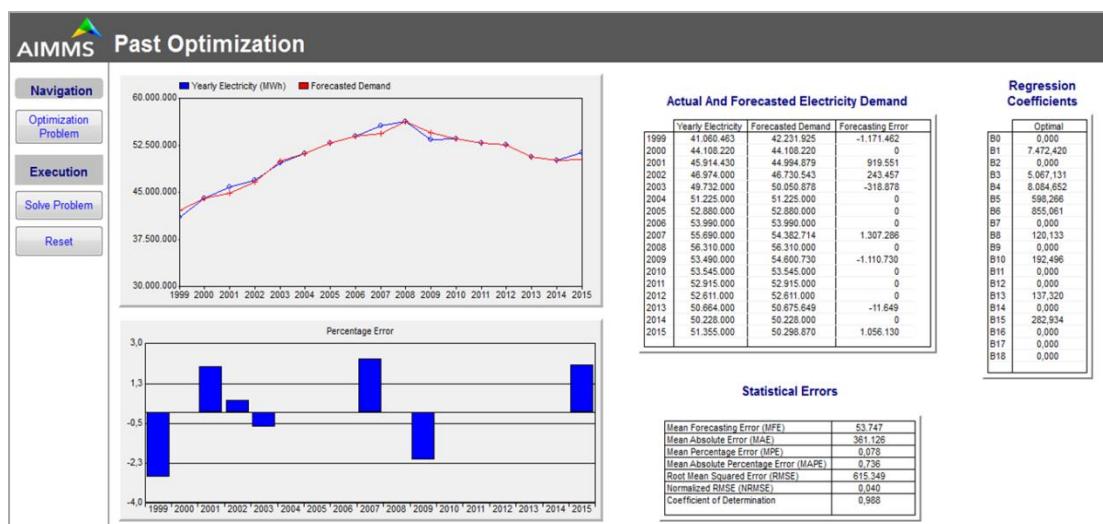
The factors of the forecast problem are presented below:

Factor	Symbol	Regression Coefficient
Constant	-	b_0
Natural Gas Price	X_{1T}	b_1
Light Fuel Oil Price	X_{2T}	b_2
Heating Degree Days	X_{3T}	b_3
Cooling Degree Days	X_{4T}	b_4
Population	X_{5T}	b_5
Agriculture, forestry and fishing	X_{6T}	b_6
Arts, entertainment and recreation, repair of household goods and other services	X_{7T}	b_7
Construction	X_{8T}	b_8
Financial and insurance activities	X_{9T}	b_9
Mining and quarrying; manufacturing; electricity, gas, steam and air conditioning supply; water supply; sewerage, waste management and remediation activities	X_{10T}	b_{10}
Information and communication	X_{11T}	b_{11}
Professional, scientific and technical activities; administrative and support service activities	X_{12T}	b_{12}
Public administration and defence; compulsory social security; education; human health and social work activities	X_{13T}	b_{13}
Real estate activities	X_{14T}	b_{14}
Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles; transportation and storage; accommodation and food service activities	X_{15T}	b_{15}
ODEX	X_{16T}	b_{16}
Electricity Price	X_{17T}	b_{17}
Unemployment Rate	X_{18T}	b_{18}

Εικόνα 5.18: Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στην εικόνα 5.19 δίνονται οι πληροφορίες που αφορούν την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για τα προηγούμενα έτη. Σε αυτήν υπάρχει ένα διάγραμμα με την πραγματική και την προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ένας πίνακας με τα στοιχεία της πραγματικής, της προβλεπόμενης ζήτησης και του σφάλματος πρόβλεψης, ένα διάγραμμα με το ποσοστιαίο σφάλμα, ένας πίνακας με τους δείκτες σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ένας πίνακας με τους συντελεστές παλινδρόμησης του προβλήματος. Από τις τιμές των δεικτών βγαίνει το συμπέρασμα ότι το γραμμικό μοντέλο διαφορών με τις 18 μεταβλητές δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρουσιάζει πολύ μικρό μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (0,0736%) και ικανοποιητικό συντελεστή r^2 (0,988). Επίσης, φαίνεται ότι ο σταθερός όρος b_0 είναι 0 και ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό ανεργίας δεν επηρεάζουν τη ζήτηση, αφού αμφότερα έχουν συντελεστή παλινδρόμησης ίσο με το 0.

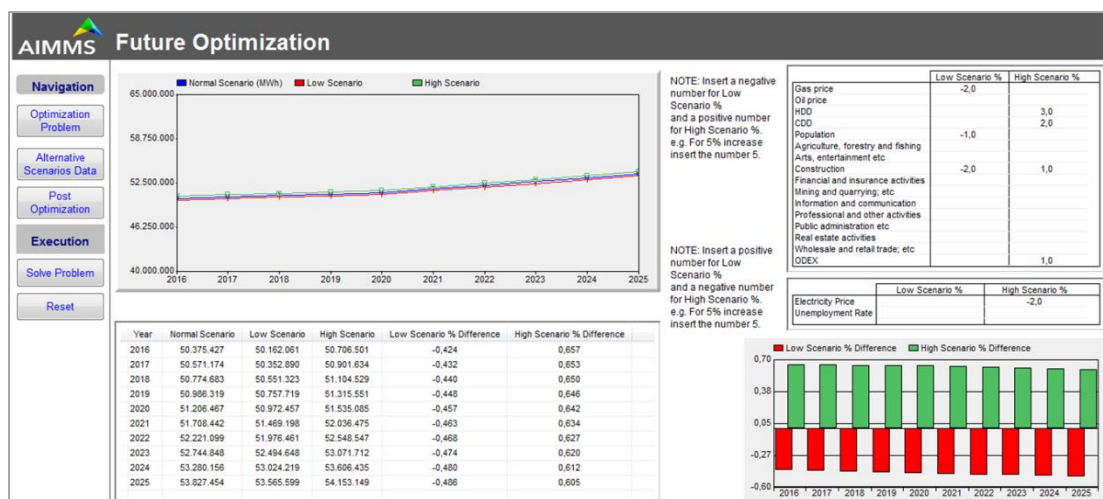
Στην αριστερή στήλη υπάρχει εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει μια εντολή για την εκτέλεση του προβλήματος και μία για το μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



Εικόνα 5.19: Πρόβλεψη της παρελθοντικής ζήτησης

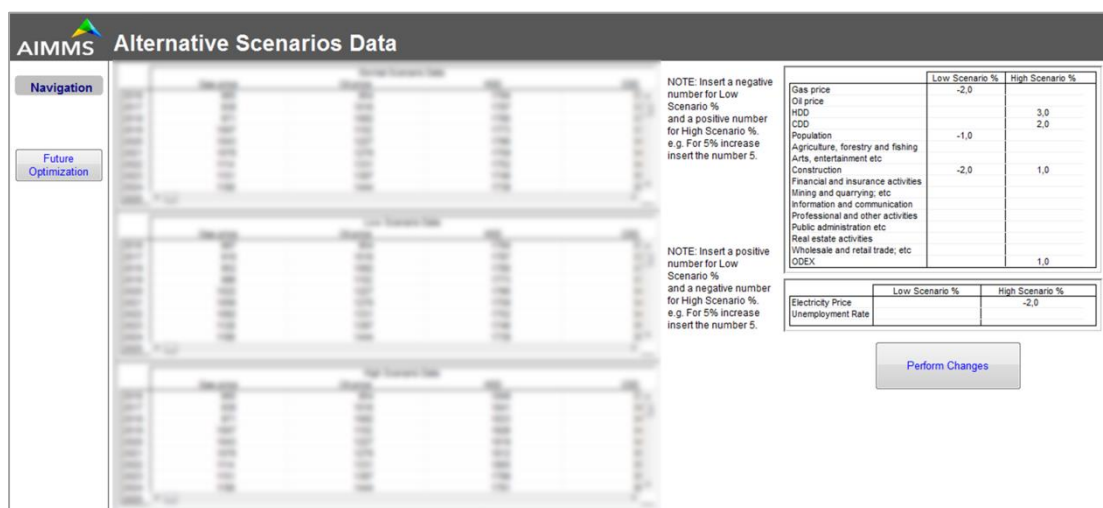
Στην εικόνα 5.20 φαίνονται οι πληροφορίες για τη μελλοντική πρόβλεψη της ζήτησης. Πραγματοποιούνται προβλέψεις με βάση 3 διαφορετικά σενάρια. Ένα σενάριο αναφοράς, ένα σενάριο χαμηλής ζήτησης και ένα σενάριο υψηλής ζήτησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που αναπαριστά τα τρία σενάρια και ένας πίνακας που δείχνει τις τιμές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα σενάρια καθώς και την ποσοστιαία % απόκλιση των σεναρίων χαμηλής και υψηλής ζήτησης από το σενάριο αναφοράς. Δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης αλλάζοντας την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής θέλει. Για τις μεταβλητές που επιδρούν θετικά στη ζήτηση επιλέγεται αρνητική ποσοστιαία μεταβολή στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και θετική στο σενάριο υψηλής ζήτησης, ενώ για αυτές που επιδρούν αρνητικά επιλέγεται θετική ποσοστιαία μεταβολή στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και αρνητική στο σενάριο υψηλής ζήτησης. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν δύο πίνακες στο δεξί μέρος της σελίδας. Σε αυτούς μπορεί να επιλέξει κάποια ποσοστιαία μεταβολή οποιασδήποτε μεταβλητής από την τιμή που έχει στο σενάριο αναφοράς. Επίσης, υπάρχει ένα διάγραμμα που δείχνει την ποσοστιαία απόκλιση των δύο σεναρίων από το σενάριο αναφοράς. Στη συγκεκριμένη εκτέλεση για το σενάριο χαμηλής ζήτησης επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές: μείωση 2% στην τιμή του φυσικού αερίου, μείωση 1% στον πληθυσμό και 2% στις κατασκευές. Για το σενάριο υψηλής ζήτησης επιλέχθηκαν τα παρακάτω: αύξηση 3% στις βαθμομημέρες θέρμανσης, 2% στις βαθμομημέρες ψύξης, αύξηση 1% στις κατασκευές και στο δείκτη ODEX και μείωση 2% στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης, μία εντολή για μετάβαση στα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια και μία για μετάβαση στο πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει ένα κουμπί για την εκτέλεση του προβλήματος και ένα για το μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



Εικόνα 5.20: Πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης

Στην εικόνα 5.21 φαίνονται τα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια. Υπάρχουν 3 πίνακες οι οποίοι δείχνουν τις τιμές που παίρνουν οι διάφορες μεταβλητές στα 3 διαφορετικά σενάρια. Επίσης, υπάρχουν και εδώ οι δύο πίνακες που υπήρχαν στη σελίδα πρόβλεψης της μελλοντικής ζήτησης και δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής θέλει. Με την εντολή “Perform Changes” αλλάζουν οι τιμές των μεταβλητών στους πίνακες με τα δεδομένα στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης ανάλογα με τα ποσοστά που δίνει ο τελικός χρήστης. Τέλος, στην αριστερή στήλη υπάρχει ένα κουμπί για μετάβαση στη σελίδα για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης

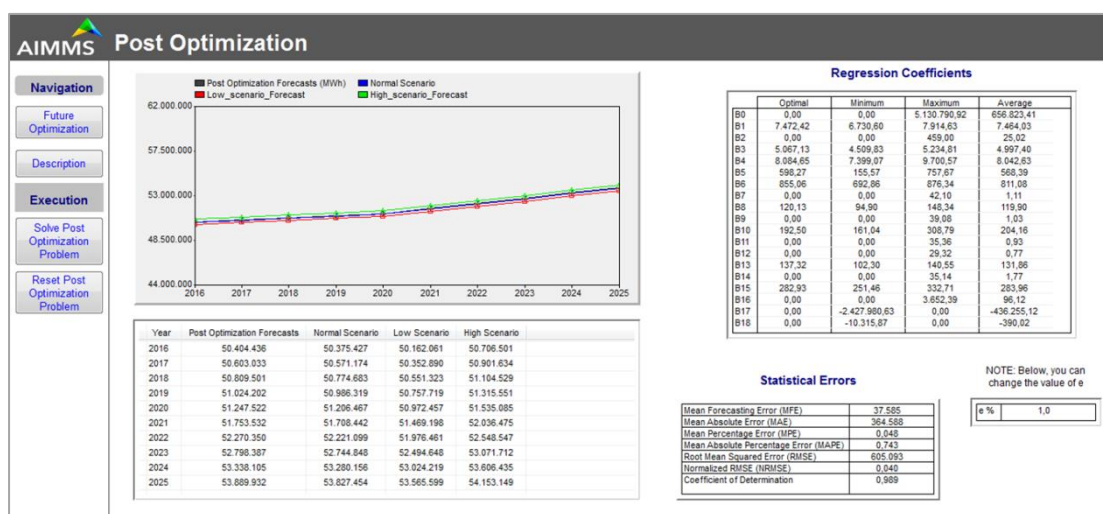


Εικόνα 5.21: Δεδομένα στα διάφορα σενάρια

Στην εικόνα 5.22 φαίνονται τα αποτελέσματα του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Σε αυτό προβλέπεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το μέσο όρο των συντελεστών b_i . Η τιμή αυτή των b_i προκύπτει ως η μέση τιμή των τιμών των b_i από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που δείχνει την πρόβλεψη με

βάση τα τρία σενάρια και την πρόβλεψη με βάση το μέσο των b_i και ένας πίνακας που δείχνει την τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις διάφορες περιπτώσεις. Επίσης, υπάρχει ένας πίνακας με τις τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης σε 4 διαφορετικές περιπτώσεις: την τιμή τους στο αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους καθώς και τη μέση τιμή των b_i από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει ένας πίνακας με τα σφάλματα που δίνει το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Οι τιμές των δεικτών είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές του απλού προβλήματος βελτιστοποίησης και αποδεικνύουν ότι το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η τιμή του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος είναι ιδιαίτερα χαμηλή (0,743%) και ο συντελεστής προσδιορισμού είναι ικανοποιητικός (0,989). Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή του ϵ (ποσοστό παραχώρησης σφαλμάτων).

Στην αριστερή στήλη υπάρχουν δύο κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στο πρόβλημα μελλοντικής βελτιστοποίησης και για μετάβαση στην περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Επίσης υπάρχει μία εντολή για τη λύση του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης και μία για το μηδενισμό των στοιχείων του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης.

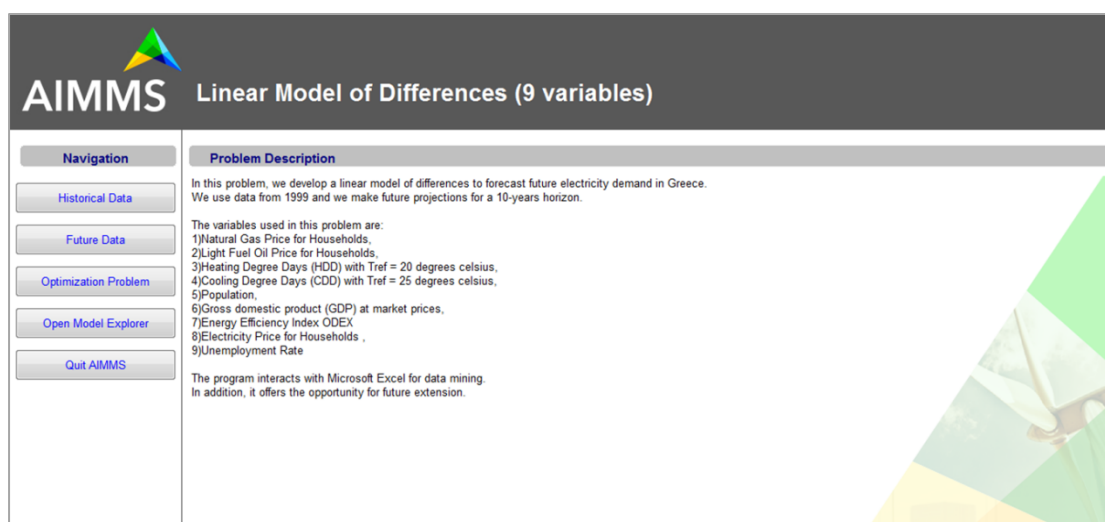


Εικόνα 5.22: Το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης

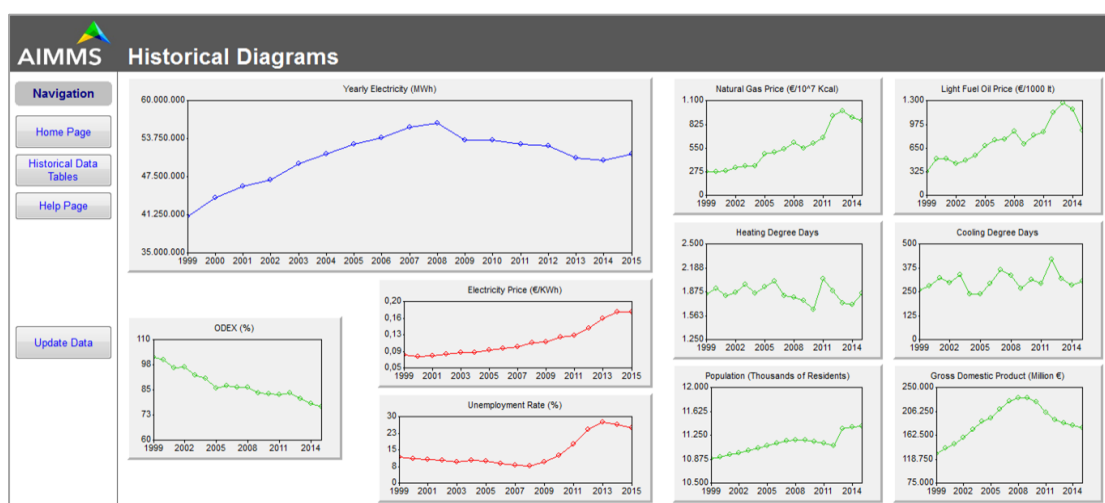
5.4 Γραμμικό μοντέλο διαφορών

5.4.1 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 2^η έκδοση

Στην εικόνα 5.23 φαίνεται η αρχική σελίδα του προγράμματος. Στη σελίδα αυτή αναφέρονται οι βασικές πληροφορίες του προβλήματος, οι οποίες είναι η χρονική περίοδος συλλογής δεδομένων, ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης, οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται καθώς και κάποια άλλα features του προγράμματος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά για πλοήγηση στις άλλες σελίδες, μία εντολή για να ανοίξει ο Model Explorer προκειμένου να μπορεί ο προγραμματιστής να επέμβει και να πραγματοποιήσει αλλαγές στο πρόγραμμα καθώς και μία εντολή για τον τερματισμό του προγράμματος.



Εικόνα 5.23: Η αρχική σελίδα του προγράμματος



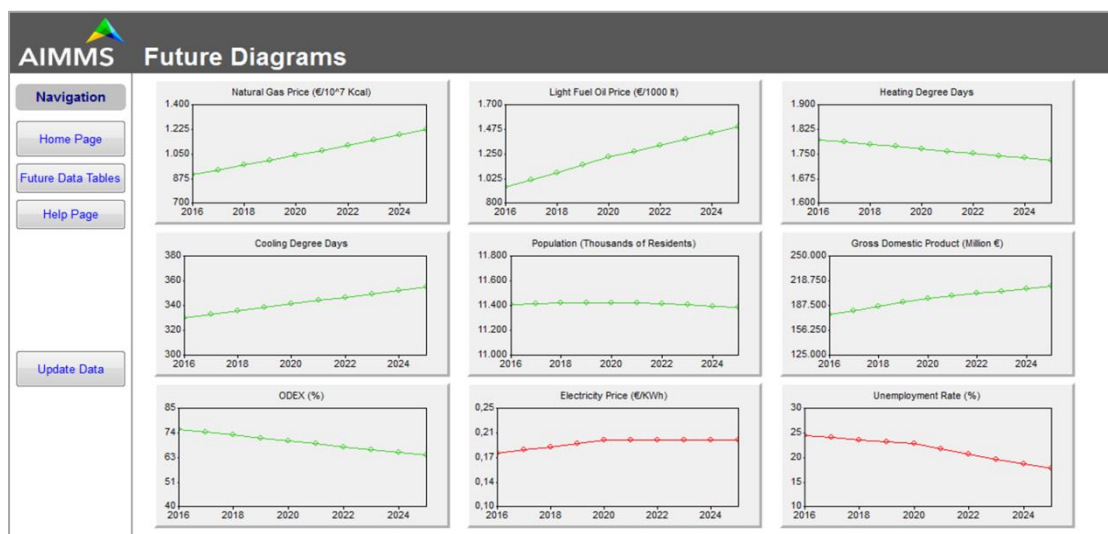
Εικόνα 5.24: Τα ιστορικά διαγράμματα

Στην εικόνα 5.24 αναπαρίστανται οι καμπύλες των ιστορικών δεδομένων. Η καμπύλη της ιστορικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αναπαρίσταται με μπλε χρώμα, οι καμπύλες των μεταβλητών που επηρεάζουν θετικά τη ζήτηση με πράσινο και οι μεταβλητές που έχουν αρνητική επιρροή με κόκκινο. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν τρία κουμπιά πλοήγησης: ένα για επιστροφή στην αρχική σελίδα, ένα για μετάβαση στους πίνακες με τα ιστορικά δεδομένα και ένα για μετάβαση σε μία βοηθητική σελίδα στην οποία δίνονται πληροφορίες για τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται. Επίσης, υπάρχει ένα κουμπί πλοήγησης με το οποίο ενημερώνονται τα δεδομένα του προγράμματος ανάλογα με τις τιμές που εισάγει ο χρήστης στο Excel.

Η βοηθητική σελίδα φαίνεται στην εικόνα 5.25. Σε αυτήν παρέχεται ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές άντλησης των ιστορικών στοιχείων τους. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στα διαγράμματα και τους πίνακες ιστορικών δεδομένων.

	Measurement Unit	Sources
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	IEA (2007,2016)
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	IEA (2007,2016)
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
GDP at market prices	Constant prices, million euro	ELSTAT
ODEX	%	ODYSEE-MURE
Electricity Price	Euros per kWh	IEA, EUROSTAT
Unemployment Rate	%	EUROSTAT

Εικόνα 5.25: Βοηθητική σελίδα για τα ιστορικά στοιχεία



Εικόνα 5.26: Τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων

Στην εικόνα 5.26 φαίνονται τα διαγράμματα με τα μελλοντικά στοιχεία των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα, στους πίνακες με τα μελλοντικά στοιχεία και σε μια βοηθητική σελίδα.

Στην εικόνα 5.27 φαίνεται η βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία. Σε αυτήν υπάρχει ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές τους. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στους πίνακες και τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων.

The screenshot shows the 'AIMMS Help Page (Future)' interface. On the left, there is a 'Navigation' sidebar with buttons for 'Future Data Tables' and 'Future Diagrams'. The main content area features a table with the following data:

	Measurement Unit	Sources
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	EC (2014) Commission Staff Working Document
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	EC (2014) Commission Staff Working Document
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
GDP at market prices	Constant prices, million euro	IPTO (2016) DPA 2017-2026
ODEX	%	ODYSEE-MURE
Electricity Price	Euros per kWh	EC Communication (2014)
Unemployment Rate	%	EC (2014)_The 2015 Ageing Report

Εικόνα 5.27: Βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.28 δίνεται η περιγραφή του γραμμικού μοντέλου διαφορών καθώς και ο πίνακας με τους συντελεστές των μεταβλητών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε αυτό το μοντέλο απουσιάζει ο σταθερός όρος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα του προγράμματος καθώς και στις σελίδες πρόβλεψης της παρελθοντικής και μελλοντικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

The screenshot shows the 'AIMMS Optimization Problem' page. It contains a navigation sidebar, a text description of the linear model, a regression formula, and a table of factors and regression coefficients.

The regression formula is given as:

$$\Delta Y_t = \sum_{i=1}^9 b_i \Delta X_{it}$$

where ΔY_t is the annual % change of electricity demand in year t , ΔX_{it} is the annual % change of parameter i in year t and b_i are the estimated regression coefficients (for $i=1,2,\dots,9$).

Based on the previous assumptions applied, this specific linear optimization model minimizes the sum of the errors' absolute values and is as follows:

$$[\min] F = \sum_{j=1}^T \sigma_j^+ + \sigma_j^-$$

under the following constraints

$$\sum_{i=1}^9 b_i \Delta X_{ij} + \sigma_j^- - \sigma_j^+ = \Delta Y_j, \text{ for } j = 1, 2, \dots, T$$

$$b_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, 7$$

$$b_i \leq 0 \text{ for } i = 8, 9$$

$$\sigma_j^-, \sigma_j^+ \geq 0 \text{ for } j = 1, 2, \dots, T$$

where σ_j^- and σ_j^+ are the underestimation and overestimation errors for the year t , respectively, while $j=t-1999$ is the period of time compared to year t .

The factors of the forecast problem are presented below:

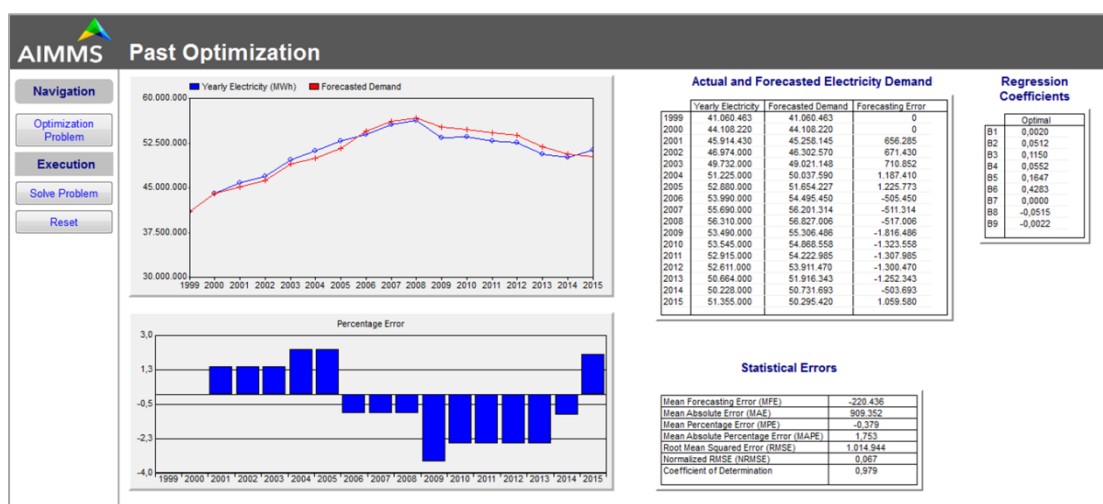
Factor	Symbol	Regression Coefficient
Natural Gas Price	ΔX_{1t}	b_1
Light Fuel Oil Price	ΔX_{2t}	b_2
Heating Degree Days	ΔX_{3t}	b_3
Cooling Degree Days	ΔX_{4t}	b_4
Population	ΔX_{5t}	b_5
GDP at market prices	ΔX_{6t}	b_6
ODEX	ΔX_{7t}	b_7
Electricity Price	ΔX_{8t}	b_8
Unemployment Rate	ΔX_{9t}	b_9

Εικόνα 5.28: Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στην εικόνα 5.29 φαίνονται τα αποτελέσματα της πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για τα προηγούμενα έτη. Σε αυτήν υπάρχει ένα διάγραμμα με τις καμπύλες της πραγματικής και της προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ένας πίνακας με τα στοιχεία της πραγματικής, της προβλεπόμενης ζήτησης και του σφάλματος πρόβλεψης, ένα διάγραμμα με το ποσοστιαίο σφάλμα, ένας πίνακας με τους δείκτες σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ένας πίνακας με τους συντελεστές παλινδρόμησης του προβλήματος. Οι συντελεστές των μεταβλητών του μοντέλου πρόβλεψης δηλώνουν την ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση ετήσιας μεταβολής κάθε παράγοντα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αναφέρονται στα απόλυτα μεγέθη της εξαρτημένης μεταβλητής, παρόλο που το γραμμικό μοντέλο διαφορών προβλέπει την % ετήσια μεταβολή της μεταβλητής αυτής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προκύπτουν μετά από μία πρόσθετη φάση μετατροπής των ποσοστιαίων μεταβολών σε απόλυτες τιμές.

Από τις τιμές των στατιστικών δεικτών σφαλμάτων βγαίνει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο διαφορών με τις 9 μεταβλητές δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα είναι λίγο μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως (1,753%), ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 υπολογίζεται στο 97,9%. Επίσης, φαίνεται ότι ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης ODEX δεν επηρεάζει τη ζήτηση αφού έχει μηδενικό συντελεστή παλινδρόμησης.

Στην αριστερή στήλη υπάρχει εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει μία εντολή για την εκτέλεση του προβλήματος και μία που προχωράει σε μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



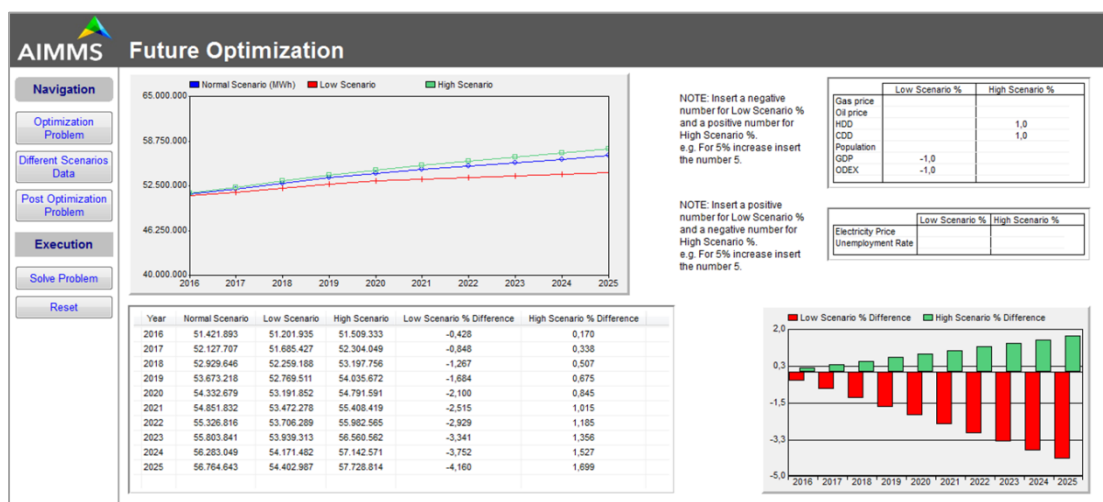
Εικόνα 5.29: Πρόβλεψη της παρελθοντικής ζήτησης

Στην εικόνα 5.30 φαίνονται τα αποτελέσματα της μελλοντικής πρόβλεψης της ζήτησης. Πραγματοποιείται πρόβλεψη με βάση 3 διαφορετικά σενάρια. Ένα σενάριο αναφοράς, ένα

σενάριο χαμηλής ζήτησης και ένα σενάριο υψηλής ζήτησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που αναπαριστά τα τρία σενάρια και ένας πίνακας που δείχνει τις τιμές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα σενάρια καθώς και την ποσοστιαία % απόκλιση των σεναρίων χαμηλής και υψηλής ζήτησης από το σενάριο αναφοράς. Στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης μπορεί να επέμβει ο χρήστης αλλάζοντας το ρυθμό μεταβολής της κάθε μεταβλητής από αυτόν που έχει στο σενάριο αναφοράς. Για τις μεταβλητές που έχουν θετική επιρροή στη ζήτηση επιλέγεται μείωση του ρυθμού μεταβολής στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και αύξηση στο σενάριο υψηλής ζήτησης, ενώ για αυτές που έχουν αρνητική επιρροή επιλέγεται αύξηση του ρυθμού μεταβολής στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και μείωση στο σενάριο υψηλής ζήτησης. Στο δεξί μέρος της σελίδας υπάρχουν οι πίνακες στους οποίους δηλώνονται αυτές οι μεταβολές και ένα διάγραμμα που δείχνει την ποσοστιαία διαφορά των δύο σεναρίων από το σενάριο αναφοράς. Και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται στα απόλυτα μεγέθη της εξαρτημένης μεταβλητής και όχι στην % ετήσια μεταβολή της.

Στη συγκεκριμένη εκτέλεση, για το σενάριο χαμηλής ζήτησης επιλέχθηκε μείωση 1% στο ρυθμό μεταβολής του ΑΕΠ και του δείκτη ODEX ενώ για το σενάριο υψηλής ζήτησης επιλέχθηκε αύξηση 1% στο ρυθμό μεταβολής των βαθμομερών θέρμανσης και ψύξης.

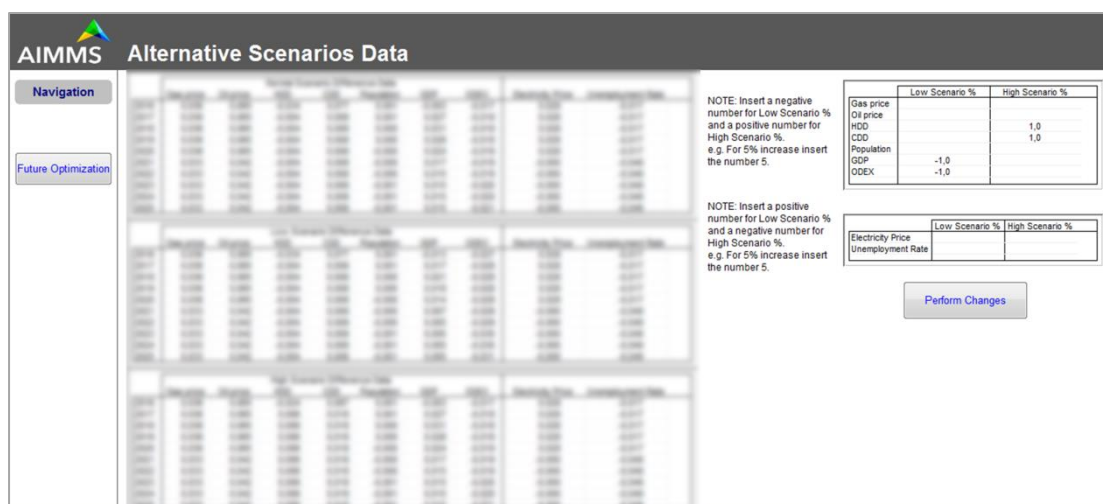
Στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης, μία εντολή για μετάβαση στα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια και μία για μετάβαση στο πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Επιπλέον, όπως και στη σελίδα πρόβλεψης της παρελθοντικής ζήτησης, υπάρχει μια εντολή για την εκτέλεση του προβλήματος και μία για το μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



Εικόνα 5.30: Πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης

Στην εικόνα 5.31 φαίνονται τα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια. Υπάρχουν 3 πίνακες οι οποίοι δείχνουν τις τιμές που παίρνουν οι διάφορες μεταβλητές στα 3 διαφορετικά

σενάρια. Στους πίνακες αυτούς τα στοιχεία δεν αφορούν τις απόλυτες τιμές αλλά τις ετήσιες ποσοστιαίες μεταβολές κάθε μεταβλητής. Επίσης, υπάρχουν και εδώ οι δύο πίνακες που υπήρχαν στη σελίδα πρόβλεψης της μελλοντικής ζήτησης και δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει στο ρυθμό μεταβολής οποιασδήποτε μεταβλητής θέλει. Με την εντολή “Perform Changes” αλλάζουν οι τιμές των μεταβλητών στους πίνακες με τα δεδομένα στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης ανάλογα με τις τιμές που δίνει ο χρήστης. Τέλος στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για μετάβαση στη σελίδα για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης

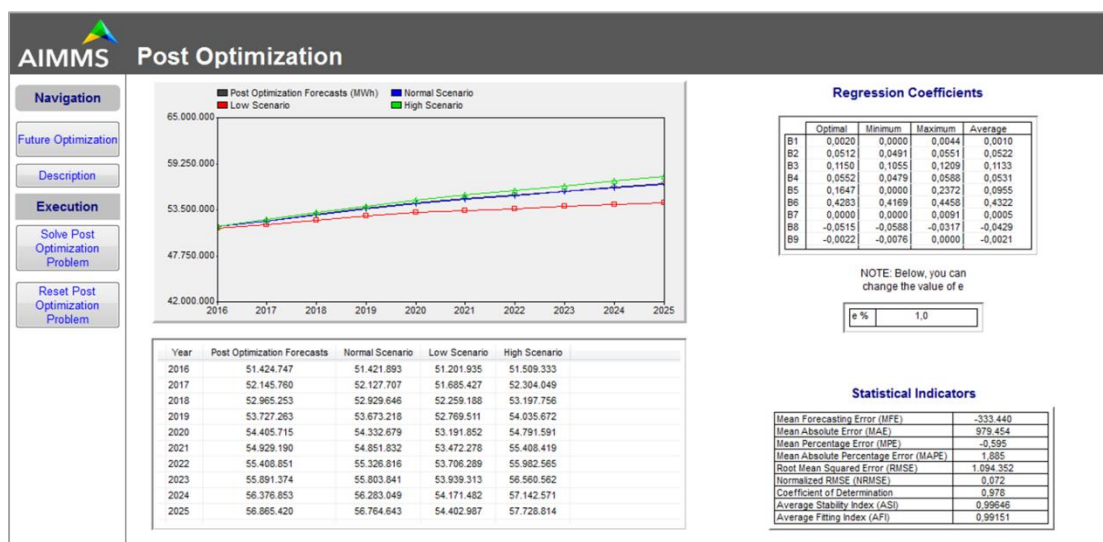


Εικόνα 5.31: Δεδομένα στα διάφορα σενάρια

Στην εικόνα 5.32 φαίνονται τα αποτελέσματα του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης σε απόλυτες τιμές. Σε αυτό προβλέπεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το μέσο όρο των συντελεστών b_i . Η τιμή αυτή των b_i προκύπτει ως η μέση τιμή των τιμών των b_i από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που δείχνει την πρόβλεψη με βάση τα τρία σενάρια και την πρόβλεψη με βάση το μέσο των b_i και ένας πίνακας που δείχνει την τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις διάφορες περιπτώσεις. Επίσης, υπάρχει ένας πίνακας με τις τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης σε 4 διαφορετικές περιπτώσεις: την τιμή τους στο αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους καθώς και τη μέση τιμή των b_i από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Οι συντελεστές b_i δηλώνουν την ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση ετήσιας μεταβολής κάθε παράγοντα. Επιπλέον, υπάρχει ένας πίνακας με τους δείκτες σφαλμάτων του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Οι τιμές των δεικτών είναι λίγο υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές του απλού προβλήματος βελτιστοποίησης, γεγονός που σημαίνει ότι το απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης δίνει πιο ακριβείς προβλέψεις. Χαρακτηριστικά, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα έχει τιμή 1,89% έναντι 1,75% που είχε στο απλό πρόβλημα

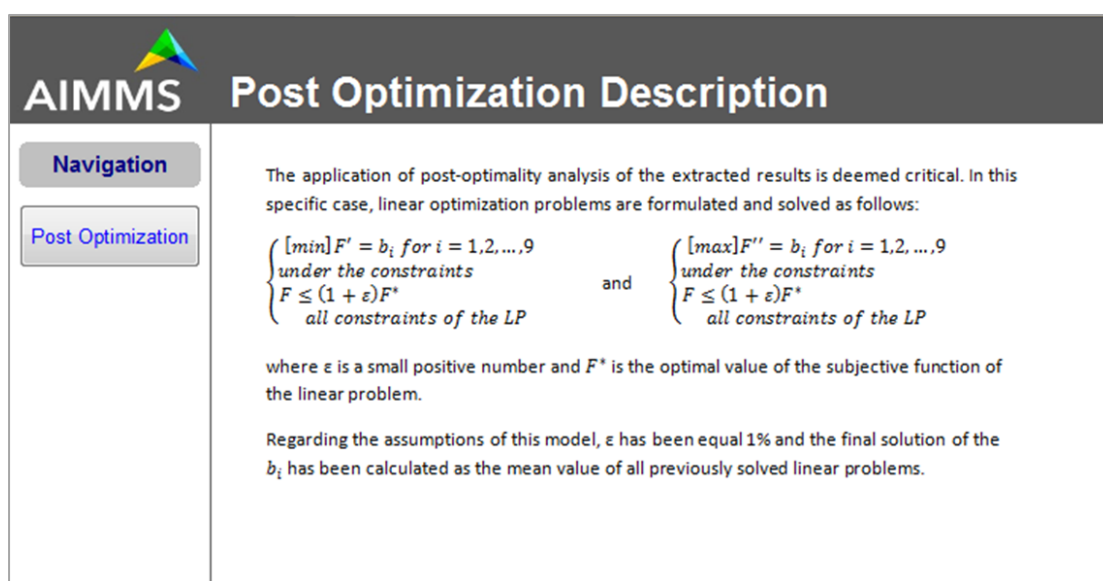
βελτιστοποίησης. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή του ϵ (ποσοστό παραχώρησης σφαλμάτων).

Στην αριστερή στήλη υπάρχουν δύο κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στο πρόβλημα μελλοντικής βελτιστοποίησης και για μετάβαση στην περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Επίσης υπάρχει ένα κουμπί για τη λύση του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης και ένα για το μηδενισμό των στοιχείων μόνο του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης.



Εικόνα 5.32: Το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης

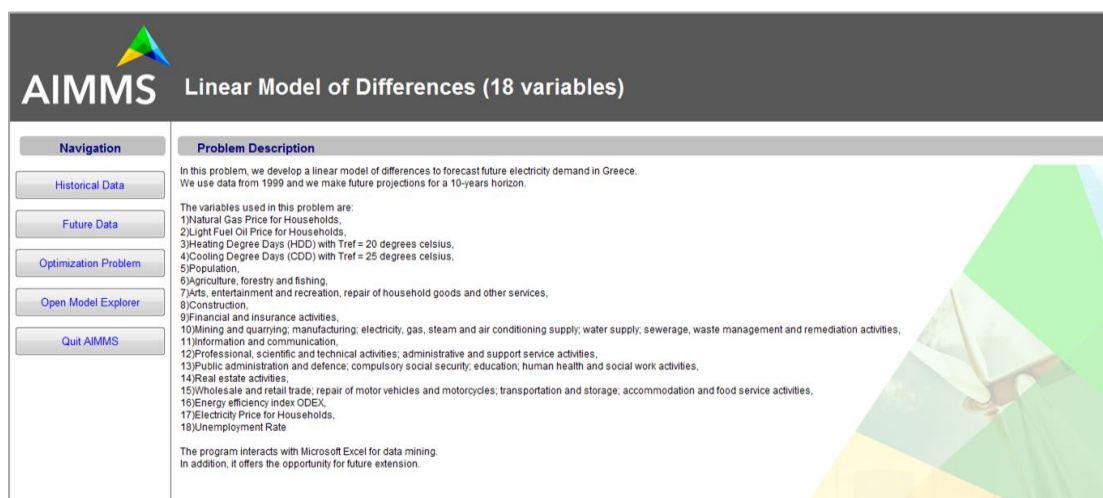
Στην εικόνα 5.33 δίνεται η περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης και οι εξισώσεις που το περιγράφουν. Στην αριστερή στήλη υπάρχει μια εντολή για επιστροφή στα αποτελέσματα του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης.



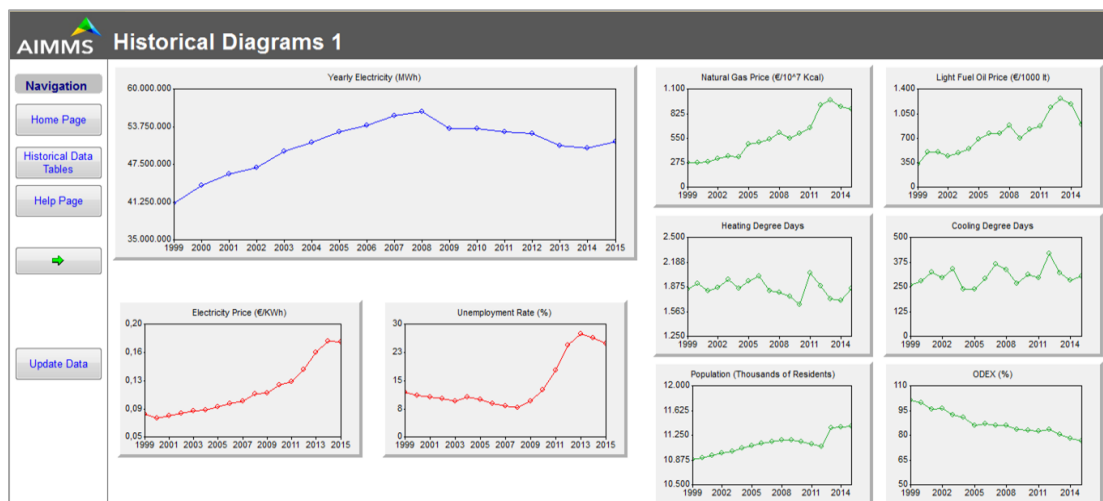
Εικόνα 5.33: Περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης

5.4.2 Γραμμικό μοντέλο διαφορών – 4^η έκδοση

Στην εικόνα 5.34 φαίνεται η αρχική σελίδα του προγράμματος. Στη σελίδα αυτή αναφέρονται οι βασικές πληροφορίες του προβλήματος. Αναφέρεται ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης, οι 18 ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται καθώς και κάποια άλλα features του προγράμματος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης στις υπόλοιπες σελίδες, μία εντολή για να ανοίξει ο Model Explorer προκειμένου να μπορεί ο προγραμματιστής να επέμβει και να πραγματοποιήσει αλλαγές στο πρόγραμμα, καθώς και μία εντολή για έξοδο από αυτό.



Εικόνα 5.34: Η αρχική σελίδα του προγράμματος

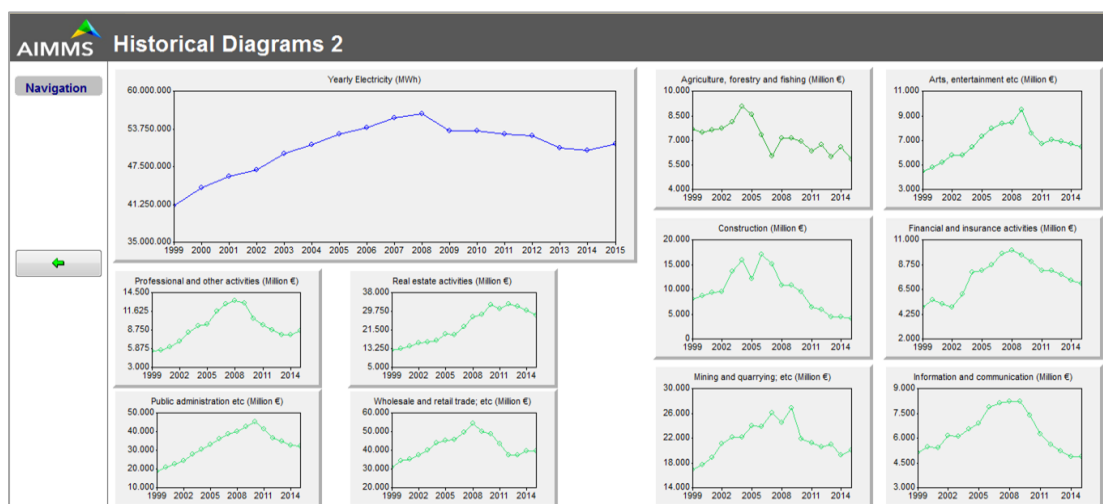


Εικόνα 5.35: Τα διαγράμματα με τα ιστορικά δεδομένα (1)

Στην εικόνα 5.35 φαίνεται η πρώτη σελίδα με τα διαγράμματα των ιστορικών δεδομένων. Σε αυτήν υπάρχουν διαγράμματα με τα ιστορικά στοιχεία της ηλεκτρικής ενέργειας και των 8 από τις 18 ανεξάρτητων μεταβλητών. Τα υπόλοιπα διαγράμματα είναι στην επόμενη σελίδα. Οι μεταβλητές που έχουν θετική επιρροή στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πράσινο

χρώμα ενώ αυτές που έχουν αρνητική έχουν κόκκινο. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα, στους πίνακες με τα ιστορικά δεδομένα, σε μια βοηθητική σελίδα και μία εντολή για μετάβαση στη σελίδα με τα υπόλοιπα διαγράμματα καθώς και μία εντολή με την οποία ανανεώνονται οι τιμές των μεταβλητών ανάλογα με τις τιμές που πληκτρολογεί ο χρήστης στο Excel.

Τα διαγράμματα με τις τιμές των υπόλοιπων 10 μεταβλητών φαίνονται στην εικόνα 5.36. Στην αριστερή στήλη υπάρχει επιλογή για επιστροφή στη σελίδα της εικόνας 5.35.



Εικόνα 5.36: Τα διαγράμματα με τα ιστορικά δεδομένα (2)

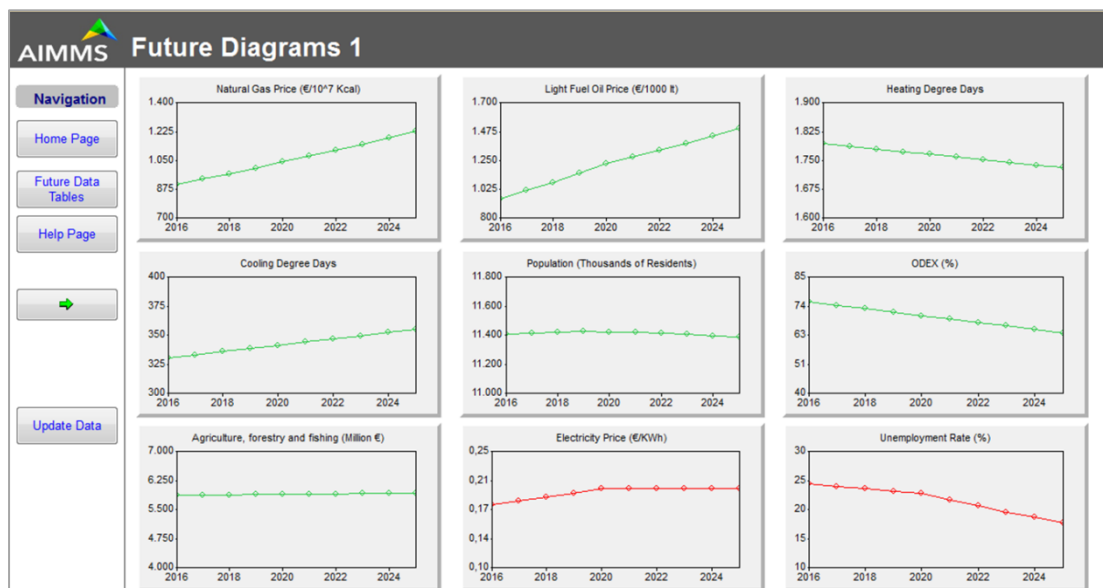
Στην εικόνα 5.37 φαίνεται η βοηθητική σελίδα για τα ιστορικά δεδομένα. Σε αυτήν υπάρχει ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές άντλησης των ιστορικών στοιχείων τους. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στα διαγράμματα και τους πίνακες ιστορικών δεδομένων.

	Measurement Unit	Past Sources
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kilocalories GCV	IEA (2007,2016)
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	IEA (2007,2016)
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
Agriculture, forestry and fishing	Constant prices, million euros	ELSTAT
Arts, entertainment and recreation, repair of household goods and other services	Constant prices, million euros	ELSTAT
Construction	Constant prices, million euros	ELSTAT
Financial and insurance activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Mining and quarrying; manufacturing; electricity, gas, steam and air conditioning supply; water supply; sewerage, waste management and remediation activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Information and communication	Constant prices, million euros	ELSTAT
Professional, scientific and technical activities; administrative and support service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Public administration and defence; compulsory social security; education; human health and social work activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Real estate activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles; transportation and storage; accommodation and food service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
ODEX	%	ODYSEE-MURE
Electricity Price	Euros per kWh	IEA, EUTOSTAT
Unemployment Rate	%	EUROSTAT

Εικόνα 5.37: Βοηθητική σελίδα για τα ιστορικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.38 φαίνεται η πρώτη σελίδα με τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων. Σε αυτήν υπάρχουν διαγράμματα με τα μελλοντικά στοιχεία για τις 9 από τις 18 ανεξάρτητες μεταβλητές. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα, στους πίνακες με τα μελλοντικά στοιχεία, σε μια βοηθητική σελίδα και στη σελίδα με

τα υπόλοιπα διαγράμματα. Επίσης, υπάρχει μία εντολή με την οποία ανανεώνονται οι τιμές των μεταβλητών ανάλογα με τις τιμές που πληκτρολογεί ο χρήστης στο Excel.



Εικόνα 5.38: Τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων (1)

Στην εικόνα 5.39 φαίνεται η βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία. Σε αυτήν υπάρχει ένας πίνακας με τις μονάδες μέτρησης των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και τις πηγές των μελλοντικών στοιχείων τους. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν εντολές για μετάβαση στους πίνακες και τα διαγράμματα μελλοντικών δεδομένων.

The figure shows a software interface titled 'AIMMS Help Page (Future)'. It features a navigation panel on the left and a table of variables on the right. The table lists various economic and energy indicators, their measurement units, and the sources of their future data.

Variable	Measurement Unit	Future Sources
Natural Gas Price	Euros per 10 ⁷ kcal/GCV	EC (2014) Commission Staff Working Document
Light Fuel Oil Price	Euros per 1000 litres	EC (2014) Commission Staff Working Document
Heating Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Cooling Degree Days	Days	Hellenic National Meteorological Service
Population	Thousands of residents	OECD Statistics
Agriculture, forestry and fishing	Constant prices, million euros	ELSTAT
Arts, entertainment and recreation, repair of household goods and other services	Constant prices, million euros	ELSTAT
Construction	Constant prices, million euros	ELSTAT
Financial and insurance activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Mining and quarrying, manufacturing, electricity, gas, steam and air conditioning supply, water supply, sewerage, waste management and remediation activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Information and communication	Constant prices, million euros	ELSTAT
Professional, scientific and technical activities; administrative and support service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Public administration and defence, compulsory social security, education, human health and social work activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Real estate activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles; transportation and storage; accommodation and food service activities	Constant prices, million euros	ELSTAT
ODEX	%	ODYSSEE-MURE
Electricity Price	Euros per kWh	EC Communication (2014)
Unemployment Rate	%	EC (2014), The 2015 Ageing Report

Εικόνα 5.39: Βοηθητική σελίδα για τα μελλοντικά στοιχεία

Στην εικόνα 5.40 δίνεται η περιγραφή του γραμμικού μοντέλου διαφορών καθώς και ο πίνακας με τους συντελεστές των μεταβλητών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε αυτό το μοντέλο απουσιάζει ο σταθερός όρος. Στην αριστερή στήλη υπάρχουν κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στην αρχική σελίδα του προγράμματος καθώς και στις σελίδες πρόβλεψης της παρελθοντικής και μελλοντικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

AIMMS Optimization Problem

Navigation

Home Page

Past Optimization

Future Optimization

The linear model of differences is focusing on the percentage changes of the examined independent and dependent variables and represents a linear version of the proposed methodology.

In particular, the linear model of differences assumes that the annual change of electricity demand depends on the yearly changes of the 18 parameters that have been presented. In this context, the regression formula has the following form:

$$\Delta Y_t = \sum_{i=1}^{18} b_i \Delta X_{it}$$

where ΔY_t is the annual % change of electricity demand in year t , ΔX_{it} is the annual % change of parameter i in year t and b_i are the estimated regression coefficients (for $i=1,2,\dots,18$).

Based on the previous assumptions applied, this specific linear optimization model minimizes the sum of the errors' absolute values and is as follows:

$$\begin{cases} [\min] F = \sum_{j=1}^T \sigma_j^+ + \sigma_j^- \\ \text{under the following constraints} \\ \sum_{i=1}^{18} b_i \Delta X_{ij} + \sigma_j^- - \sigma_j^+ = \Delta Y_j \text{ for } j = 1, 2, \dots, T \\ b_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, 16 \\ b_i \leq 0 \text{ for } i = 17, 18 \\ \sigma_j^+, \sigma_j^- \geq 0 \text{ for } j = 1, 2, \dots, T \end{cases}$$

where σ_j^- and σ_j^+ are the underestimation and overestimation errors for the year t , respectively, while $j=t-1999$ is the period of time compared to year t .

The factors of the forecast problem are presented below:

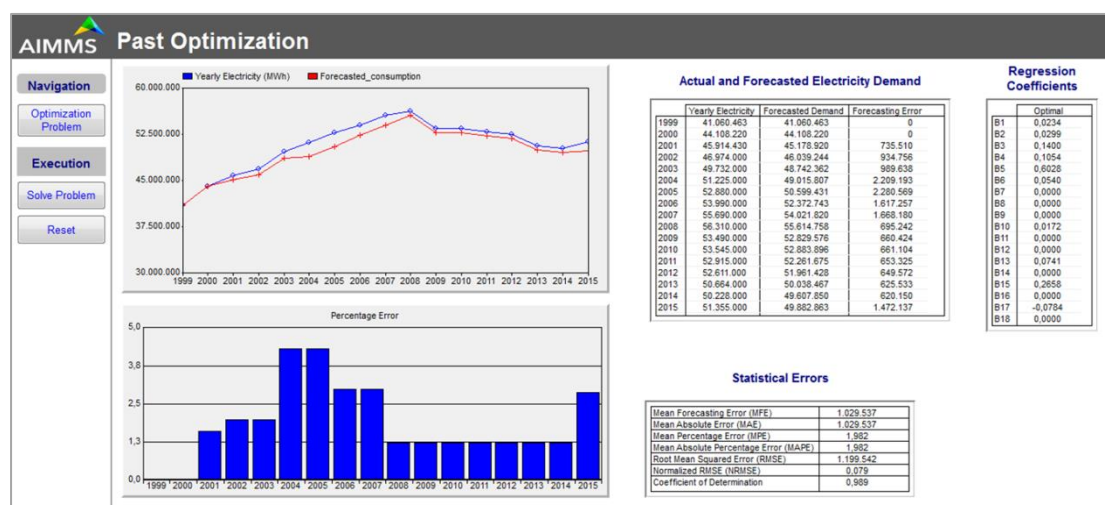
Factor	Symbol	Regression Coefficient
Natural Gas Price	ΔX_{1t}	b_1
Light Fuel Oil Price	ΔX_{2t}	b_2
Heating Degree Days	ΔX_{3t}	b_3
Cooling Degree Days	ΔX_{4t}	b_4
Population	ΔX_{5t}	b_5
Agriculture, forestry and fishing	ΔX_{6t}	b_6
Arts, entertainment and recreation, repair of household goods and other services	ΔX_{7t}	b_7
Construction	ΔX_{8t}	b_8
Financial and insurance activities	ΔX_{9t}	b_9
Mining and quarrying; manufacturing; electricity, gas, steam and air conditioning supply; water supply; sewerage, waste management and remediation activities	ΔX_{10t}	b_{10}
Information and communication	ΔX_{11t}	b_{11}
Professional, scientific and technical activities; administrative and support service activities	ΔX_{12t}	b_{12}
Public administration and defence; compulsory social security; education; human health and social work activities	ΔX_{13t}	b_{13}
Real estate activities	ΔX_{14t}	b_{14}
Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles; transportation and storage; accommodation and food service activities	ΔX_{15t}	b_{15}
ODEX	ΔX_{16t}	b_{16}
Electricity Price	ΔX_{17t}	b_{17}
Unemployment Rate	ΔX_{18t}	b_{18}

Εικόνα 5.40: Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στην εικόνα 5.41 φαίνονται τα αποτελέσματα της πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για τα προηγούμενα έτη. Σε αυτήν υπάρχει ένα διάγραμμα με τις καμπύλες της πραγματικής και της προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ένας πίνακας με τα στοιχεία της πραγματικής, της προβλεπόμενης ζήτησης και του σφάλματος πρόβλεψης, ένα διάγραμμα με το ποσοστιαίο σφάλμα, ένας πίνακας με τους δείκτες σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ένας πίνακας με τους συντελεστές παλινδρόμησης των 18 μεταβλητών του προβλήματος. Οι συντελεστές των μεταβλητών του μοντέλου πρόβλεψης δηλώνουν την ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση ετήσιας μεταβολής κάθε παράγοντα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αναφέρονται στα απόλυτα μεγέθη της εξαρτημένης μεταβλητής, παρόλο που το γραμμικό μοντέλο διαφορών προβλέπει την % ετήσια μεταβολή της μεταβλητής αυτής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προκύπτουν μετά από μία πρόσθετη φάση μετατροπής των ποσοστιαίων μεταβολών σε απόλυτες τιμές.

Από τις τιμές των στατιστικών δεικτών σφαλμάτων βγαίνει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο διαφορών με τις 18 μεταβλητές δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα είναι κοντά στο 2% (1,982), ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 υπολογίζεται στο 98,9%. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι η προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σταθερά χαμηλότερη από την πραγματική ζήτηση. Φαίνεται ακόμα ότι το ποσοστό ανεργίας δεν επηρεάζει τη ζήτηση αφού έχει μηδενικό συντελεστή παλινδρόμησης.

Στην αριστερή στήλη υπάρχει εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει μία εντολή για την εκτέλεση του προγράμματος και μία που προχωράει σε μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



Εικόνα 5.41: Πρόβλεψη της παρελθοντικής ζήτησης

Στην εικόνα 5.42 φαίνονται τα αποτελέσματα της μελλοντικής πρόβλεψη της ζήτησης. Και σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται πρόβλεψη με βάση 3 διαφορετικά σενάρια: ένα σενάριο αναφοράς, ένα σενάριο χαμηλής ζήτησης και ένα σενάριο υψηλής ζήτησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα με τις καμπύλες των τριών σεναρίων και ένας πίνακας που δείχνει τις τιμές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα σενάρια καθώς και την ποσοστιαία % απόκλιση των σεναρίων χαμηλής και υψηλής ζήτησης από το σενάριο αναφοράς. Στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης μπορεί να επέμβει ο χρήστης αλλάζοντας το ρυθμό μεταβολής της κάθε μεταβλητής από αυτόν που έχει στο σενάριο αναφοράς. Για τις μεταβλητές που έχουν θετική επιρροή στη ζήτηση επιλέγεται μείωση του ρυθμού μεταβολής στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και αύξηση στο σενάριο υψηλής ζήτησης, ενώ για αυτές που έχουν αρνητική επιρροή επιλέγεται αύξηση του ρυθμού μεταβολής στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και μείωση στο σενάριο υψηλής ζήτησης. Στο δεξί μέρος της σελίδας υπάρχουν οι πίνακες στους οποίους δηλώνονται αυτές οι μεταβολές και ένα διάγραμμα που δείχνει την ποσοστιαία % απόκλιση των δύο σεναρίων από το σενάριο αναφοράς. Και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζονται αναφέρονται στα απόλυτα μεγέθη της εξαρτημένης μεταβλητής και όχι στην % ετήσια μεταβολή της.

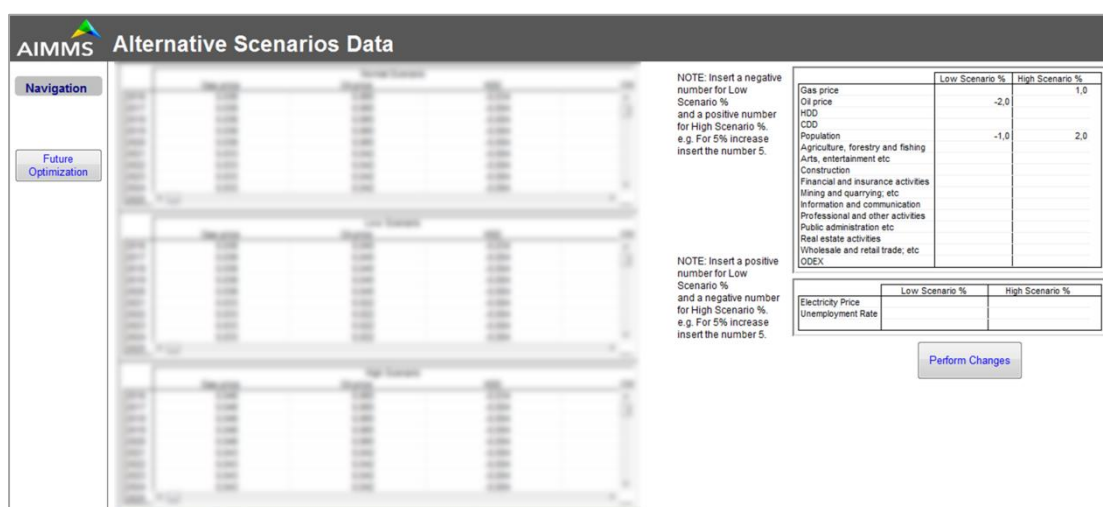
Στη συγκεκριμένη εκτέλεση, για το σενάριο χαμηλής ζήτησης επιλέχθηκε μείωση 2% στο ρυθμό μεταβολής της τιμής του πετρελαίου θέρμανσης και 1% στο ρυθμό μεταβολής του πληθυσμού, ενώ για το σενάριο υψηλής ζήτησης επιλέχθηκε αύξηση 1% στο ρυθμό μεταβολής της τιμής του φυσικού αερίου και 2% στο ρυθμό μεταβολής του πληθυσμού.

Στην αριστερή στήλη υπάρχει μία εντολή για επιστροφή στην περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης, μία εντολή για μετάβαση στα δεδομένα των μεταβλητών στα διάφορα σενάρια και μία για μετάβαση στο πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Επιπλέον, υπάρχει μία εντολή για τη λύση του προβλήματος και μία για το μηδενισμό όλων των στοιχείων του.



Εικόνα 5.42: Πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης

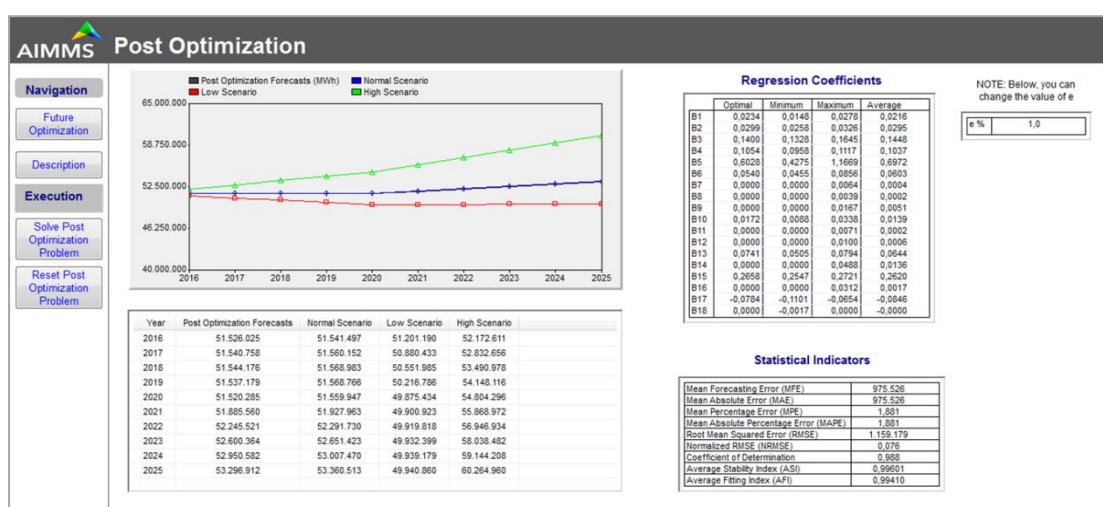
Στην εικόνα 5.43 φαίνονται τα δεδομένα των μεταβλητών στα 3 διαφορετικά σενάρια. Υπάρχουν 3 πίνακες οι οποίοι δείχνουν τις τιμές που παίρνουν οι διάφορες μεταβλητές στα 3 διαφορετικά σενάρια. Στους πίνακες αυτούς τα στοιχεία δεν αφορούν τις απόλυτες τιμές αλλά τις ετήσιες ποσοστιαίες μεταβολές κάθε μεταβλητής. Επίσης, υπάρχουν και εδώ οι δύο πίνακες που δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει το ρυθμό μεταβολής οποιασδήποτε μεταβλητής θέλει. Με την εντολή “Perform Changes” αλλάζουν οι τιμές των μεταβλητών στους πίνακες με τα δεδομένα στα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτησης ανάλογα με τις τιμές που δίνει ο χρήστης. Τέλος στην αριστερή στήλη υπάρχει ένα κουμπί για μετάβαση στη σελίδα για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης



Εικόνα 5.43: Δεδομένα στα διάφορα σενάρια

Στην εικόνα 5.44 φαίνονται τα αποτελέσματα του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης σε απόλυτες τιμές. Σε αυτό προβλέπεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το μέσο όρο των συντελεστών b_i . Η τιμή αυτή των b_i προκύπτει ως η μέση τιμή των τιμών των b_i από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Στη σελίδα αυτή υπάρχει ένα διάγραμμα που δείχνει την πρόβλεψη με βάση τα σενάρια αναφοράς και χαμηλής και υψηλής ζήτησης και την πρόβλεψη με βάση το μέσο των b_i καθώς και ένας πίνακας που δείχνει την τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις διάφορες περιπτώσεις. Επίσης, υπάρχει ένας πίνακας με τις τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης σε 4 διαφορετικές περιπτώσεις: την τιμή τους στο αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους καθώς και τη μέση τιμή των b_i από όλα τα προβλήματα μεταβελτιστοποίησης. Οι συντελεστές b_i δηλώνουν την ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση ετήσιας μεταβολής κάθε παράγοντα. Επιπλέον, υπάρχει ένας πίνακας με τους δείκτες σφαλμάτων του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Οι τιμές των δεικτών είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές του απλού προβλήματος βελτιστοποίησης, γεγονός που σημαίνει ότι το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης δίνει πιο ακριβείς προβλέψεις. Χαρακτηριστικά, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα έχει τιμή 1,88% έναντι 1,98% που είχε στο απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει την τιμή του ϵ (ποσοστό παραχώρησης σφαλμάτων).

Στην αριστερή στήλη υπάρχουν δύο κουμπιά πλοήγησης για μετάβαση στο πρόβλημα μελλοντικής βελτιστοποίησης και για μετάβαση στην περιγραφή του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης. Επίσης υπάρχει μία εντολή για τη λύση του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης και μία για το μηδενισμό των στοιχείων του προβλήματος μεταβελτιστοποίησης.

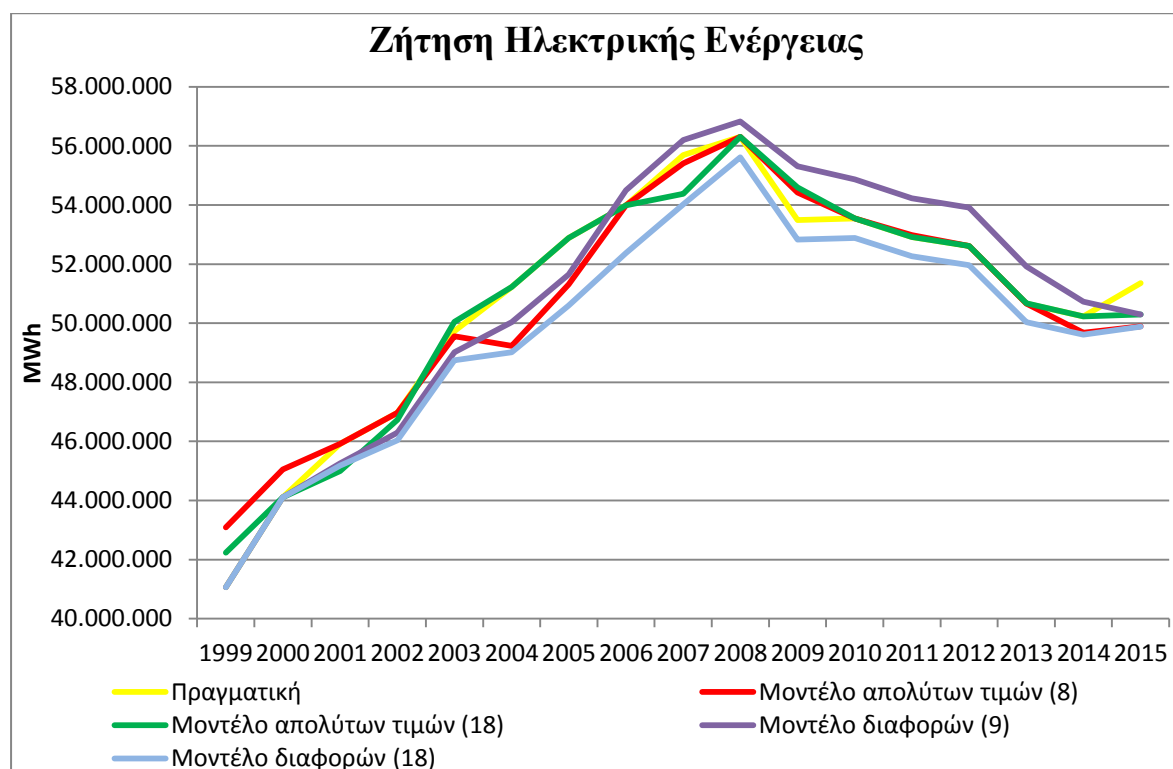


Εικόνα 5.44: Το πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης

5.5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των διάφορων μοντέλων και πραγματοποιούνται συγκρίσεις.

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη 1999-2015. Στο σχήμα αυτό απεικονίζονται η πραγματική και η προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα 4 μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Σε παρένθεση είναι ο αριθμός των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το κάθε μοντέλο.

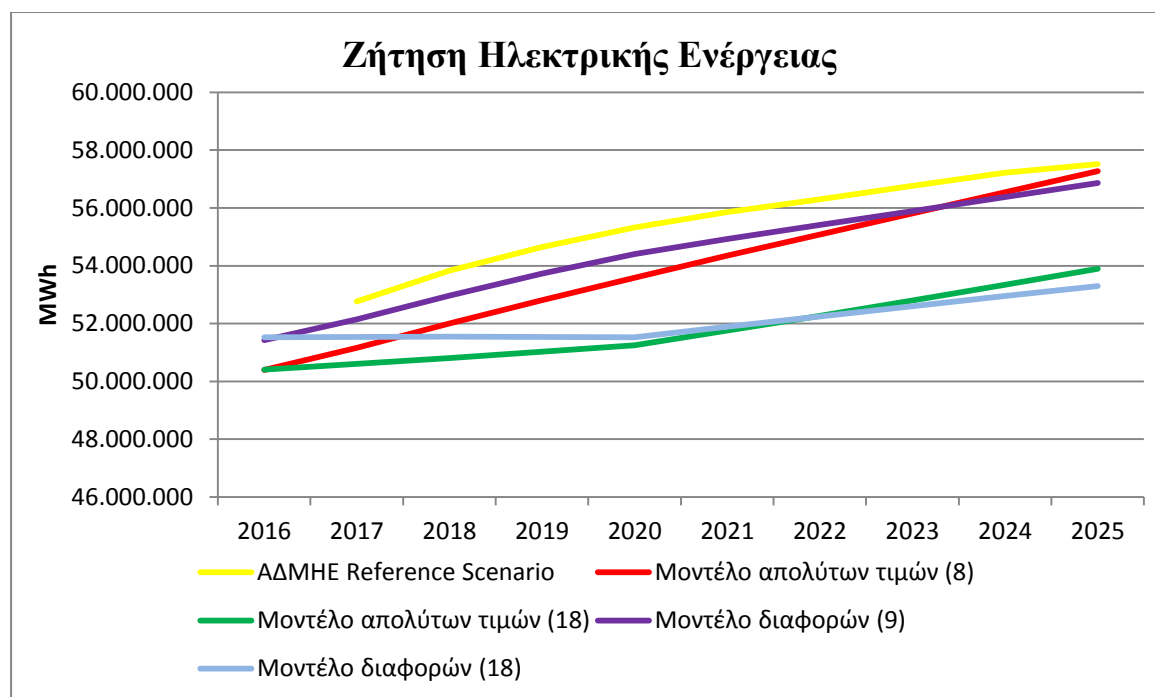


Σχήμα 5.1: Η πραγματική και η προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνονται τα εξής:

- Το γραμμικό μοντέλο διαφορών με τις 18 μεταβλητές παρουσιάζει τις χαμηλότερες προβλέψεις
- Το γραμμικό μοντέλο διαφορών με τις 9 μεταβλητές παράγει τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις για τα έτη 2006-2014
- Το γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών με τις 18 μεταβλητές παράγει τις πλησιέστερες στην πραγματική ζήτηση προβλέψεις και ακολουθεί το γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών με τις 8 μεταβλητές
- Για το έτος 2015 όλα τα μοντέλα προβλέπουν ζήτηση χαμηλότερη της πραγματικής.

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για την περίοδο 2016-2025 με βάση τα 4 μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω και με βάση τις επίσημες προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ [106]. Να σημειωθεί ότι οι προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ αφορούν το σενάριο αναφοράς και με βάση αυτό το σενάριο υπολογίζεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας δίχως την ενσωμάτωση της Κρήτης στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Να σημειωθεί επίσης ότι οι τιμές των 4 μοντέλων αφορούν τις προβλέψεις των προβλημάτων μεταβελτιστοποίησης για κάθε ένα από τα 4 μοντέλα (σε παρένθεση ο αριθμός των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το κάθε μοντέλο).



Σχήμα 5.2: Η προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

Από το παραπάνω σχήμα βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι προβλέψεις και των τεσσάρων μοντέλων είναι πιο απαισιόδοξες από τις επίσημες προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ
- Για το έτος 2025, οι προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ βρίσκονται πολύ κοντά με τις προβλέψεις που δίνει το μοντέλο απολύτων τιμών με τις 8 μεταβλητές
- Τα μοντέλα με το μικρό αριθμό μεταβλητών (γραμμικό μοντέλο απολύτων τιμών με 8 μεταβλητές, γραμμικό μοντέλο διαφορών με 9 μεταβλητές) παράγουν τις πιο απαισιόδοξες προβλέψεις. Αντίστοιχα, τα μοντέλα με τις πολλές μεταβλητές παράγουν τις πιο απαισιόδοξες προβλέψεις
- Τα μοντέλα με το μικρό αριθμό μεταβλητών παράγουν παραπλήσιες προβλέψεις, όπως και τα μοντέλα με τις πολλές μεταβλητές

- Υπάρχει σαφής διαφορά μεταξύ των προβλέψεων των μοντέλων με τις λίγες και των μοντέλων με τις πολλές μεταβλητές
- Οι προβλέψεις κάθε μοντέλου για το έτος 2025 είναι:
 - Μοντέλο απολύτων τιμών με 8 μεταβλητές: 57.270.841 MWh
 - Μοντέλο απολύτων τιμών με 18 μεταβλητές: 53.889.932 MWh
 - Γραμμικό μοντέλο διαφορών με 9 μεταβλητές: 56.865.420 MWh
 - Γραμμικό μοντέλο διαφορών με 19 μεταβλητές: 53.296.912 MWh
- Παρατηρείται διαφορά 4.000 GWh μεταξύ της πιο αισιόδοξης και της πιο απαισιόδοξης πρόβλεψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Παρατηρείται σημαντική βιβλιογραφική ποικιλομορφία στην προσέγγιση της μοντελοποίησης και πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μελέτες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης, τη μέθοδο που χρησιμοποιούν, τον τομέα για τον οποίο πραγματοποιούν προβλέψεις και τις μεταβλητές που χρησιμοποιούν. Οι πιο συνήθεις προσδιοριστικοί παράγοντες είναι το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν, ο πληθυσμός και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων έχει αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι στατιστικές τεχνικές πρόβλεψης της ζήτησης έχουν χρησιμοποιηθεί στην πράξη για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς είναι σχετικά απλές στη χρήση τους ενώ δίνουν επαρκή αποτελέσματα. Από τις μεθόδους αυτές, τα παλινδρομικά μοντέλα δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική. Ωστόσο, οι στατιστικές τεχνικές δεν μπορούν να παρουσιάσουν σωστά τις σύνθετες μη γραμμικές σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και μιας σειράς παραγόντων που την επηρεάζουν. Για το λόγο αυτό, την τελευταία δεκαετία εφαρμόζονται μέθοδοι τεχνητής και υπολογιστικής νοημοσύνης. Οι τεχνικές αυτές έχουν σύνθετη δομή και απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης, όμως παρουσιάζουν επαυξημένη ακρίβεια στα αποτελέσματά τους. Τα τελευταία χρόνια τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι η πιο ενεργή περιοχή έρευνας για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, υπάρχει μία σαφής τάση για υβριδικές μεθόδους, οι οποίες συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνικές και παρουσιάζουν αυξημένη ακρίβεια. Τέλος, φαίνεται ότι η έρευνα έχει αρχίσει να επικεντρώνεται σε νέες πιο αποτελεσματικές τεχνικές πρόβλεψης, αντικαθιστώντας τις παλιές.

Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια μία σημαντική μείωση της ζήτησής της. Βασικός παράγοντας για αυτή τη μείωση είναι η οικονομική κρίση η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του ΑΕΠ κατά σχεδόν 25% τα τελευταία 6 χρόνια και την εκτόξευση του ποσοστού ανεργίας. Επίσης είναι ορατή μία σημαντική διαφοροποίηση στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας. Η συνεισφορά του λιγνίτη στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία 10 και πλέον χρόνια. Το ποσοστό της λιγνιτική συνεισφοράς μειώθηκε από το 63% της συνολικής παραγωγής το 2004 στο 38% το 2015. Το ποσοστό αυτό της μείωσης έχει αντισταθμιστεί κυρίως από δύο παράγοντες. Τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και τις Καθαρές Εισαγωγές. Η Ελλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό των καθαρών εισαγωγών έχει αυξηθεί από το 5,5% στο σύνολο της παραγωγής το 2004 στο 18,7% το 2015. Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα έχουν αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ έχει αυξηθεί από 556 MW το 2004 σε 4600 MW το 2015, ενώ το ποσοστό της συνεισφοράς τους στην παραγωγή από το 1,5% το 2004 στο 19% το 2015.

Παρατηρείται ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα μπορεί να μοντελοποιηθεί με επιτυχία με χρήση γραμμικών μεθόδων παλινδρόμησης. Επίσης το λογισμικό AIMMS είναι ένα πολύ αξιόπιστο εργαλείο για την υλοποίηση των γραμμικών μοντέλων πρόβλεψης και την ανάπτυξη πληροφοριακού συστήματος για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρισμού.

6.2 Μελλοντικές προοπτικές

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σημαντικές προοπτικές για μελλοντική επέκταση:

- Ανάπτυξη διαδικτυακής εφαρμογής. Το λογισμικό AIMMS δίνει τη δυνατότητα επέκτασης των μοντέλων για ανάπτυξη web εφαρμογών. Έτσι, από το πληροφοριακό σύστημα μπορεί να αναπτυχθεί μία διαδικτυακή εφαρμογή με χρήση του AIMMS WebUI. Το WebUI είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει την υλοποίηση εφαρμογών βελτιστοποίησης σε ένα πρόγραμμα περιήγησης.
- Ενσωμάτωση εναλλακτικών μεθόδων πρόβλεψης. Μία σημαντική διαφοροποίηση της μελέτης αφορά την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μη-γραμμικών μεθόδων. Καθώς το AIMMS υποστηρίζει γραμμικά και μη-γραμμικά μοντέλα, το παρόν πληροφοριακό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την πρόβλεψη της ζήτησης με μη-γραμμικές τεχνικές.
- Ενσωμάτωση νέων μεταβλητών. Η είσοδος των δεδομένων στο πρόγραμμα από το Excel επιτρέπει την προσθήκη νέων μεταβλητών με πολύ απλό τρόπο. Έτσι, καθώς οι νέες τεχνολογίες όπως πχ. έξυπνα δίκτυα (smast grids), αυτοπαραγωγή (net metering) παίζουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, στο επίπεδο του δικτύου, νέες μεταβλητές που αντικατοπτρίζουν την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών στο ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Alfares H. K., Nazeeruddin M.: Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International Journal of Systems Science*, 2002, 33.1: 23-34.
- [2] Esteves G. R., Bastos B. Q., Cyrino F. L., Calili R. F., Souza R. C.: Long Term Electricity Forecast: A Systematic Review. *Procedia Computer Science*, 2015, 55: 549-558.
- [3] Ghalehkhondabi I., Ardjmand E., Weckman G. R., Young II W. A.: An overview of energy demand forecasting methods published in 2005–2015. *Energy Systems*, 2016, 1-37.
- [4] Ghods L., Kalantar M.: Different methods of long-term electric load demand forecasting; a comprehensive review. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 2011, 7.4: 249-259.
- [5] Hahn H., Meyer-Nieberg S., Pickl S.: Electric load forecasting methods: Tools for decision making. *European Journal of Operational Research*, 2009, 199.3: 902-907.
- [6] Jebaraj S., Iniyar S.: A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10.4: 281-311.
- [7] Singh A. K., Khatoon S., Muazzam M., Chaturvedi D. K.: Load forecasting techniques and methodologies: A review. In: *Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2012 2nd International Conference on*. IEEE, 2012. p. 1-10.
- [8] Suganthi L., Samuel A. A.: Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16.2: 1223-1240.
- [9] Apadula F., Bassini A., Elli A., Scapin S.: Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand. *Applied Energy*, 2012, 98: 346-356
- [10] Bianco V., Manca O., Nardini S.: Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models. *Energy* 2009; 34(9): 1413–21.
- [11] Bianco V., Manca O., Nardini S.: Linear regression models to forecast electricity consumption in Italy. *Energy Sources Part B* 2013;8:86–93.
- [12] Ghanbari A., Naghavi A., Ghaderi S. F., Sabaghian M.: Artificial Neural Networks and regression approaches comparison for forecasting Iran's annual electricity load. *IEEE POWER ENG. Conference*, pp. 675-679, 2009.
- [13] Günay M.E.: Forecasting annual gross electricity demand by artificial neural networks using predicted values of socio-economic indicators and climatic conditions: Case of Turkey. *Energy Policy*, 2016, 90: 92-101.
- [14] Nan L.: Based on dynamic regression model medium and long-term demand forecast and analysis of China's electric power. In: *Information Science and Engineering (ICISE), 2010 2nd International Conference on*. IEEE, 2010. p. 1053-1056.

- [15] OrtizBeviá M.J., Ruiz de Elvira A., Alvarez-García F.J.: The influence of meteorological variability on the mid-term evolution of the electricity load. *Energy*, 2014, 76: 850-856.
- [16] Panklib K., Prakasvudhisarn C., Khummongkol D.: Electricity Consumption Forecasting in Thailand Using an Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2015, 10.4: 427-434.
- [17] Gul M., Qazi S.A., Qureshi W.A.: Incorporating economic and demographic variables for forecasting electricity consumption in Pakistan. In: *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, 2011 2nd International Conference on. IEEE, 2011. p. 1-5.
- [18] Kaytez F., Taplamacioglu M.C., Cam E., Hardalac F.: Forecasting electricity consumption: a comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 67: 431-438.
- [19] Pao H.T.: Comparing linear and nonlinear forecasts for Taiwan's electricity consumption. *Energy* 2006; 31(12):2129-41.
- [20] Al-Riyami H., Al-Busaidi A., Al-Nadabi A., Al-Siyabi M., Al-Abri M., Al-Rawahi Z., Dubois J., Lambillon V., Mirza S., Bastens A., Abdalla O.H.: Development of demand forecast model for the transmission system master plan of Oman (2014-2030). In: *GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*, 2015 IEEE 8th. IEEE, 2015. p. 1-6.
- [21] Bilgili M., Sahin B., Yasar A., Simsek E.: Electric energy demands of Turkey in residential and industrial sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16.1: 404-414.
- [22] Imtiaz A.K., Mariun N.B., Amran M.M.R., Saleem M., Wahab N.I.A.: Evaluation and Forecasting of Long Term Electricity Consumption Demand for Malaysia by Statistical Analysis. In: *Power and Energy Conference, 2006. PECon'06. IEEE International. IEEE, 2006. p. 257-261.*
- [23] Mohamed Z., Bodger P.: Forecasting electricity consumption in New Zealand using economic and demographic variables, *Energy* 30 (2005) 1833-1843.
- [24] Mtembo V., Taylor G.A., Ekwue A.: A novel econometric model for peak demand forecasting. In: *Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities. IEEE, 2014. p. 1-6.*
- [25] Vu D.H., Muttaqi K.M., Agalgaonkar A.P.: Assessing the influence of climatic variables on electricity demand. In: *PES General Meeting| Conference & Exposition, 2014 IEEE. IEEE, 2014. p. 1-5.*
- [26] Jian-Chao Hou, Zhong-Fu T., Xiao-jun L.: Electricity Consumption and Economic Growth in China: Multivariable Cointegration Analysis and Electricity Demand Forecasting. In: *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM'08. 4th International Conference on. IEEE, 2008. p. 1-4.*
- [27] Pérez-García J., Moral-Carcedo J.: Analysis and long term forecasting of electricity demand through a decomposition model: A case study for Spain. *Energy*, 2016, 97: 127-143.

- [28] Zachariadis T., Pashourtidou N.: An empirical analysis of electricity consumption in Cyprus. *Energy Economics*, 2007, 29.2: 183-198.
- [29] Xing-Ping Zhang, Rui Gu: Electrical energy consumption forecasting based on cointegration and a support vector machine in China. *WSEAS Trans Math* 2007; 6(12):878–83.
- [30] Amarawickrama H.A., Hunt L.C.: Electricity demand for Sri-Lanka: a time series analysis. *Energy* 2008;33:724–39.
- [31] Dilaver Z., Hunt L.C.: Modelling and forecasting Turkish residential electricity demand. *Energy Policy* 2011;39(6):3117–27.
- [32] Dilaver Z., Hunt L.C.: Turkish aggregate electricity demand: an outlook to 2020. *Energy*, 2011, 36.11: 6686-6696.
- [33] El-Shazly A.: Electricity demand analysis and forecasting: A panel cointegration approach. *Energy Economics*, 2013, 40: 251-258.
- [34] Pessanha J.F.M., Leon N.: Forecasting long-term electricity demand in the residential sector. *Procedia Computer Science*, 2015, 55: 529-538.
- [35] Boran K.: The Box Jenkins approach to forecast net electricity consumption in Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2014, 36.5: 515-524.
- [36] Citroen N., Ouassaid M., Maaroufi M.: Long term electricity demand forecasting using autoregressive integrated moving average model: Case study of Morocco. In: *Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2015 International Conference on. IEEE*, 2015. p. 59-64.
- [37] Pappas S.S., Ekonomou L., Karamousantas D.C., Chatzarakis G.E., Katsikas S.K., Liatsis P.: Electricity demand loads modeling using auto regressive moving average (ARMA) models. *Energy* 2008;33:1353–60.
- [38] Erdogdu E.: Electricity demand analysis using cointegration and ARIMA modelling: a case study of Turkey. *Energy Policy* 2007;35(2):1129–46.
- [39] Hussain A., Rahman M., Memon J. A.: Forecasting electricity consumption in Pakistan: the way forward. *Energy Policy*, 2016, 90: 73-80.
- [40] Kale R.V., Pohekar S.D.: Electricity demand and supply scenarios for Maharashtra (India) for 2030: An application of long range energy alternatives planning. *Energy Policy*, 2014, 72: 1-13.
- [41] Li-Yao W., Feng-Mao Y.: Using Seasonal Time Series Analysis to Predict China's Demand of Electricity. In: *Computational and Information Sciences (ICCIS), 2013 Fifth International Conference on. IEEE*, 2013. p. 76-79.
- [42] Zachariadis T.: Forecast of electricity consumption in Cyprus up to the year 2030: the potential impact of climate change. *Energy Policy* 2010; 38(2):744–50.

- [43] Chen G., Lie T.: The impact of climate change on New Zealand's electricity demand. In: Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on. IEEE, 2010. p. 808-813.
- [44] Çunkaş M., Altun A.A.: Long term electricity demand forecasting in Turkey using artificial neural networks. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2010, 5.3: 279-289.
- [45] Deng J.: Modeling and prediction of China's electricity consumption using Artificial Neural Network. In: Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference on. IEEE, 2010. p. 1731-1733
- [46] Saravanan S., Kannan S., Thangaraj C.: Forecasting India's electricity demand using artificial neural network. In: Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on. IEEE, 2012. p. 79-83.
- [47] Al Mamun M., Negasaka K.: Artificial neural networks applied to long-term electricity demand forecasting, *Proceedings of the Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'04)*, pp. 204-209, Dec. 2004.
- [48] Azadeh A., Ghaderi S.F., Sohrabkhani S.: Forecasting electrical consumption by integration of neural network, time series and ANOVA. *Applied Mathematics and Computation* 2007;186:1753–61.
- [49] Ghiassi M., Zimbra D.K., Saidane H.: Medium term system load forecasting with a dynamic artificial neural network model. *Electric Power Systems Research* 2006;76(5):302–16.
- [50] Ghods L. and Kalantar M.: Long-Term Peak Load Demand Forecasting by Using Radial Basis Function Neural Networks, *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering (IJEEE)*, Vol. 6, No. 3, pp. 175-182, 2010.
- [51] Hsu C.C., Chen C.Y.: Regional load forecasting in Taiwan—applications of artificial neural networks. *Energy Conversion and Management* 2003;44:1941–9.
- [52] Ji Z., Zhang P. and Zhao Z.: Application of Wavelet Neural Network and Rough Set Theory to Forecast Mid-Long-Term Electric Power Load, *Education Technology and Computer Science*, 2009, ECTS '09. First International Workshop on , Vol. 1, pp 1104-1108, 2009.
- [53] Kankal M., Uzlu E.: Neural network approach with teaching–learning-based optimization for modeling and forecasting long-term electric energy demand in Turkey. *Neural Computing and Applications*, 2016, 1-11.
- [54] Kavaklioglu K., Ceylan H., Ozturk H.K., Canyurt O.E.: Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using Artificial Neural Networks. *Energy Conversion and Management* 2009;50(11):2719–27.
- [55] Kermanshahi B.S., and Iwamiya H.: Up to year 2020 load forecasting using neural nets, *Electric Power System Research (Elsevier)*, Vol. 24, No.9, pp. 789-797, 2002.

- [56] Kumaran J., Ravi G.: Long-term Sector-wise Electrical Energy Forecasting Using Artificial Neural Network and Biogeography-based Optimization. *Electric Power Components and Systems*, 2015, 43.11: 1225-1235.
- [57] Sözen A., Akçayol M.A., Arcaklioğlu E.: Forecasting net energy consumption using artificial neural network. *Energy Sources, Part B*, 2006, 1.2: 147-155.
- [58] Zahedi G., Azizi S., Bahadori A., Elkamel A., Alwi S.R.W.: Electricity demand estimation using an adaptive neuro-fuzzy network: a case study from the Ontario province–Canada. *Energy*, 2013, 49: 323-328.
- [59] Ucenic C., Atsalakis G.: A neuro-fuzzy approach to forecast the electricity demand. In: *Proceedings of the 2006 IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environmental Systems*. 2006. p. 299-304.
- [60] Altinoz O.T., Mengusoglu E.: Cloud-based long term electricity demand forecasting using artificial neuro-fuzzy and neural networks. In: *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. IEEE, 2015. p. 977-981.
- [61] Azadeh A., Saberi M., Asadzadeh S.M., Anvarian N.: An Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System-Data Envelopment Analysis Algorithm for Optimization of Long-Term Electricity Consumption, Forecasting and Policy Analysis: The Case of Seven Industrialized Countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2013, 8.1: 56-66.
- [62] Mollaiy-Berneti S.: Optimal design of adaptive neuro-fuzzy inference system using genetic algorithm for electricity demand forecasting in Iranian industry. *Soft Computing*, 2015, 1-10.
- [63] Saravanan S., Kannan S., Nithya R., Thangaraj C.: Modeling and prediction of India's electricity demand using fuzzy logic. In: *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2014 International Conference on*. IEEE, 2014. p. 93-96.
- [64] Torrini F.C., Souza R.C., Oliveira F.L.C., Pessanha J.F.M.: Long term electricity consumption forecast in Brazil: A fuzzy logic approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2016, 54: 18-27. doi: 10.1016/j.seps.2015.12.002.
- [65] Assareh E., Behrang M.A., Ghanbarzdeh A.: Forecasting energy demand in Iran using genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) methods. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2012, 7.4: 411-422.
- [66] Ozturk H.K., Ceylan H., Canyurt O.E., Hepbasli A.: Electricity estimation using genetic algorithm approach: a case study of Turkey. *Energy* 2005; 30(7):1003–12.
- [67] Amjadi M.H., Nezamabadi-Pour H., Farsangi M.M.: Estimation of electricity demand of Iran using two heuristic algorithms. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51.3: 493-497.
- [68] Azadeh A., Tarverdian S.: Integration of genetic algorithm, computer simulation and design of experiments for forecasting electrical energy consumption. *Energy Policy* 2007;35(10):5229–41.

- [69] Azadeh A., Ghaderi S.F., Tarverdian S.: Electrical energy consumption estimation by genetic algorithm. In: Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on. IEEE, 2006. p. 395-398.
- [70] Behrang M.A., Assareh E., Assari M.R., Ghanbarzadeh A.: Assessment of electricity demand in Iran's industrial sector using different intelligent optimization techniques. Applied Artificial Intelligence, 2011, 25.4: 292-304.
- [71] Ceylan H., Ozturk H.K.: Estimating energy demand of Turkey based on economic indicators using genetic algorithm approach. Energy Conversion and Management 2004;45(15–16):2525–37.
- [72] Çunkaş M., Taşkıran U.: Turkey's electricity consumption forecasting using genetic programming. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2011, 6.4: 406-416.
- [73] De Felice M., Alessandri A., Catalano F.: Seasonal climate forecasts for medium-term electricity demand forecasting. Applied Energy, 2015, 137: 435-444.
- [74] Y. Chung Guo, Dong-Xiao Niu, Yan-Xu Chen , "SUPPORT VECTOR MACHINE MODEL IN ELECTRICITY LOAD FORECASTING," Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 13-16 August 2006
- [75] Pai P.-F., and Hong W.-C., Forecasting regional electricity load based on recurrent support vector machines with genetic algorithms, Electric Power System Research (Elsevier), Vol. 74, No. 3, pp. 417-425, 2005.
- [76] Pi D., Liu J., Qin X.: A grey prediction approach to forecasting energy demand in China. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2010, 32.16: 1517-1528.
- [77] Akay D., Atak M.: Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey. Energy 2007;32(9):1670–5.
- [78] Feng S.J., Ma Y.D., Song Z.L., Ying J.: Forecasting the energy consumption of China by the grey prediction model. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2012, 7.4: 376-389.
- [79] Hamzacebi C., Es H.A.: Forecasting the annual electricity consumption of Turkey using an optimized grey model. Energy, 2014, 70: 165-171.
- [80] Wang X.: Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Shanghai. In: Grey Systems and Intelligent Services, 2007. GSIS 2007. IEEE International Conference on. IEEE, 2007. p. 689-692.
- [81] Zhou P., Ang B.W., Poh K.L.: A trigonometric grey prediction approach to forecasting electricity demand. Energy 2006;31(14):2839–47.
- [82] Ghanbari A., Abbasian-Naghneh S., Hadavandi E.: An intelligent load forecasting expert system by integration of ant colony optimization, genetic algorithms and fuzzy logic. In: Proceedings of IEEE symposium on computational intelligence and data mining (CIDM): IEEE;2011. p.246–51.

- [83] Kıran M.S., Özceylan E., Gündüz M., Paksoy T.: A novel hybrid approach based on particle swarm optimization and ant colony algorithm to forecast energy demand of Turkey. *Energy conversion and management*, 2012, 53.1: 75-83.
- [84] Musa W.: A HYBRID MODERN AND CLASSICAL ALGORITHM FOR INDONESIAN ELECTRICITY DEMAND FORECASTING. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 11, NO. 3, FEBRUARY 2016
- [85] Toksari M.D.: A hybrid algorithm of Ant Colony Optimization (ACO) and Iterated Local Search (ILS) for estimating electricity domestic consumption: Case of Turkey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 78: 776-782.
- [86] Barak S., Sadegh S.S.: Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 82: 92-104.
- [87] Yu S., Wang K., Wei Y.M.: A hybrid self-adaptive Particle Swarm Optimization–Genetic Algorithm–Radial Basis Function model for annual electricity demand prediction. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91: 176-185.
- [88] Zhao H., Guo S.: An optimized grey model for annual power load forecasting. *Energy*, 2016, 107: 272-286.
- [89] Christodoulakis N.M., Kalyvitis S.C., Lalas D.P., Pesmajoglou S.: Forecasting energy consumption and energy related CO₂ emissions in Greece: an evaluation of the consequences of the Community Support Framework II and natural gas penetration. *Energy Economics*, 2000, 22.4: 395-422.
- [90] Dergiades T., Martinopoulos G., Tsoulfidis L.: Energy consumption and economic growth: Parametric and non-parametric causality testing for the case of Greece. *Energy economics*, 2013, 36: 686-697.
- [91] Ekonomou L.: Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks. *Energy* 2010; 35: 512–7.
- [92] Hondroyiannis G.: Estimating residential demand for electricity in Greece. *Energy Economics* 2004;26:319–34.
- [93] Mirasgedis S., Sarafidis Y., Georgopoulou E., Lalas D.P., Moschovits M., Karagiannis F., Papakonstantinou D.: Models for mid-term electricity demand forecasting incorporating weather influences. *Energy* 2006; 31(2–3):208–27.
- [94] Polemis M.L.: Modeling industrial energy demand in Greece using cointegration techniques. *Energy Policy*, 2007, 35.8: 4039-4050.
- [95] Psiloglou B.E., Giannakopoulos C., Majithia S., Petrakis M.: Factors affecting electricity demand in Athens, Greece and London, UK: A comparative assessment. *Energy*, 2009, 34.11: 1855-1863.
- [96] Rapanos V.T., Polemis M.L.: The structure of residential energy demand in Greece. *Energy Policy*, 2006, 34.17: 3137-3143.

- [97] Tsekouras G.J., Dialynas E.N., Hatziargyriou N.D., Kavatza S.: A non-linear multivariable regression model for midterm energy forecasting of power systems. Electric Power Systems Research, 2007, 77.12: 1560-1568.
- [98] Εφημερίδα η «ΚΥΡΙΑΚΑΤΙΚΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΤΥΠΙΑ». Ανάκτηση από <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=360586>.
- [99] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.rae.gr>.
- [100] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) Α.Ε., [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.dei.gr>.
- [101] Εργασία από <http://docplayer.gr/6938787-Kefalaio-1-i-ilektriki-energeia-stin-ellada.html>
- [102] Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ) Α.Ε., [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.lagie.gr>.
- [103] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε., [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.admie.gr>.
- [104] Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) Α.Ε., [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.deddie.gr>.
- [105] ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ppcr.gr/>.
- [106] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, «Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2017-2026 (Προκαταρκτικό Σχέδιο),» Δεκέμβριος 2015.
- [107] Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ΑΕ, «Μηνιαίο Δελτίο Συστήματος Συναλλαγών ΗΕΠ,» Ιούλιος 2016.
- [108] ΛΑΓΗΕ, «Μηνιαία Δελτία Συναλλαγών ΗΕΠ», <http://www.lagie.gr/agora/analysis-agoras/miniaia-deltia-iep/>.
- [109] ΔΕΔΔΗΕ, «Μηνιαία Δελτία ΑΠΕ και Θερμικής Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά,» www.deddie.gr.
- [110] ΑΔΜΗΕ, Μηνιαία Δελτία Ενέργειας, <http://www.admie.gr/deltia-agoras/miniaia-deltia-energeias/>
- [111] ΛΑΓΗΕ, «Μηνιαία Στατιστικά Δελτία ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ», <http://www.lagie.gr/systema-eggymenon-timon/ape-sithya/miniaia-statistika-deltia-ape-sithya/>.
- [112] Απόφαση Υπουργού Φ1/οικ. 19598/1.10.2010 «Απόφαση για την επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και την κατανομή της στο χρόνο μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», ΦΕΚ Β' 1630/11.10.2010.
- [113] ΥΠΕΚΑ, «5η ΕΘΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟ ΕΤΟΣ 2010,» Σεπτέμβριος 2009.
- [114] ΑΔΜΗΕ, «Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την Περίοδο 2013 – 2020,» Οκτώβριος 2013.

- [115] ΔΕΣΜΗΕ, «Προβλέψεις Ζήτησης Ενέργειας και Ισχύος και Δυνατότητες Κάλυψης της Ζήτησης στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΣΜ), Περίοδος: 2003-2007,» Δεκέμβριος 2002.
- [116] ΔΕΣΜΗΕ, «Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ) περιόδου 2008-2012,» www.admie.gr, Ιούλιος 2008.
- [117] ΔΕΣΜΗΕ, «Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ) περιόδου 2010-2014,» www.admie.gr.
- [118] ΔΕΣΜΗΕ, «Ανάπτυξη του Εθνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς, περίοδος: 2001-2005,» www.admie.gr, Μάιος 2002.
- [119] International Energy Agency (IEA), [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/>.
- [120] European Commission, «Energy prices and costs in Europe», Communication (2014).
- [121] C. Cartalis, A. Synodinou, M. Proedrou, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, "Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region", Energy Conversion and Management 42 (14) (2001) 1647–1656.
- [122] Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.hnms.gr>.
- [123] OECD Statistics, «Historical population data and projections (1950-2050) ».
- [124] Eurostat, «Unemployment rate by sex and age - annual average».
- [125] European Commission, «The 2015 Ageing Report - Underlying Assumptions and Projection Methodologies», 2014.
- [126] ODYSSEE-MURE, «Definition of ODEX indicators in ODYSSEE data base», <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/odex-indicators-database-definition.pdf>
- [127] Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.), [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.statistics.gr/>.
- [128] Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://el.wikipedia.org/>.
- [129] AIMMS Website, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://aimms.com/>