



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ»***

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Κολλιάρου Αλέξανδρου

Επιβλέπων

Παντελής Κάπρος, Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

Πίνακας περιεχομένων.....	2
Σύνοψη – Περίληψη (Ελληνικά).....	4
Σύνοψη – Περίληψη (Αγγλικά).....	6
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	8
1.1 Σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας για την Ε.Ε.....	8
1.2 Νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις για τα ενεργειακά συστήματα.....	8
1.3 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας.....	10
Κεφάλαιο 2 – Bottom-Up μοντέλο εκτίμησης αναγκών ενέργειας πρότυπης κατοικίας.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Κατηγοριοποίηση των νοικοκυριών.....	11
2.3 Bottom-Up μοντέλο προσέγγισης των ενεργειακών αναγκών της πρότυπης κατοικίας για το έτος 2015.....	11
2.3.1 Προσδιορισμός αναγκών και τελικής κατανάλωσης για θέρμανση (χρήση μεθοδολογίας TABULA).....	12
2.3.2 Προσδιορισμός αναγκών και τελικής κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης (ZNX) (χρήση μεθοδολογίας TABULA).....	19
2.3.3 Προσδιορισμός αναγκών και τελικής κατανάλωσης ενέργειας για κλιματισμό (χρήση μεθοδολογίας TABULA).....	21
2.3.4 Προσδιορισμός τελικής κατανάλωσης ενέργειας των τυπικών ηλεκτρικών συσκευών στο νοικοκυριό.....	23
2.3.5 Συγκεντρωτικά προφίλ θερμικών και ηλεκτρικών ενεργειακών αναγκών κατά τη διάρκεια του έτους.....	24
2.4 Τιμές καυσίμου και ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του έτους.....	28
Κεφάλαιο 3 – Σενάρια συνδυασμού συστημάτων παραγωγής.....	30
3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Σενάριο 1 ^ο : Αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP).....	30
3.2.1 Αντλία θερμότητας χωρίς αποθήκευση ενέργειας.....	30
3.2.2 Αντλία θερμότητας με θερμική αποθήκευση ενέργειας.....	31
3.2.3 Αντλία θερμότητας με χημική αποθήκευση ενέργειας.....	32
3.3 Σενάριο 2 ^ο : Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler).....	33
3.3.1 ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα χωρίς αποθήκευση ενέργειας.....	33
3.3.2 ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα με θερμική αποθήκευση ενέργειας.....	34
3.3.3 ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα με χημική αποθήκευση ενέργειας.....	35
3.4 Σενάριο 3 ^ο : Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) και αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler).....	36
3.4.1 ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητας χωρίς αποθήκευση ενέργειας.....	36

3.4.2 ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητας με θερμική αποθήκευση ενέργειας.....	37
3.4.3 ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητας με χημική αποθήκευση ενέργειας.....	38
Κεφάλαιο 4 – Αποτύπωση μοντέλου στο πρόγραμμα μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης GAMS.....	40
4.1 Εισαγωγή.....	40
4.2 Μαθηματικό μοντέλο σεναρίου 1.3 (αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκά και μπαταρία).....	40
4.3 Μαθηματικό μοντέλο σεναρίου 2.1 (ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα).....	43
4.4 Μαθηματικό μοντέλο σεναρίου 3.2 (ΣΗΘ, αντλία θερμότητας, βοηθητικός λέβητας και θερμική αποθήκευση).....	45
Κεφάλαιο 5 – Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης και τελική αξιολόγησή τους με τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ).....	52
5.1 Εισαγωγή.....	52
5.2 Σενάριο 1 ^ο : Αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP).....	52
5.2.1 Αποτελέσματα σεναρίου 1.1 (χωρίς αποθήκευση ενέργειας).....	52
5.2.2 Αποτελέσματα σεναρίου 1.2 (θερμική αποθήκευση ενέργειας).....	54
5.2.3 Αποτελέσματα σεναρίου 1.3 (χημική αποθήκευση ενέργειας).....	56
5.3 Σενάριο 2 ^ο : Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler).....	59
5.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου 2.1 (χωρίς αποθήκευση ενέργειας).....	59
5.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου 2.2 (θερμική αποθήκευση ενέργειας).....	61
5.3.3 Αποτελέσματα σεναρίου 2.3 (χημική αποθήκευση ενέργειας).....	63
5.4 Σενάριο 3 ^ο : Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) και αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler).....	67
5.4.1 Αποτελέσματα σεναρίου 3.1 (χωρίς αποθήκευση ενέργειας).....	68
5.4.2 Αποτελέσματα σεναρίου 3.2 (θερμική αποθήκευση ενέργειας).....	70
5.4.3 Αποτελέσματα σεναρίου 3.3 (χημική αποθήκευση ενέργειας).....	72
5.5 Αναλύσεις ευαισθησίας και τελική οικονομική αξιολόγηση των σεναρίων με τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ).....	76
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα.....	82
Βιβλιογραφία.....	84

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	«Οικονομική και ενεργειακή βελτιστοποίηση κτιρίου με συνδυασμό συστημάτων παραγωγής»
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Κολλιάρης Αλέξανδρος
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Παντελής Κάπρος, Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2015-2016

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας είναι να ελεγχθεί η ενεργειακή και οικονομική βιωσιμότητα μίας πρότυπης κατοικίας στην Ελλάδα για διάφορα σενάρια συνδυασμού συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται τρία διαφορετικά μοντέλα με συστήματα παραγωγής τα οποία στη συνέχεια συνδυάζονται με χρήση θερμικής ή χημικής αποθήκευσης. Στόχος είναι να αναδειχθεί η αξία της αποθήκευσης ενέργειας με κριτήριο το μέγιστο οικονομικό όφελος για το κτίριο. Στο πρώτο μέρος της εργασίας προσδιορίζεται η τελική κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση χρησιμοποιώντας ένα Bottom-Up μοντέλο. Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν στο έτος 2015, ενώ έχουν γίνει και ορισμένες παραδοχές, όπου δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία από στατιστικά δεδομένα. Στο δεύτερο μέρος του υπολογιστικού τμήματος της εργασίας γίνεται βελτιστοποίηση για τα διαφορετικά σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη τα τρέχοντα οικονομικά δεδομένα της αγοράς, και συνδυάζοντας όλα τα στοιχεία στο πρόγραμμα μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης GAMS. Τέλος, γίνεται οικονομική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ενώ πραγματοποιούνται και αναλύσεις ευαισθησίας για διάφορες μεταβλητές του προβλήματος.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ο έλεγχος της ενεργειακής και οικονομικής βιωσιμότητας μια πρότυπης κατοικίας για διαφορετικά σενάρια συνδυασμού συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Η Εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη, το θεωρητικό όπου αναλύεται η κατάσταση που επικρατεί στις μέρες μας στην Ευρώπη σχετικά με τα ενεργειακά δεδομένα και τις νεότερες τεχνολογίες στα ενεργειακά συστήματα και το υπολογιστικό, στο οποίο προσδιορίζεται η τελική κατανάλωση ενέργειας της κατοικίας και εξετάζονται τα εναλλακτικά σενάρια.

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τα πολύ-ενεργειακά συστήματα έχει αυξηθεί κατακόρυφα, καθώς αναμένεται να διαδραματίσουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση ενός βιώσιμου ενεργειακά μέλλοντος ιδίως με τον συνεχώς αυξανόμενο πληθυσμό στα αστικά κέντρα. Παρόλα αυτά παραμένει η αμφισβήτηση ως προς την ευελιξία και την αποδοτικότητα του συνδυασμού διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων. Αυτό έχει ως συνέπεια να υπάρχουν ελάχιστα μοντέλα ικανά να αποσαφηνίσουν τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν από την ενσωμάτωση των νέων ενεργειακών τεχνολογιών.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η εγκατάσταση τεχνολογιών πέραν των συμβατικών, όπως οι αντλίες θερμότητας, η συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, τα φωτοβολταϊκά πάνελ κ.α. για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών της πρότυπης κατοικίας. Η παραγόμενη ενέργεια θα αξιοποιείται για ιδιοκατανάλωση, ενώ επίσης θα υπάρχει η δυνατότητα χημικής ή θερμικής αποθήκευσης της περίσσειας. Η αποθηκευόμενη ενέργεια είτε θα καταναλώνεται από το ίδιο το κτίριο σε περιόδους με υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις είτε θα πωλείται στο δίκτυο.

Το υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται προσδιορισμός της τελικής κατανάλωσης ενέργειας της κατοικίας ανά χρήση και η κατανομή της σε όλη τη διάρκεια του έτους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα Bottom-Up μοντέλο αξιοποιώντας τη μεθοδολογία που προτείνεται από το TABULA, καθώς και την ηλεκτρονική βάση δεδομένων του. Οι υπολογισμοί αφορούν το έτος 2015, ενώ σε σημεία όπου δεν υπήρχαν στοιχεία από στατιστικά δεδομένα έχουν γίνει ορισμένες λογικές παραδοχές.

Στο δεύτερο μέρος των υπολογισμών παρουσιάζονται τα τρία βασικά σενάρια συνδυασμού συστημάτων παραγωγής καθένα από τα οποία εξετάζεται στη συνέχεια με χρήση θερμικής ή χημικής αποθήκευσης. Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας κάθε συστήματος και την ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους γίνεται χρήση του προγράμματος GAMS, ενώ όσον αφορά τις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος και των καυσίμων λαμβάνονται υπόψη τα τρέχοντα οικονομικά δεδομένα της αγοράς. Η τελική αξιολόγηση και σύγκριση των σεναρίων γίνεται με τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ), χρησιμοποιώντας τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη, ενώ πραγματοποιήθηκε και ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες μεταβλητές του προβλήματος.

Ως βασικό συμπέρασμα της εργασίας προκύπτει, ότι με βάση τα οικονομικά δεδομένα της αγοράς, η αποθήκευση ενέργειας δεν αποδεικνύεται οικονομικά συμφέρουσα για εγκαταστάσεις τόσο μικρής κλίμακας, όπως μια μονοκατοικία. Ωστόσο, μέσω των αναλύσεων ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώνεται πως η μελλοντική εξέλιξη της τεχνολογίας και η μεταβολή ορισμένων παραγόντων (κεφαλαιουχικά κόστη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, τιμή ηλεκτρισμού και καυσίμου) δύναται να καταστήσει βιώσιμη οικονομικά την αποθήκευση ενέργειας.

POST-GRADUATE THESIS: **«Economic and energy optimization of a building with combinations of multi-energy systems**

STUDENT: **Kolliaros Alexandros**

SUPERVISOR: **Pantelis Capros, Professor, School of Electrical and Computer Engineering**

ACADEMIC YEAR: **2015-2016**

Abstract

The objective of this Post-Graduate Thesis is the examination of the energy and economic viability of a standard dwelling in Greece for different scenarios of multi-energy systems combinations. More specifically, three different models of energy system combinations are put under examination which subsequently are coupled either with thermal or chemical energy storage. The goal is to highlight the value of energy saving setting as priority the maximum economical profit for the dwelling. On the first level, the final energy consumption for all uses is determined by using a bottom-up model. This job is done for year 2015, while some logical assumptions have also been made, when there were insufficient statistical data. The second level of the computational part is dedicated in the optimization of the different scenarios, taking into account the current prices of the energy market and combining the data using the mathematical programming and optimization GAMS program. Finally, economic evaluation of the results is done, whereas sensitivity analyses for different variables were also carried through.

Summary

The objective of this Post-Graduate Thesis is the examination of the energy and economic viability of a standard dwelling in Greece for different scenarios of multi-energy systems combinations. The thesis is divided into two parts, a theoretical one, where the current situation in Europe, regarding to the latest developments and the newer energy systems technologies, is analyzed and the computational part which aims at first to determine the final energy consumption of the building and then to examine the different scenarios.

During the last years, there is an increasing interest for multi-energy systems, where multiple energy vectors optimally interact with each other, as they are likely to play a more and more important role in delivering a sustainable energy future, particularly with the projected number of people living in cities constantly increasing. However, it is still arguable how much flexibility and efficiency from coupling different energy vectors is exploited in current energy systems. As a result, there are very few models capable of clearly explaining the benefits that can be derived from integration of contemporary technologies.

The present thesis examines the installation of technologies beyond conventional ones, such as air source heat pumps (ASHP), small scaled combination of heat and power (micro-CHP) and photovoltaics to cover the thermal and electrical energy needs of the standard dwelling. The produced energy will either be self-consumed, or stored using thermal energy storage tanks or batteries. The stored energy could be used by the building in periods of higher energy demands or sold to the electricity grid.

The computational part of the thesis is also divided into two sections. At first, the final energy consumption of the building for all end uses is determined and distributed throughout the year. On that purpose a bottom-up model is created, making use of the methodology proposed by TABULA and its electronical database, whereas in case of lack of statistical information logical assumptions have been made. The calculations are done for the year 2015.

Secondly, the three different basic scenarios are presented, each one of them subsequently coupled with thermal or chemical energy storage capabilities. For the optimization of function and the minimization of the annual operational cost of each system the GAMS program is used. The electricity and fuel prices used in the calculations follow the current energy market data. For the final evaluation and comparison of the scenarios the net present value (NPV) method is used taking into consideration the investment and operational costs of each system, whereas sensitivity analyses for different variables were also carried through.

The main finding and result of the Thesis is that the current market economic data prevent energy storage options from being economically advantageous, especially for small scale installations, as a single house. However, the sensitivity analyses that were carried out, provided as a result, that the future technology development and the change of specific factors (capital costs of energy saving technologies, electricity and fuel prices) are capable of rendering the energy storage options economically viable.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας για την Ε.Ε

Η αυξημένη εξάρτηση από τις εισαγωγές ενέργειας, οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι, η ανάγκη καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής καθώς και της αντιμετώπισης της οικονομικής κρίσης, αποτελούν σημαντικές δυσκολίες που συναντά η ΕΕ. Στρεφόμενη, όμως, στην ενεργειακή απόδοση και επιμένοντας στην επίτευξη των στόχων για την ενεργειακή εξοικονόμηση, έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της, μειώνοντας την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και περιορίζοντας τις εισαγωγές ενέργειας. Ταυτόχρονα, μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων ρύπων θερμοκηπίου με οικονομικώς αποδοτικό τρόπο. Η μετάβαση σε μία ενεργειακά αποδοτικότερη οικονομία αναμένεται, επίσης, να επιταχύνει την εξάπλωση καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων και να βελτιώσει την ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας στην Ένωση, δίνοντας ώθηση στην οικονομική ανάπτυξη και δημιουργώντας θέσεις εργασίας υψηλής ποιότητας σε διάφορους τομείς που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση.[1]

Η ενεργειακή απόδοση έχει μεγάλη σημασία και για τους πολίτες της ΕΕ. Τόσο οι ιδιώτες, όσο και οι επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν με δυσανεμία τους υψηλούς λογαριασμούς ενεργειακής κατανάλωσης. Συνεπώς, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί την καλύτερη μακροπρόθεσμα βιώσιμη λύση. Η μέση ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να αποφέρει οφέλη της τάξης των 1000 €/a ανά νοικοκυριό.[2]

Οι στόχοι αυτοί της ΕΕ έχουν εντείνει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τα πολύ-ενεργειακά συστήματα, καθώς ο συνδυασμός τους μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και τη διασφάλιση ενός βιώσιμου ενεργειακά μέλλοντος. Ωστόσο, η αμφισβήτηση για την ευελιξία των συστημάτων αυτών παραμένει, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ελάχιστα μοντέλα ικανά να αποσαφηνίσουν τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν από την ενσωμάτωση των νέων ενεργειακών τεχνολογιών.[3]

1.2 Νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις για τα ενεργειακά συστήματα

Σημαντικές προσπάθειες γίνονται παγκοσμίως, τόσο σε επίπεδο έρευνας, όσο και σε επίπεδο πολιτικών πρωτοβουλιών, για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή ηλεκτρισμού από το ηλεκτρικό δίκτυο. Χαρακτηριστική περίπτωση, είναι η εφαρμογή καινοτόμων ιδεών, όπως το 'έξυπνο' δίκτυο σε πολλές χώρες.[4] Ωστόσο, οι απαιτητικοί περιβαλλοντικοί στόχοι και η ανάγκη εξασφάλισης ασφαλούς και οικονομικά προσιτής ενέργειας στις παρούσες και τις μελλοντικές γενιές υπαγορεύουν την υιοθέτηση στρατηγικών που να αφορούν όλους τους ενεργειακούς τομείς, όχι μόνο τον ηλεκτρισμό.[5] Τέτοιοι, είναι η παροχή θέρμανσης και ψύξης,

όπως και οι μεταφορές, που αντιπροσωπεύουν μεγάλα ποσοστά ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών αερίων ρύπων, στηρίζονται στη χρήση πρωτογενών μορφών καυσίμου και η απεξάρτηση της παραγωγής τους από αυτά είναι σαφώς δυσκολότερη.[6,7] Έτσι, από αυτή τη σκοπιά, κλειδί για την εξασφάλιση ενός καθαρότερου και βιώσιμου ενεργειακά μέλλοντος είναι η κατανόηση και η ενσωμάτωση πολύ-ενεργειακών συστημάτων, όπου όλοι οι παραπάνω ενεργειακοί τομείς (ηλεκτρισμός, καύσιμα, θέρμανση, ψύξη, μεταφορές) ιδανικά, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.[8,9]

Η πιο απλή περίπτωση πολύ-ενεργειακού συστήματος είναι η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ – CHP ‘combined heat and power’), από την οποία παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα με χρήση μιας πηγής καυσίμου, συνήθως φυσικού αερίου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, σε σύγκριση με την ξεχωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι ευρέως διαδεδομένα, καθώς χάρη στην εξοικονόμηση ενέργειας εξασφαλίζει τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά οφέλη.[10,11]

Οι ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας (EHP – electric heat pumps) θεωρούνται επίσης μια οικονομικότερη και ενεργειακά αποδοτικότερη εναλλακτική σε σύγκριση με τους συμβατικούς λέβητες θερμότητας. Αυτό συμβαίνει, διότι λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα και έτσι μπορούν να συμβάλουν στην απεξάρτηση από τη χρήση καυσίμου για την παραγωγή θερμότητας. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτής της συμβολής εξαρτάται και από την εξάρτηση του δικτύου από τα συμβατικά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ρεύματος. Επιπλέον, η ευρεία ενσωμάτωση των αντλιών θερμότητας θα προκαλούσε έντονη αύξηση ηλεκτρικού φορτίου, με συνέπεια να απαιτούνται επιπρόσθετες επενδύσεις στην υποδομή του ηλεκτρικού δικτύου.[12]

Τα συμβατικά συστήματα ΣΗΘ μικρής και μεσαίας κλίμακας έχουν πολύ μικρή ευελιξία στο να ανταποκρίνονται στην μεταβαλλόμενη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς το βασικό τους καθήκον είναι να καλύπτουν την ηλεκτρική και θερμική ζήτηση. Για το λόγο αυτό η αξία του συνδυασμού τους με θερμική αποθήκευση ενέργειας (TES – thermal energy storage) ή χημική αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες έχει αναγνωριστεί και χρησιμοποιείται σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Δανία, η Σουηδία και η Γερμανία, ενώ και άλλες όπως η Αγγλία έχουν αρχίσει να ακολουθούν τη συγκεκριμένη πολιτική.[3,13]

Ενώ τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας είναι σχετικά ξεκάθαρα, υπάρχει περιορισμένη αντίληψη της ενεργειακής προοπτικής από το συνδυασμό της ΣΗΘ με αντλίες θερμότητας. Ο συνδυασμός αυτός παρέχει αξιοσημείωτη ευελιξία στο σύστημα, ώστε να ανταποκριθεί στις ενεργειακές ανάγκες και τις μεταβολές στις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος.[14,15] Ήδη, αρκετές έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η συνύπαρξη των συστημάτων αυτών σε συνδυασμό με την χρήση αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να αποτελέσει την ιδανική λύση για την αποδοτικότερη και οικονομικότερη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στο μέλλον.[16] Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν ακόμα εκτεταμένες πρακτικές εφαρμογές ή εξειδικευμένα μοντέλα τέτοιων συνδυασμών ενεργειακών συστημάτων, με αποτέλεσμα οι ακριβείς δυνατότητες αυτών των εγχειρημάτων να παραμένουν ακόμα θολές.[6,7]

1.3 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να πραγματοποιήσει μια πρώτη προσέγγιση εφαρμογής των συστημάτων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.2 σε μία τυπική κατοικία στην Ελλάδα. Στόχος, είναι να εξεταστεί, η βιωσιμότητα τέτοιων εγχειρημάτων κυρίως από οικονομική σκοπιά και να δοθεί αφορμή για περαιτέρω έρευνα τόσο σε περιβαλλοντικό επίπεδο όσο και σε μεγαλύτερης κλίμακας έργα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒOTTOM-UP ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας εργασίας αναπτύσσεται ένα ενεργειακό Bottom-Up μοντέλο που στόχο έχει τον υπολογισμό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας της πρότυπης κατοικίας και στη συνέχεια η κατανάλωση αυτή κατανέμεται σε όλη τη διάρκεια του έτους, δίνοντας έτσι την ετήσια χρονολογική καμπύλη φορτίου (θερμικού και ηλεκτρικού).

Αρχικά, λοιπόν, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των νοικοκυριών σε τάξεις βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που τα προσδιορίζουν και γίνεται η επιλογή του τυπικού νοικοκυριού για το οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Έπειτα, με χρήση της μεθοδολογίας του TABULA προκύπτει η ωφέλιμη (useful energy consumption) και τελική κατανάλωση ενέργειας (final energy consumption) ανά τελική χρήση για το νοικοκυριό που επιλέχθηκε. Η εργασία αυτή πραγματοποιείται για το έτος 2015.

Τέλος, για την κατανομή της ζήτησης ενέργειας σε όλη τη διάρκεια του έτους ορίστηκαν τρία είδη τυπικών ημερών, η καθημερινή (weekday), το Σάββατο (saturday) και η Κυριακή-αργία (sunday). Με τη βοήθεια στατιστικών στοιχείων και λογικών παραδοχών προσδιορίστηκε για κάθε τύπο ημέρας και για κάθε χρήση η ζήτηση ενέργειας στη διάρκεια του 24ώρου και στη συνέχεια αυτό το ενεργειακό προφίλ επεκτάθηκε για την κάλυψη των 365 ημερών του έτους.

2.2 Κατηγοριοποίηση των νοικοκυριών

Είναι κατανοητό ότι η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του οικιακού κτιριακού αποθέματος διαφέρουν εντός των συνόρων μιας χώρας. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής η κατηγοριοποίηση έγινε στις παρακάτω διαστάσεις:

- Βαθμός αστικοποίησης: Νοικοκυριά που βρίσκονται σε αστικές περιοχές (urban), νοικοκυριά που βρίσκονται σε ημι-αστικές περιοχές (semi-urban), και νοικοκυριά που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές (rural).
- Τύπος νοικοκυριού: διαμέρισμα - πολυκατοικία (multi-family household), μονοκατοικία (single family household).
- Έτος κατασκευής: Ορίζονται πέντε ηλικιακές κατηγορίες: κατοικίες που χτίστηκαν πριν το 1970, κατοικίες που χτίστηκαν στο διάστημα 1971 – 1980, κατοικίες που χτίστηκαν στο διάστημα 1981 – 1990 (δεκαετία θέσπισης οικοδομικών κανόνων), κατοικίες που χτίστηκαν στο διάστημα 1991 – 2000, κατοικίες που χτίστηκαν στο διάστημα 2001 – 2010 (δεκαετία θέσπισης οικοδομικών κανόνων).

- Εισόδημα: Νοικοκυριά με υψηλό (high income class), μεσαίο (mid income class) και χαμηλό εισόδημα (low income class).

Η πρότυπη κατοικία που επιλέχθηκε να μελετηθεί για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας είναι μονοκατοικία (single family household), βρίσκεται εντός της Αττικής αλλά εκτός του κέντρου της Αθήνας (αστική περιοχή-urban) και το έτος κατασκευής της περιλαμβάνεται στο διάστημα 1991 – 2000. Από τα στατιστικά δεδομένα της ηλεκτρονικής βιβλιοθήκης του TABULA το μέσο εμβαδό ενός τέτοιου νοικοκυριού κυμαίνεται περί τα 89 m² και οι υπολογισμοί έγιναν για μια τετραμελή οικογένεια με μέσο ετήσιο εισόδημα (mid income class).

2.3 Bottom – Up μοντέλο προσέγγισης των ενεργειακών αναγκών της τυπικής κατοικίας για το έτος 2015

Έχοντας συγκεντρώσει όλα τα απαραίτητα δεδομένα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς, προσδιορίζονται σε πρώτη φάση οι ανάγκες και η τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης, κλιματισμό και συσκευές (μόνο τελική κατανάλωση ενέργειας) της τυπικής κατοικίας, σύμφωνα με μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί ακολούθως.

Στη συνέχεια, και προκειμένου να διαφοροποιηθεί η συμπεριφορά της τυπικής κατοικίας για κάθε επιμέρους ενεργειακή ανάγκη χρησιμοποιούνται δείκτες που επηρεάζουν ή/ και οδηγούν την εκάστοτε κατανάλωση ενέργειας. Έτσι ενώ η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση (μετρούμενη σε kWh/m²) εξαρτάται σίγουρα από την ποιότητα και την κατάσταση της κατοικίας (θερμική συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους – U Value, είδος και απόδοση συστήματος θέρμανσης), η ωφέλιμη και τελική κατανάλωση ενέργειας για ζεστό νερό χρήσης, κλιματισμό και συσκευές (μετρούμενες σε kWh/dwelling) εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση του νοικοκυριού (GDP/capita), καθώς αυτός ο δείκτης καθορίζει τόσο τις συμπεριφορές κατά τη λειτουργία ή/και χρήση (ώρες λειτουργίας/έτος) όσο και το ποσοστό ιδιοκτησίας που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία νοικοκυριού.

Αυτό όμως που εξασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση είναι ότι η ωφέλιμη κατανάλωση ενέργειας της τυπικής κατοικίας, δηλαδή οι εκάστοτε ανάγκες της είναι οι βέλτιστες δυνατές και μεγιστοποιούν τη χρησιμότητα που απολαμβάνουν οι καταναλωτές. Ουσιαστικά δηλαδή διασφαλίζεται ότι οι ένοικοι θέλουν να νιώθουν θερμική άνεση το χειμώνα και δροσιά το καλοκαίρι και θέλουν να έχουν αφθονία ζεστού νερού χρήσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Για τις διάφορες συσκευές δεν μπορεί να οριστεί η έννοια ωφέλιμης ενέργειας σε τιμές ενέργειας καθώς ανά περίπτωση λαμβάνει διαφορετική σημασία (πχ. η ωφέλιμη ενέργεια στην περίπτωση του μαγειρέματος είναι η ποσότητα του φαγητού ή στην περίπτωση του πλυντηρίου ρούχων ωφέλιμη ενέργεια θεωρούνται τα καθαρά ρούχα). Φυσικά για να καλύψει αυτές τις ανάγκες το νοικοκυριό θα έπρεπε να καταναλώνει μεγάλα ποσά τελικής ενέργειας. Η ενέργεια όμως που τελικά καταναλώνει μπορεί να είναι διαφορετική, πράγμα που σημαίνει ότι δεν καλύπτει τελικά όλες του τις ανάγκες ή αυτοπεριορίζεται για να κάνει οικονομία.

2.3.1 Προσδιορισμός αναγκών και τελικής κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση (χρήση μεθοδολογίας TABULA)

Το TABULA (Typology approach for Building Stock Energy Assessment) [17] είναι ένα έργο της Intelligent Energy Europe IEE το οποίο σχεδιάστηκε με σκοπό να αποτελέσει τη βάση για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τύπων κτιρίων (ως προς το έτος κατασκευής, την κατάσταση, τον τύπο κ.ά) που συναντώνται σε κάθε κράτος. Για τον λόγο αυτό περιέχει μια εκτενή βάση δεδομένων με στοιχεία για τα χαρακτηριστικά του κελύφους, των συστημάτων θέρμανσης και ζεστού νερού κ.ά, η οποία όμως σε αυτήν τη φάση περιλαμβάνει μόνο 13 από τις 28 χώρες της ΕΕ.

Επίσης, το TABULA προτείνει μία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των αναγκών και της τελικής κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης. Ειδικά σε ότι αφορά την μεθοδολογία που προτείνει για τον υπολογισμό των αναγκών θέρμανσης, αυτή, βασίζεται στην εποχική μέθοδο που προτείνεται από το EN ISO 13790 «Energy Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Space Heating» στη βάση μοντέλων μίας ζώνης.

Για την μέση τυπική κατοικία κάθε χώρας χρησιμοποιείται ο ακόλουθος υπολογισμός:

Οι ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου (ωφέλιμη ενέργεια), $Q_{H,nd}$ [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.1):

$$Q_{H,nd} = Q_{ht} - \eta_{h,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (2.1)$$

όπου:

$Q_{H,nd}$ [kWh/a]: οι ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου, θεωρούμενες ότι είναι μεγαλύτερες του 0,

Q_{ht} [kWh/a]: η συνολική μεταφορά θερμότητας από το κτίριο όπως ορίζεται από τη σχέση ,

$Q_{H,gn}$ [kWh/a]: τα συνολικά θερμικά κέρδη από το κτίριο

$\eta_{h,gn}$: αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης των θερμικών κερδών

Η συνολική μεταφορά θερμότητας από το κτίριο, Q_{ht} [kWh/a] δίνεται από τη σχέση (2.2):

$$Q_{ht} = Q_{ht,tr} + Q_{ht,ve} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot (H_{tr} + H_{ve}) \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,hs}}) \cdot d_{hs} \quad (2.2)$$

όπου:

$Q_{ht,tr}$ [kWh/a]: η συνολική μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής από το κέλυφος κατά την περίοδο θέρμανσης,

$Q_{ht,ve}$ [kWh/a]: η συνολική μεταφορά θερμότητας δια κυκλοφορίας από το κέλυφος κατά την περίοδο θέρμανσης,

H_{tr} [W/K]: ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής,

F_{nu} : αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη την ανομοιόμορφη θέρμανση με βάση τις συνεχείς διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μέσα στη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας,

θ_{int} [°C]: η εσωτερική θερμοκρασία στην περίοδο θέρμανσης,

$\overline{\theta_{e,hs}}$ [°C]: η μέση εξωτερική θερμοκρασία την περίοδο θέρμανσης,

d_{hs} [d/a]: η διάρκεια της περιόδου θέρμανσης εκφρασμένη σε ημέρες.

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας διά συναγωγής, $Q_{ht,tr}$ [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.3):

$$Q_{ht,tr} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot H_{tr} \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,hs}}) \cdot d_{hs} \quad (2.3)$$

Και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά συναγωγής, H_{tr} [W/K] από την ακόλουθη σχέση (2.4):

$$H_{tr} = \sum_i b_{tr,i} A_{env,i} U_{eff,i} + \left(\sum_i A_{env,i} \right) \cdot \Delta U_{ibr} \quad (2.4)$$

όπου:

b_{tr} : συντελεστής προσαρμογής των απωλειών θερμότητας προς το έδαφος,

$A_{env,i}$ [m²]: η επιφάνεια του δομικού στοιχείου i (επειδή όμως εμείς στην ανάλυση που κάνουμε δεν διαχωρίζουμε το κτίριο σε δομικά στοιχεία, απλά το θεωρούμε μια ενιαία οντότητα, επιφάνειας 1m²),

$U_{eff,i}$ [W/m²K]: ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του δομικού στοιχείου i (στην ανάλυσή μας θεωρούμε ότι αφορά τον συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους),

ΔU_{ibr} [W/m²K]: προσαύξηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους, προκειμένου να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες θερμότητας μέσω των θερμογεφυρών.

Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους $U_{eff,i}$ [W/m²K] (όπου για τον υπολογισμό του λαμβάνονται υπόψη τυχόν επιπλέον θερμικές αντιστάσεις λόγω γεινίασης με μη θερμαινόμενους χώρους ή την ύπαρξη επιπλέον υλικού από ανακαίνιση που μπορεί να είχε γίνει στο παρελθόν) δίνεται από τη σχέση:

$$U_{eff,i} = \frac{1}{R_{eff,i}} = \frac{1}{R_{0,i} + R_{measure,i} + R_{add,i}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{0,i}} + \frac{d_{ins,i}}{L_{ins,i}} + R_{add,i}} \quad (2.5)$$

όπου:

$R_{eff,i}$ [m²K/W]: η θερμική αντίσταση του κελύφους,

$R_{0,i}$ [m²K/W]: η θερμική αντίσταση του κελύφους στην αρχική κατάσταση,

$U_{0,i}$ [W/m²K]: η θερμική διαπερατότητα του κελύφους στην αρχική κατάσταση,

$R_{measure,i} = \frac{d_{ins,i}}{L_{ins,i}}$ [m²K/W]: η θερμική αντίσταση που προστίθεται σε περίπτωση που έχει

εφαρμοσθεί ήδη κάποιο μέτρο ανακαίνισης στο υπό μελέτη κτίριο,

$R_{add,i}$ [m²K/W]: η επιπλέον θερμική αντίσταση λόγω της γειτνίασης με μη θερμαινόμενους χώρους.

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας διά κυκλοφορίας, $Q_{ht,ve}$ [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.6):

$$Q_{ht,ve} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot H_{ve} \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,hs}}) \cdot d_{hs} \quad (2.6)$$

και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά συναγωγής, H_{ve} [W/K] από την ακόλουθη σχέση (2.7):

$$H_{ve} = c_{p,air} \cdot (n_{air,use} + n_{air,infilitr}) \cdot A_{C,ref} \cdot h_{room,ve,ref} \quad (2.7)$$

όπου:

$c_{p,air} = 0.34$ Wh/m³K: ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα,

$n_{air,use}$ [1/h]: μέσος ρυθμός εναλλαγής του αέρα κατά την περίοδο θέρμανσης (θεμιτός αερισμός),

$n_{air,infilitr}$ [1/h]: μέσος ρυθμός διείσδυσης αέρα (αθέμιτος αερισμός),

$A_{C,ref}$ [m²]: η επιφάνεια αναφοράς του κτιρίου.

Τα συνολικά θερμικά κέρδη κατά της περίοδο θέρμανσης, $Q_{H,gn}$ [kWh/a] δίνονται από τη σχέση (2.8):

$$Q_{H,gn} = Q_{sol} + Q_{int} \quad (2.8)$$

Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη κατά την περίοδο θέρμανσης, Q_{int} [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.9):

$$Q_{int} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot \varphi_{int} \cdot d_{hs} \cdot A_{C,ref} \quad (2.9)$$

όπου: φ_{int} [W/m²]: η μέση θερμική ισχύς από διάφορες πηγές εντός του κελύφους.

Τα ηλιακά θερμικά κέρδη την περίοδο θέρμανσης, Q_{sol} [kWh/m²a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.10):

$$Q_{sol} = F_{sh} \cdot (1 - F_F) \cdot F_W \cdot g_{gl,n} \cdot \sum_j A_{window,j} \cdot I_{sol,j} \quad (2.10)$$

όπου:

F_{sh} : μειωτικός συντελεστής λόγω των εξωτερικών σκιάστρων,

F_F : το πλαίσιο του παραθύρου ως ποσοστό όλου του παραθύρου,

F_W : μειωτικός συντελεστής θεωρώντας ότι δεν πέφτει όλη η ακτινοβολία κατακόρυφα στο παράθυρο,

$g_{gl,n}$: ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας κατακόρυφης στο παράθυρο,

$A_{window,j}$ [m²]: η επιφάνεια που καλύπτουν όλα τα παράθυρα του κελύφους για κάθε προσανατολισμό j (εμείς θεωρούμε ότι η επιφάνεια των παραθύρων είναι ένα ποσοστό της συνολικής επιφάνειας τους κελύφους, ενώ επίσης δε διαχωρίζουμε ως προς τους προσανατολισμούς),

$I_{sol,j}$ [kWh/m²a]: μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επιφάνειες με προσανατολισμό j για την περίοδο θέρμανσης.

Ο αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης των θερμικών κερδών για θέρμανση, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (2.11):

$$\eta_{h,gn} = \frac{1 - \gamma^{\alpha_H}}{1 - \gamma^{\alpha_H + 1}} \quad (2.11)$$

όπου:

$$\gamma_{h,gn} = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{ht}} \text{ , το ποσοστό θερμικής ισορροπίας} \quad (2.12)$$

$$\alpha_H = \alpha_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \text{ , παράμετρος} \quad (2.13)$$

όπου:

$\alpha_{H,0} = 0.8$: σταθερή παράμετρος (EN ISO 13790),

$\tau_{H,0} = 30$ h : σταθερή παράμετρος (EN ISO 13790),

$$\tau = \frac{c_m \cdot A_{C,ref}}{H_{tr} + H_{ve}} \text{ [h]: χρονική σταθερά του κτιρίου που προσδιορίζει πόσο γρήγορα συμβαίνουν οι}$$

απώλειες θερμότητας στο κτίριο.

όπου:

c_m [Wh/m²K]: η εσωτερική θερμική ικανότητα ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας

Για τον προσδιορισμό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση απαιτείται η γνώση του βαθμού απόδοσης του συστήματος θέρμανσης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

Η τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση από τη λειτουργία συστήματος i , $q_{del,h,i}$ [kWh/m²a] δίνεται από την ακόλουθη σχέση (2.14):

$$q_{del,h,i} = \alpha_{nd,h,i} \cdot q_{g,h,out} \cdot e_{g,h,i} \quad (2.14)$$

όπου:

$\alpha_{nd,h,i}$: το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρει κάθε σύστημα i για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης,

$q_{g,h,out}$ [kWh/m²a]: η ενέργεια στη έξοδο του συστήματος θέρμανσης,

$e_{g,h,i}$: ο αντίστροφος λόγος του βαθμού απόδοσης του συστήματος θέρμανσης.

Η ενέργεια που δίνει το σύστημα θέρμανσης στην έξοδό του είναι το άθροισμα της ωφέλιμης ενέργειας και των απωλειών του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης, εφόσον υπάρχει και δίνεται από τη σχέση (2.15):

$$q_{g,h,out} = q_{nd,h} - \eta_{h,gn} \cdot (q_{w,h} + q_{ve,h,rec}) + q_{d,h} + q_{s,h} \quad (2.15)$$

όπου:

$q_{w,h}$ [kWh/m²a]: οι απώλειες θερμότητας του ζεστού νερού χρήσης (ZNX) που οφείλονται στο σύστημα μεταφοράς και αποθήκευσής του και οι οποίες ανακτώνται από τους χώρους εντός του κελύφους, όπως αυτές προσδιορίζονται από τη σχέση (2.16),

$q_{ve,h,rec}$ [kWh/m²a]: η συνεισφορά στη θέρμανση από τη μονάδα αερισμού, όπως αυτή προσδιορίζεται από τη σχέση (2.17),

$q_{d,h}$ [kWh/m²a]: οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα διανομής της θέρμανσης,

$q_{s,h}$ [kWh/m²a]: οι απώλειες θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης της θέρμανσης (εφόσον υπάρχει).

Το κομμάτι των θερμικών απωλειών του συστήματος ZNX, που συμβαίνουν μέσα στο κέλυφος και ανακτώνται προς όφελος του συστήματος θέρμανσης, δίνονται από την σχέση (2.16):

$$q_{w,h} = q_{g,w,h} + q_{s,w,h} + q_{d,w,h} \quad (2.16)$$

όπου:

$q_{g,w,h}$ [kWh/m²a]: η ανακτώμενη απώλεια θερμότητας από το σύστημα για ZNX,

$q_{s,w,h}$ [kWh/m²a]: η ανακτώμενη απώλεια θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης του ZNX (εφόσον υπάρχει),

$q_{d,w,h}$ [kWh/m²a]: η ανακτώμενη απώλεια θερμότητας από το σύστημα διανομής του ZNX.

Η συνεισφορά στη θέρμανση από τη μονάδα αερισμού, δίνεται από τη σχέση (2.17):

$$q_{ve,h,rec} = \eta_{ve,rec} \cdot q_{ht,ve} \quad (2.17)$$

όπου:

$\eta_{ve,rec}$ [kWh/m²a]: ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ανάκτησης θερμότητας.

Αναφέρεται εδώ ότι οι βαθμομέρες θέρμανσης, για την Ελλάδα το έτος 2015, σύμφωνα με την ηλεκτρονική βιβλιοθήκη της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (EUROSTAT), είναι 1588,65.[17] Οι βαθμομέρες θέρμανσης είναι ένα μέτρο του για πόσες μέρες και με πόσους βαθμούς διαφορά η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την εσωτερική θερμοκρασία στην οποία διασφαλίζεται η θερμική άνεση.

Δεδομένου ότι μας ενδιαφέρει οι ανάγκες θέρμανσης να είναι διορθωμένες κλιματικά, και να βασίζονται της βαθμομέρες θέρμανσης, η μέση εξωτερική θερμοκρασία υπολογίστηκε βάσει της σχέσης (2.18).

$$\overline{\theta_{e,hs}} [^{\circ}C] = \theta_{int} [^{\circ}C] - \frac{HDD \left[\frac{d^{\circ}C}{a} \right]}{d_{h,s} \left[\frac{d}{a} \right]} \quad (2.18)$$

Θεωρήθηκε ότι στις πόλεις λόγω του μικροκλίματος οι εξωτερικές θερμοκρασίες και η περίοδος θέρμανσης είναι μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται στις ημι-αστικές και στις αγροτικές περιοχές ενώ παράλληλα οι ένοικοι επιθυμούν να έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες μέσα στα σπίτια τους.

Αναφορικά με το σύστημα θέρμανσης, αξίζει να αναφέρουμε ότι θεωρήθηκε ότι η μέση τυπική κατοικία της χώρας, έχει σύστημα θέρμανσης με βαθμό απόδοσης έναν μέσο βαθμό των διαφόρων συστημάτων που μπορεί να χρησιμοποιούν για θέρμανση τα νοικοκυριά της κάθε χώρας (λέβητας/καυστήρας πετρελαίου απλός, σταθερής θερμοκρασίας, χαμηλών θερμοκρασιών, συμπυκνωμάτων, λέβητας/καυστήρας φυσικού αερίου, τηλεθέρμανση, θέρμανση με αντλίες θερμότητας κ.ά), ενώ η διαφοροποίηση από κατηγορία σε κατηγορία (και δεδομένου ότι υπάρχει και η συγκεκριμένη διάσταση για το σύστημα θέρμανσης), έγινε με χρήση τυπικών τιμών που δίνονταν στη βάση δεδομένων του TABULA.

2.3.2 Προσδιορισμός αναγκών και τελικής κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης (ZNX) (χρήση μεθοδολογίας TABULA)

Η μεθοδολογία προσδιορισμού των αναγκών και της τελικής κατανάλωσης ενέργειας για ZNX, όπως αυτή προτείνεται από το TABULA, είναι η ακόλουθη.

Η τελική κατανάλωση ενέργειας για ZNX από τη λειτουργία συστήματος i , $q_{del,w,i}$ [kWh/m²a] δίνεται από την ακόλουθη σχέση (2.19):

$$q_{del,w,i} = \alpha_{nd,w,i} \cdot q_{g,w,out} \cdot e_{g,w,i} \quad (2.19)$$

όπου:

$\alpha_{nd,w,i}$: το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρει κάθε σύστημα i για την κάλυψη των αναγκών για ZNX (εμείς θεωρούμε ότι κάθε νοικοκυριό καλύπτεται από έναν τύπο συστήματος),

$q_{g,w,out}$ [kWh/m²a]: η ενέργεια στη έξοδο του συστήματος ZNX,

$e_{g,w,i}$: ο αντίστροφος λόγος του βαθμού απόδοσης του συστήματος ZNX.

Η ενέργεια που δίνει το σύστημα ZNX στην έξοδό του είναι το άθροισμα της ωφέλιμης ενέργειας και των απωλειών του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης, εφόσον υπάρχει και δίνεται από τη σχέση (2.20):

$$q_{g,w,out} = q_{nd,w} + q_{d,w} + q_{s,w} \quad (2.20)$$

όπου:

$q_{nd,w}$ [kWh/m²a]: οι ετήσιες ανάγκες για ZNX,

$q_{d,w}$ [kWh/m²a]: οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα διανομής ZNX,

$q_{s,w}$ [kWh/m²a]: οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης του ZNX (εφόσον υπάρχει).

Οι ετήσιες ανάγκες για ZNX της τυπικής κατοικίας κάθε χώρας λαμβάνονται από την βάση δεδομένων του TABULA, το μέγεθος αυτό όμως προσδιορίζεται σε μονάδες $kWh/dwelling$, καθώς η ζήτηση για ZNX δεν έχει τόσο νόημα να προσδιορίζεται ανά m² επιφάνειας του σπιτιού, αλλά για το σπίτι σε σύνολο, και εκφράζει όχι μόνο τη χρήση που γίνεται αλλά και την χρησιμότητα που προσφέρει. Επίσης η κατανάλωση για ZNX είναι άμεσα συσχετισμένη τόσο με την οικονομική κατάσταση του κάθε νοικοκυριού όσο και με το μέγεθός του.

Για τον λόγο αυτό, η ωφέλιμη ενέργεια για ZNX κάθε επιμέρους κατηγορίας νοικοκυριού προσδιορίζεται ως συνάρτηση των αναγκών της τυπικής κατοικίας και της οικονομικής κατάστασης του κάθε νοικοκυριού. Γίνεται δηλαδή χρήση ενός δείκτη που εκφράζει τη σχέση του (GDP/cap) κάθε νοικοκυριού σε σχέση με το μέσο τυπικό. Για $indicator(GDP/cap)_{avg} = 1$, ο $indicator(GDP/cap)_{category}$ μπορεί να είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος της μονάδας ανάλογα με το εάν η συγκεκριμένη κατηγορία αποτελείται από νοικοκυριά χαμηλότερης ή υψηλότερης αντίστοιχα οικονομικής κλάσης σε σχέση με το μέσο. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται επιπλέον η κατανομή των νοικοκυριών ανά κατηγορία (στοιχεία από Γραφήματα 7 – 10) και μια ελαστικότητα εισοδήματος της ζήτησης για ZNX $\varepsilon_{WH} = 0.6$. Τελικά, δηλαδή χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$q_{nd,w,category} = \left[\prod_i indic_{GDP,i} \right]^{0.6} \cdot q_{nd,w,avg} \quad (2.21)$$

όπου:

$$indic_{GDP,i} = \frac{indicator(GDP/cap)_i}{indicator(GDP/cap)_{avg}}, \quad \forall \quad i = urban, ageofconst, type, heattype .$$

Αναφορικά με τον τύπο και άρα και την απόδοση των συστημάτων ZNX, όπως και στην περίπτωση των συστημάτων θέρμανσης, θεωρήθηκε ότι η μέση τυπική κατοικία κάθε χώρας, έχει σύστημα ZNX με βαθμό απόδοσης, τον μέσο βαθμό των διαφόρων συστημάτων που μπορεί να χρησιμοποιούν για ZNX τα νοικοκυριά της κάθε χώρας (μπόιλερ πετρελαίου, μπόιλερ φυσικού αερίου, τηλεθέρμανση, ηλεκτρικές αντιστάσεις κ.ά). Οι τιμές των βαθμών απόδοσης των διαφόρων συστημάτων ZNX δίνονταν στη βάση δεδομένων του TABULA.

2.3.3 Προσδιορισμός αναγκών και τελικής κατανάλωσης ενέργειας για κλιματισμό (χρήση μεθοδολογίας TABULA)

Για τον υπολογισμό των αναγκών ενέργειας για κλιματισμό της τυπικής κατοικίας χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που προτείνεται επίσης από το TABULA, βασίζεται στην εποχική μέθοδο του EN ISO 13790 και είναι παρεμφερής με εκείνη για τον υπολογισμό των αναγκών σε θέρμανση.

Οι ανάγκες ψύξης του κτιρίου (ωφέλιμη ενέργεια), $Q_{H,nd}$ [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.22):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,gn} - \eta_{h,gn} \cdot Q_{ht} \quad (2.22)$$

όπου:

$Q_{H,nd}$ [kWh/a]: οι ανάγκες ψύξης του κτιρίου, θεωρούμενες ότι είναι μεγαλύτερες του 0,

Q_{ht} [kWh/a]: η συνολική μεταφορά θερμότητας από το κτίριο όπως ορίζεται από τη σχέση ,

$Q_{H,gn}$ [kWh/a]: τα συνολικά θερμικά κέρδη από το κτίριο

$\eta_{h,gn}$: αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης των θερμικών κερδών

Η συνολική μεταφορά θερμότητας από το κτίριο, Q_{ht} [kWh/a] δίνεται από τη σχέση (2.23):

$$Q_{ht} = Q_{ht,tr} + Q_{ht,ve} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot (H_{tr} + H_{ve}) \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,cs}}) \cdot d_{cs} \quad (2.23)$$

όπου:

$Q_{ht,tr}$ [kWh/a]: η συνολική μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής από το κέλυφος κατά την περίοδο ψύξης,

$Q_{ht,ve}$ [kWh/a]: η συνολική μεταφορά θερμότητας δια κυκλοφορίας από το κέλυφος κατά την περίοδο ψύξης,

H_{tr} [W/K]: ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής,

F_{nu} : αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη την ανομοιόμορφη θέρμανση με βάση τις συνεχείς διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μέσα στη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας,

θ_{int} [°C]: η εσωτερική θερμοκρασία στην περίοδο ψύξης,

$\overline{\theta_{e,cs}}$ [°C]: η μέση εξωτερική θερμοκρασία την περίοδο ψύξης,

d_{cs} [d/a]: η διάρκεια της περιόδου ψύξης εκφρασμένη σε ημέρες.

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας διά συναγωγής, $Q_{ht,tr}$ [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.24):

$$Q_{ht,tr} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot H_{tr} \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,cs}}) \cdot d_{cs} \quad (2.24)$$

Και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά συναγωγής, H_{tr} [W/K] από την ακόλουθη σχέση (2.25):

$$H_{tr} = \sum_i b_{tr,i} A_{env,i} U_{eff,i} + \left(\sum_i A_{env,i} \right) \cdot \Delta U_{ibr} \quad (2.25)$$

όπου:

b_{tr} : συντελεστής προσαρμογής των απωλειών θερμότητας προς το έδαφος,

$A_{env,i}$ [m²]: η επιφάνεια του δομικού στοιχείου i (επειδή όμως εμείς στην ανάλυση που κάνουμε δεν διαχωρίζουμε το κτίριο σε δομικά στοιχεία, απλά το θεωρούμε μια ενιαία οντότητα, επιφάνειας 1m²),

$U_{eff,i}$ [W/m²K]: ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του δομικού στοιχείου i (στην ανάλυσή μας θεωρούμε ότι αφορά τον συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους),

ΔU_{ibr} [W/m²K]: προσαύξηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους, προκειμένου να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες θερμότητας μέσω των θερμογεφυρών.

Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους $U_{eff,i}$ [W/m²K] (όπου για τον υπολογισμό του λαμβάνονται υπόψη τυχόν επιπλέον θερμικές αντιστάσεις λόγω γειννίασης με μη θερμαινόμενους χώρους ή την ύπαρξη επιπλέον υλικού από ανακαίνιση που μπορεί να είχε γίνει στο παρελθόν) δίνεται από τη σχέση:

$$U_{eff,i} = \frac{1}{R_{eff,i}} = \frac{1}{R_{0,i} + R_{measure,i} + R_{add,i}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{0,i}} + \frac{d_{ins,i}}{L_{ins,i}} + R_{add,i}} \quad (2.26)$$

όπου:

$R_{eff,i}$ [m²K/W]: η θερμική αντίσταση του κελύφους,

$R_{0,i}$ [m²K/W]: η θερμική αντίσταση του κελύφους στην αρχική κατάσταση,

$U_{0,i}$ [W/m²K]: η θερμική διαπερατότητα του κελύφους στην αρχική κατάσταση,

$R_{measure,i} = \frac{d_{ins,i}}{L_{ins,i}}$ [m²K/W]: η θερμική αντίσταση που προστίθεται σε περίπτωση που έχει

εφαρμοσθεί ήδη κάποιο μέτρο ανακαίνισης στο υπό μελέτη κτίριο,

$R_{add,i}$ [m²K/W]: η επιπλέον θερμική αντίσταση λόγω της γειτνίασης με μη θερμαινόμενους χώρους.

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας διά κυκλοφορίας, $Q_{ht,ve}$ [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.27):

$$Q_{ht,ve} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot H_{ve} \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,cs}}) \cdot d_{cs} \quad (2.27)$$

και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά συναγωγής, H_{ve} [W/K] από την ακόλουθη σχέση (2.28):

$$H_{ve} = c_{p,air} \cdot (n_{air,use} + n_{air,infilitr}) \cdot A_{C,ref} \cdot h_{room,ve,ref} \quad (2.28)$$

όπου:

$c_{p,air} = 0.34$ Wh/m³K: ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα,

$n_{air,use}$ [1/h]: μέσος ρυθμός εναλλαγής του αέρα κατά την περίοδο ψύξης (θεμιτός αερισμός),

$n_{air,infilitr}$ [1/h]: μέσος ρυθμός διείσδυσης αέρα (αθέμιτος αερισμός),

$A_{C,ref}$ [m²]: η επιφάνεια αναφοράς του κτιρίου.

Τα συνολικά θερμικά κέρδη κατά της περίοδο ψύξης, $Q_{H,gn}$ [kWh/a] δίνονται από τη σχέση (2.29):

$$Q_{H,gn} = Q_{sol} + Q_{int} \quad (2.29)$$

Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη κατά την περίοδο ψύξης, Q_{int} [kWh/a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.30):

$$Q_{int} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot \varphi_{int} \cdot d_{cs} \cdot A_{C,ref} \quad (2.30)$$

όπου: φ_{int} [W/m²]: η μέση θερμική ισχύς από διάφορες πηγές εντός του κελύφους.

Τα ηλιακά θερμικά κέρδη την περίοδο θέρμανσης, Q_{sol} [kWh/m²a] δίνονται από την ακόλουθη σχέση (2.31):

$$Q_{sol} = F_{sh} \cdot (1 - F_F) \cdot F_W \cdot g_{gl,n} \cdot \sum_j A_{window,j} \cdot I_{sol,j} \quad (2.31)$$

όπου:

F_{sh} : μειωτικός συντελεστής λόγω των εξωτερικών σκιάστρων,

F_F : το πλαίσιο του παραθύρου ως ποσοστό όλου του παραθύρου,

F_W : μειωτικός συντελεστής θεωρώντας ότι δεν πέφτει όλη η ακτινοβολία κατακόρυφα στο παράθυρο,

$g_{gl,n}$: ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας κατακόρυφης στο παράθυρο,

$A_{window,j}$ [m²]: η επιφάνεια που καλύπτουν όλα τα παράθυρα του κελύφους για κάθε προσανατολισμό j (εμείς θεωρούμε ότι η επιφάνεια των παραθύρων είναι ένα ποσοστό της συνολικής επιφάνειας τους κελύφους, ενώ επίσης δε διαχωρίζουμε ως προς τους προσανατολισμούς),

$I_{sol,j}$ [kWh/m²a]: μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επιφάνειες με προσανατολισμό j για την περίοδο ψύξης.

Ο αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης των θερμικών κερδών για θέρμανση, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (2.32):

$$\eta_{h,gn} = \frac{1 - \gamma^{-\alpha_H}}{1 - \gamma^{-(\alpha_H+1)}} \quad (2.32)$$

όπου:

$$\gamma_{h,gn} = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{ht}}, \text{ το ποσοστό θερμικής ισορροπίας} \quad (2.33)$$

$$\alpha_H = \alpha_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}}, \text{ παράμετρος} \quad (2.34)$$

όπου:

$\alpha_{H,0} = 0.8$: σταθερή παράμετρος (EN ISO 13790),

$\tau_{H,0} = 30$ h : σταθερή παράμετρος (EN ISO 13790),

$\tau = \frac{c_m \cdot A_{C,ref}}{H_{tr} + H_{ve}}$ [h]: χρονική σταθερά του κτιρίου που προσδιορίζει πόσο γρήγορα συμβαίνουν οι

απώλειες θερμότητας στο κτίριο.

όπου:

c_m [Wh/m²K]: η εσωτερική θερμική ικανότητα ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας

Για τον προσδιορισμό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη απαιτείται η γνώση του βαθμού απόδοσης του συστήματος ψύξης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

Η τελική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη από τη λειτουργία συστήματος i , $q_{del,h,i}$ [kWh/m²a] δίνεται από την ακόλουθη σχέση (2.35):

$$q_{del,h,i} = \alpha_{nd,h,i} \cdot q_{g,h,out} \cdot e_{g,h,i} \quad (2.35)$$

όπου:

$\alpha_{nd,h,i}$: το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρει κάθε σύστημα i για την κάλυψη των αναγκών ψύξης,

$q_{g,h,out}$ [kWh/m²a]: η ενέργεια στη έξοδο του συστήματος ψύξης,

$e_{g,h,i}$: ο αντίστροφος λόγος του βαθμού απόδοσης του συστήματος ψύξης.

Η ενέργεια που δίνει το σύστημα ψύξης στην έξοδό του είναι το άθροισμα της ωφέλιμης ενέργειας και των απωλειών του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης, εφόσον υπάρχει και δίνεται από τη σχέση (2.36):

$$q_{g,h,out} = q_{nd,h} - \eta_{h,gn} \cdot (q_{w,h} + q_{ve,h,rec}) \quad (2.36)$$

όπου:

$q_{w,h}$ [kWh/m²a]: οι απώλειες θερμότητας του ζεστού νερού χρήσης (ZNX) που οφείλονται στο σύστημα μεταφοράς και αποθήκευσής του και οι οποίες ανακτώνται από τους χώρους εντός του κελύφους, όπως αυτές προσδιορίζονται από τη σχέση (2.16),

$q_{ve,h,rec}$ [kWh/m²a]: η συνεισφορά στη ψύξη από τη μονάδα αερισμού, όπως αυτή προσδιορίζεται από τη σχέση (2.17),

$q_{d,h}$ [kWh/m²a]: οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα διανομής της ψύξης,

$q_{s,h}$ [kWh/m²a]: οι απώλειες θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης της ψύξης (εφόσον υπάρχει).

Το κομμάτι των θερμικών απωλειών του συστήματος ZNX, που συμβαίνουν μέσα στο κέλυφος και ανακτώνται προς όφελος του συστήματος θέρμανσης, δίνονται από την σχέση (2.37):

$$q_{w,h} = q_{g,w,h} + q_{s,w,h} + q_{d,w,h} \quad (2.37)$$

όπου:

$q_{g,w,h}$ [kWh/m²a]: η ανακτώμενη απώλεια θερμότητας από το σύστημα για ZNX,

$q_{s,w,h}$ [kWh/m²a]: η ανακτώμενη απώλεια θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης του ZNX (εφόσον υπάρχει),

$q_{d,w,h}$ [kWh/m²a]: η ανακτώμενη απώλεια θερμότητας από το σύστημα διανομής του ZNX.

Η συνεισφορά στη θέρμανση από τη μονάδα αερισμού, δίνεται από τη σχέση (2.38):

$$q_{ve,h,rec} = \eta_{ve,rec} \cdot q_{ht,ve} \quad (2.38)$$

όπου:

$\eta_{ve,rec}$ [kWh/m²a]: ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ανάκτησης θερμότητας.

Αναφέρεται εδώ ότι οι βαθμομέρες ψύξης, για την Ελλάδα το έτος 2015, σύμφωνα με την ηλεκτρονική βιβλιοθήκη της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (EUROSTAT), είναι 1045,12.[17] Οι βαθμομέρες ψύξης είναι ένα μέτρο του για πόσες μέρες και με πόσους βαθμούς διαφορά η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική θερμοκρασία στην οποία διασφαλίζεται η θερμική άνεση.

Δεδομένου ότι μας ενδιαφέρει οι ανάγκες ψύξης να είναι διορθωμένες κλιματικά, και να βασίζονται της βαθμομέρες ψύξης, η μέση εξωτερική θερμοκρασία υπολογίστηκε βάσει της σχέσης (2.39).

$$\overline{\theta_{e,cs}} [^{\circ}C] = \theta_{int} [^{\circ}C] - \frac{HDD \left[\frac{d^{\circ}C}{a} \right]}{d_{c,s} \left[\frac{d}{a} \right]} \quad (2.39)$$

2.3.4 Προσδιορισμός τελικής κατανάλωσης ενέργειας των τυπικών ηλεκτρικών συσκευών στο νοικοκυριό

Οι τυπικές συσκευές που υπάρχουν σχεδόν σε όλα τα νοικοκυριά και συνεπώς λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς για την πρότυπη κατοικία είναι[18]:

- Ηλεκτρικοί λαμπτήρες (LH)
- Συσκευές μαγειρέματος (ELC_COO)
- Ψυγεία (RF)
- Πλυντήριο ρούχων (CW)
- Πλυντήριο πιάτων (DW)
- Συσκευές σιδερώματος (IR)
- Συσκευές πληροφόρησης και επικοινωνίας (πχ. ηλεκτρονικοί υπολογιστές) (IC)
- Συσκευές ψυχαγωγίας (πχ. τηλεόραση) (EN)
- Μικροσυσκευές (SA)

		kW	cycles/year	kWh/year
ELC_COO	Ηλεκτρικό μαγείρεμα	2	209	836
RF	Ψυγείο	0.09		789
CW	Πλυντήριο ρούχων	1	105	210
DW	Πλυντήριο πιάτων	1	208	208
IC	Ενημέρωση και επικοινωνία	0.2		146
EN	Διασκέδαση	0.2		292
IR	Ηλεκτρικό σίδερο	1	104	208
SA	Μικροσυσκευές	0.04		29.2

Πίνακας 1: Τυπική ετήσια κατανάλωση ενέργειας για base case συσκευές.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι τυπικές χρήσεις και ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας των διαφόρων συσκευών όπως αυτές δίνονται στα εκάστοτε LoT, και αφορά στην κατανάλωση ενέργειας των συσκευών που ορίζονται στα LoT ως base case. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται ως έχουν για τον υπολογισμό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του τυπικού νοικοκυριού.

Ειδικά για την τελική κατανάλωση ενέργειας από τους λαμπτήρες χρησιμοποιείται μια λίγο διαφορετική προσέγγιση:

$$q_{del, lh} = lb_hh \cdot power_lb \cdot use_lh \cdot behave_lh \quad (2.40)$$

όπου:

lb_hh [lightbulbs/household]: το πλήθος των λαμπτήρων που είναι εγκατεστημένοι ανά νοικοκυριό

power_lb [kW/lightbulb]: η ισχύς των λαμπτήρων που είναι εγκατεστημένοι στα νοικοκυριά (θεωρείται ότι τα οι λαμπτήρες είναι φθορισμού ισχύος 20W)

use_lh [h/a]: οι ετήσιες ώρες λειτουργίας των λαμπτήρων.

2.3.5 Συγκεντρωτικά προφίλ θερμικών και ηλεκτρικών ενεργειακών αναγκών κατά τη διάρκεια του έτους

Με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στις ανωτέρω ενότητες υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις του τυπικού νοικοκυριού για θέρμανση (SH-space heating), ζεστό νερό χρήσης (WH-water heating), κλιματισμό (ACO-air cooling) και ηλεκτρισμό για τη λειτουργία των διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών. Οι τρεις πρώτες κατηγορίες συνθέτουν το θερμικό ενεργειακό προφίλ του νοικοκυριού και η τελευταία το ηλεκτρικό.

		kWh/sqm/year	kWh/year	kWth
SH	θέρμανση χώρου	117.06		9.87
WH	ζεστό νερό χρήσης		2282.34	1.89
ACO	κλιματισμός	70.62		5.95

Πίνακας 2: Τελικά αποτελέσματα ενεργειακών αναγκών για θέρμανση, ζεστό νερό και κλιματισμό

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μεθοδολογία των ενοτήτων 2.3.1-2.3.3 για τις ανάγκες θέρμανσης, ζεστού νερού χρήσης και κλιματισμού. Όπως φαίνεται, οι υπολογισμοί για τη θέρμανση και τον κλιματισμό κατέληξαν σε ένα νούμερο που αντιπροσωπεύει τη συνολική ενέργεια που απαιτείται στη διάρκεια του έτους ανηγμένη στο τετραγωνικό μέτρο, ενώ από τη μεθοδολογία για το ζεστό νερό προέκυψε απευθείας η συνολική ετήσια ενέργεια. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το εμβαδό της πρότυπης κατοικίας από την ηλεκτρονική βάση δεδομένων του TABULA καθώς και το προφίλ της ζήτησης για θέρμανση, ζεστό νερό και κλιματισμό

προκύπτει η θερμική ισχύς που πρέπει να είναι διαθέσιμη από τα ενεργειακά συστήματα για την κάλυψη των αναγκών της οικογένειας.

h \ td	weekday	saturday	sunday
00:00-06:00	-	-	-
06:00-07:00	+	-	-
07:00-08:00	+	+	-
08:00-10:00	-	+	+
10:00-13:00	-	-	+
13:00-15:00	-	+	+
15:00-17:00	+	+	+
17:00-19:00	-	-	-
19:00-20:00	+	-	-
20:00-23:00	+	+	+
23:00-24:00	-	-	-

Πίνακας 3: Προφίλ ζήτησης για θέρμανση χώρου (SH)

h \ td	weekday	saturday	sunday
00:00-07:00	-	-	-
07:00-08:00	+	-	-
08:00-14:00	-	-	-
14:00-16:00	-	+	+
16:00-17:00	+	-	-
17:00-19:00	-	-	-
19:00-20:00	-	+	+
20:00-21:00	+	+	+
21:00-24:00	-	-	-

Πίνακας 4: Προφίλ ζήτησης για ζεστό νερό χρήσης (WH)

h \ td	weekday	saturday	sunday
00:00-13:00	-	-	-
13:00-14:00	-	+	+
14:00-16:00	+	+	+
16:00-19:00	-	-	-
19:00-21:00	+	+	+
21:00-24:00	-	-	-

Πίνακας 5: Προφίλ ζήτησης για κλιματισμό (ACO)

Στους παραπάνω πίνακες 3-5 αποτυπώνονται τα προφίλ της ζήτησης για θέρμανση, ζεστό νερό και κλιματισμό, για κάθε μία από τις τρεις τυπικές ημέρες, όπως προέκυψαν από στατιστικά δεδομένα

και λογικές παραδοχές.[19] Απεικονίζεται, δηλαδή, ποιες ώρες κάθε τυπικής ημέρας υπάρχει η αντίστοιχη ζήτηση (δηλώνεται με το σύμβολο +). Με βάση τα προφίλ αυτά υπολογίστηκαν οι συνολικές ετήσιες ώρες χρήσης, ώστε να προκύψει η τελική απαιτούμενη ισχύς που φαίνεται στον πίνακα 5.

Για την περίπτωση της θέρμανσης χώρου, η διάρκεια της περιόδου θέρμανσης για το έτος 2015, υπολογίστηκε με τη μεθοδολογία του TABULA σε 118 ημέρες και προσδιορίστηκε στο ακριβές διάστημα από 1/1/2015-14/3/2015 και από 17/11/2015-31/12/2015. Αυτό σημαίνει ότι κατά την εκτέλεση των υπολογισμών έγινε η παραδοχή πως καμία άλλη μέρα του έτους εκτός αυτού του διαστήματος δεν υπήρξε ζήτηση για θέρμανση. Για την περίπτωση του κλιματισμού, η διάρκεια της περιόδου ψύξης προέκυψε, επίσης, 118 ημέρες και προσδιορίστηκε στο διάστημα 19/5/2015-13/9/2015 αποδεχόμενοι την ίδια παραδοχή όπως και στην θέρμανση. Τέλος, για την περίπτωση του ζεστού νερού χρήσης ότι το προφίλ της ζήτησης παραμένει σταθερό κατά τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο.



Γράφημα 1: Προφίλ ζήτησης θερμικής ενέργειας για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 2: Προφίλ ζήτησης θερμικής ενέργειας για την τυπική θερινή εβδομάδα

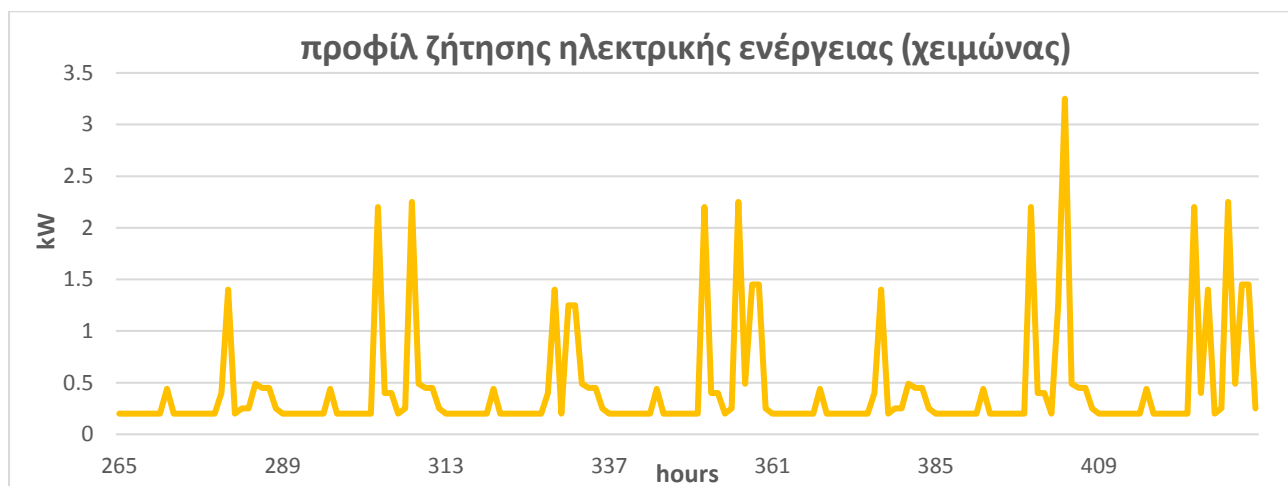
Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει το τελικό συνολικό προφίλ ζήτησης θερμικής ενέργειας για όλο το χρόνο (8760 ώρες). Ωστόσο, επειδή είναι αδύνατο να παρουσιαστεί γραφικά ολόκληρο έγινε επιλογή δύο τυπικών εβδομάδων (5 καθημερινές, 1 Σάββατο, 1 Κυριακή) μία για τη χειμερινή και μία για τη θερινή περίοδο τα προφίλ των οποίων απεικονίζονται στα ανωτέρω γραφήματα 1 και 2. Στη χειμερινή τυπική εβδομάδα η ζήτηση συμπεριλαμβάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση χώρου και ζεστό νερό, ενώ στη θερινή για κλιματισμό και ζεστό νερό. Κατά τη διάρκεια του έτους όπως είναι λογικό δεν υπάρχει διάστημα στο οποίο να υπάρχει ταυτόχρονα ζήτηση για κλιματισμό και θέρμανση. Παρατηρούμε ότι το φορτίο αιχμής κατά τη χειμερινή τυπική εβδομάδα φτάνει στα 11.76kW και στη θερινή στα 7.85kW.

Όσον αφορά το προφίλ της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας η ισχύς κάθε μίας από τις συσκευές οι οποίες λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.3.4 και συνεπώς απομένει να οριστεί η ακριβής χρήση τους κατά τη διάρκεια του έτους. Για το σκοπό αυτό, και με την αξιοποίηση στατιστικών στοιχείων επιλέχθηκαν οι μέρες και οι ώρες κατά τις οποίες κάθε συσκευή τίθεται σε λειτουργία και οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.[19]

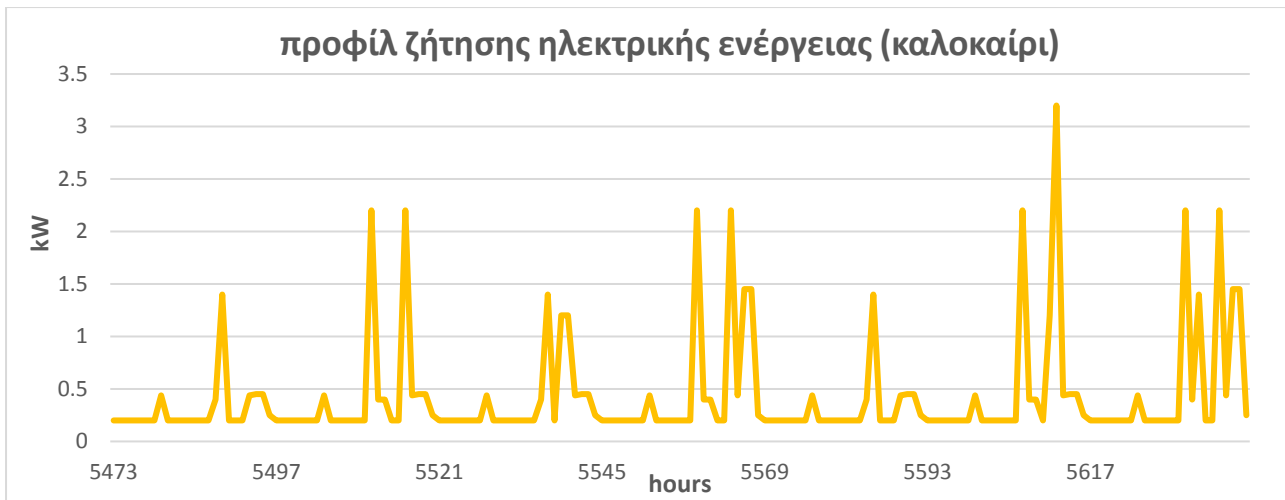
	hours/day	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Πέμπτη	Παρασκευή	Σάββατο	Κυριακή
RF	24	+	+	+	+	+	+	+
LH	4-5	+	+	+	+	+	+	+
ELC_COO	2	-	+	-	+	-	+	+
CW	2	-	-	-	+	-	-	+
DW	1	+	-	+	-	+	-	+
IC	2	+	+	+	+	+	+	+
EN	4	+	+	+	+	+	+	+
SA	2	+	+	+	+	+	+	+
IR	2	-	-	+	-	-	+	-

Πίνακας 6: Χρήση ηλεκτρικών συσκευών

Έχοντας, την ισχύ των ηλεκτρικών συσκευών και την κατανομή λειτουργίας στο χρόνο προκύπτουν τα αντίστοιχα προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για τις δύο τυπικές εβδομάδες του έτους.



Γράφημα 3: Προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 4: Προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την τυπική θερινή εβδομάδα

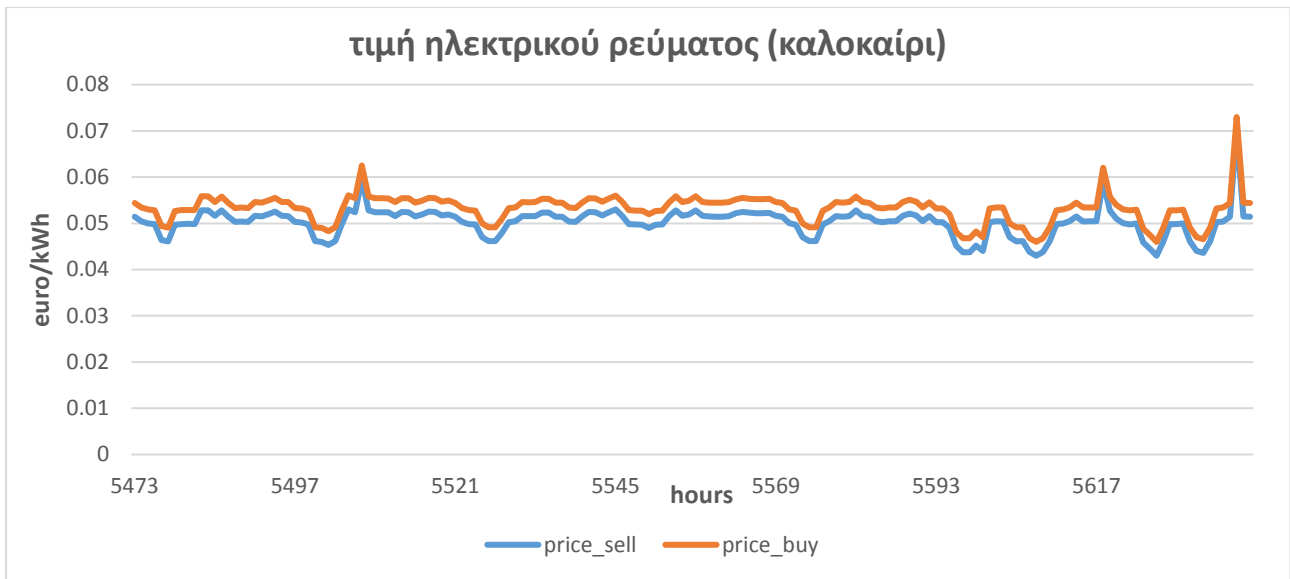
Τα γραφήματα 3 και 4 είναι σχεδόν ίδια μεταξύ τους καθώς η μοναδική ηλεκτρική χρήση της οποίας οι ώρες λειτουργίας μεταβάλλονται από τη χειμερινή στη θερινή περίοδο είναι ο φωτισμός που χρησιμοποιείται λιγότερο το καλοκαίρι. Έτσι και στις 2 περιόδους το ηλεκτρικό φορτίο αιχμής προκύπτει στα 3.2 kW, πολύ χαμηλότερο ασφαλώς από το αντίστοιχο θερμικό, όπως αναμενόταν.

2.4 Τιμές καυσίμου και ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του έτους

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το προφίλ των τιμών του ηλεκτρικού ρεύματος όπως διαμορφώθηκε στην αγορά για το έτος 2015.[20] Λόγω έλλειψης χώρου για την αποτύπωση του διαγράμματος και για τις 8760 ώρες του έτους, δίνονται οι τιμές μόνο για τη διάρκεια των δύο τυπικών εβδομάδων για τις οποίες παρουσιάστηκαν τα προφίλ θερμικής και ηλεκτρικής ζήτησης στην ενότητα 2.3.5. Έτσι, τα διαγράμματα τιμών του ηλεκτρικού ρεύματος για τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο φαίνονται στα γραφήματα 5 και 6 αντίστοιχα.



Γράφημα 5: Προφίλ τιμών ηλεκτρικού ρεύματος για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 6: Προφίλ τιμών ηλεκτρικού ρεύματος για την τυπική θερινή εβδομάδα

Σε κάθε διάγραμμα αποτυπώνονται δύο καμπύλες. Η πρώτη (πορτοκαλί γραμμή) αντιστοιχεί στην τιμή που μπορεί να αγοράσει η τυπική κατοικία το ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ η δεύτερη (γαλάζια γραμμή) που είναι κατά μία σταθερή ποσότητα της τάξης των 0.003 euro/kWh (markup) χαμηλότερη αντιστοιχεί στην τιμή με την οποία η κατοικία μπορεί να πουλήσει την περίσσεια του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει στο δίκτυο. Από τα γραφήματα παρατηρούμε ακόμα ότι η τιμή του ρεύματος τη χειμερινή εβδομάδα παρουσιάζει πολύ πιο έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με τη θερινή όπου η καμπύλη τιμών έχει μία πιο σταθερή μορφή.[20]

Όσον αφορά την τιμή του καυσίμου, και συγκεκριμένα του φυσικού αερίου, που είναι το μοναδικό καύσιμο που θα καταναλωθεί από τα συστήματα παραγωγής ενέργειας που επιλέχθηκαν, θεωρήθηκε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα της αγοράς ορίστηκε στα 0.071 euro/kWh.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΣΕΝΑΡΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διαφορετικοί συνδυασμοί συστημάτων παραγωγής ενέργειας που εξετάστηκαν για να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις της πρότυπης κατοικίας. Τα συστήματα που επιλέχθηκαν (αντλίες θερμότητας, συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, φωτοβολταϊκά πάνελ), βρίσκουν περιορισμένη εφαρμογή στις μέρες μας, ωστόσο αναμένεται η χρήση τους να εξαπλωθεί σημαντικά στα επόμενα χρόνια αντικαθιστώντας τις συμβατικές τεχνολογίες.

Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν τρία ξεχωριστά σενάρια με συστήματα παραγωγής, τα οποία αναλύονται στις επόμενες ενότητες, και σε κάθε ένα από αυτά εξετάστηκαν τρεις υποπεριπτώσεις. Στην πρώτη φάση, το κτίριο δεν διαθέτει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, ενώ στις επόμενες, παρέχεται πρώτα η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ειδικές δεξαμενές νερού και στη συνέχεια η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες σε συνδυασμό με την ύπαρξη φωτοβολταϊκών πάνελ.

Η επιλογή των διαφόρων συστημάτων έγινε με το σκεπτικό να καλύπτονται πλήρως οι ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας (παρακολούθηση θερμικού φορτίου) και σε περίπτωση περισσεύας παραγωγής αυτή να αποθηκεύεται (θερμικά ή χημικά) για μελλοντική χρήση ή να πωλείται στο δίκτυο (ηλεκτρική ενέργεια). Στόχος είναι να ελεγχθεί η βιωσιμότητα της κατοικίας με τη χρήση των νεότερων τεχνολογιών και να εξεταστεί αν υπάρχουν οικονομικά οφέλη με την επιλογή αποθήκευσης ενέργειας σε τέτοιες εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας.

3.2 Σενάριο 1^ο: Αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP)

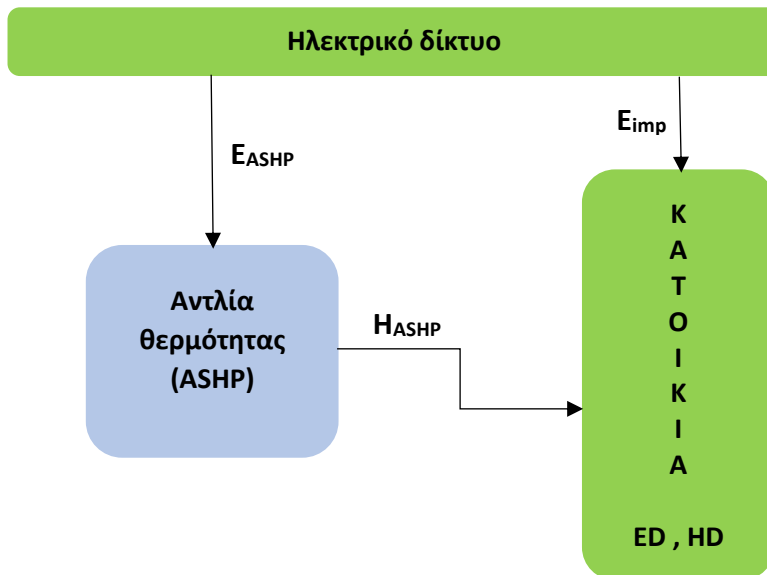
3.2.1 Αντλία θερμότητας χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Το πρώτο και απλούστερο σενάριο που εξετάστηκε είναι η περίπτωση ύπαρξης μόνο μιας αντλίας θερμότητας (air source heat pump), η οποία αναλαμβάνει την κάλυψη των θερμικών αναγκών της κατοικίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το ηλεκτρικό ρεύμα για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας καθώς και οι απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό από την κατοικία εξυπηρετούνται εξ' ολοκλήρου από το δίκτυο ηλεκτρισμού. Η διαστασιολόγηση της αντλίας έγινε, ώστε να καλύπτει το μέγιστο θερμικό φορτίο κατά τη διάρκεια του χρόνου, το οποίο όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι 11.76kW τη χειμερινή περίοδο. Συνεπώς, επιλέχθηκε μια αντλία θερμότητας ονομαστικής ισχύος 12kW, με συντελεστή απόδοσης (COP – coefficient of performance) 3, που σημαίνει ότι για να αποδώσει 12 θερμικά kW απαιτεί τροφοδοσία με 4 kW

ηλεκτρικής ενέργειας. Η σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης καθώς και ένα ενδεικτικό σύστημα αντλίας θερμότητας φαίνονται παρακάτω στο σχήμα και την εικόνα 1 αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Αντλία θερμότητας (Air source heat pump)



Σχήμα 1: Σύστημα με αντλία θερμότητας

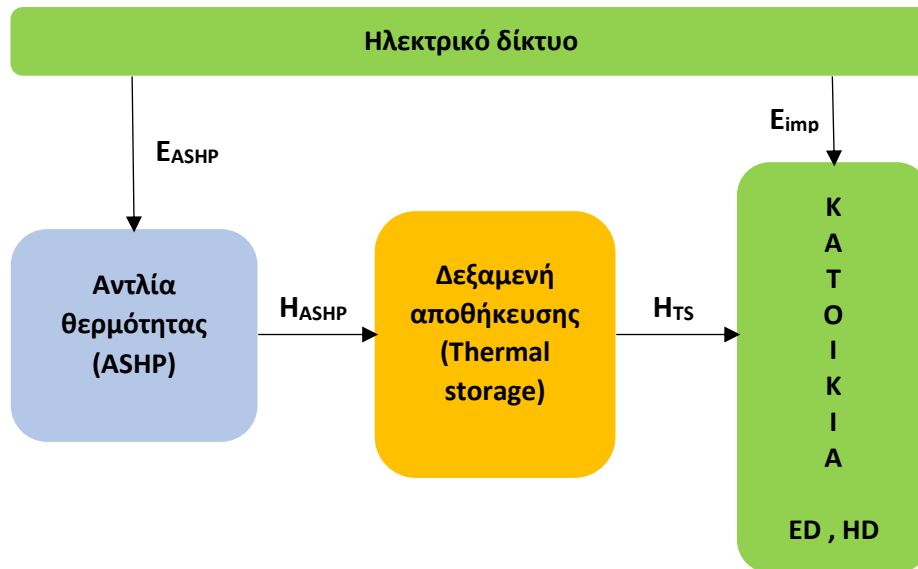
3.2.2 Αντλία θερμότητας με θερμική αποθήκευση ενέργειας

Μετά τη μελέτη της πρώτης περίπτωσης το σύστημα ενισχύθηκε με την εγκατάσταση μια δεξαμενής νερού (thermal storage tank), που παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που παράγεται από την αντλία θερμότητας, ζεσταίνοντας το νερό (και συνεπώς αυξάνοντας την ενέργειά του), και επιτρέποντας τη χρήση της όχι άμεσα αλλά σε μεταγενέστερο στάδιο (λογική παραπλήσια με αυτή ενός ηλεκτρικού θερμοσίφωνα). Μια τέτοια δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας φαίνεται στην εικόνα 2. Η δεξαμενή που επιλέχθηκε είναι χωρητικότητας 150 λίτρων και δίνει δυνατότητα θέρμανσης του νερού από τη χαμηλότερη θερμοκρασιακή στάθμη των 50°C μέχρι τους 80°C.[21] Αυτό μεταφράζεται για την εγκατάσταση σε μέγιστη αποθήκευση θερμικής



Εικόνα 2

ενέργειας περί τις 7kWh τις οποίες μπορεί να διαθέσει προς κατανάλωση μέσα στο χρονικό διάστημα κάθε ώρας. Η τοποθέτηση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παρέχει την ευελιξία στην αντλία θερμότητας να παράγει ενέργεια σε ώρες εκτός της ζήτησης, όπου οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κατά κανόνα χαμηλότερες, και να την καταναλώνει όταν υπάρχει απαίτηση από τους ενοίκους προσφέροντας έτσι οικονομικό όφελος. Στο σχήμα 2 απεικονίζεται η νέα εγκατάσταση μετά την προσθήκη της δεξαμενής αποθήκευσης ενέργειας.



Σχήμα 2: Σύστημα με αντλία θερμότητας και δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης

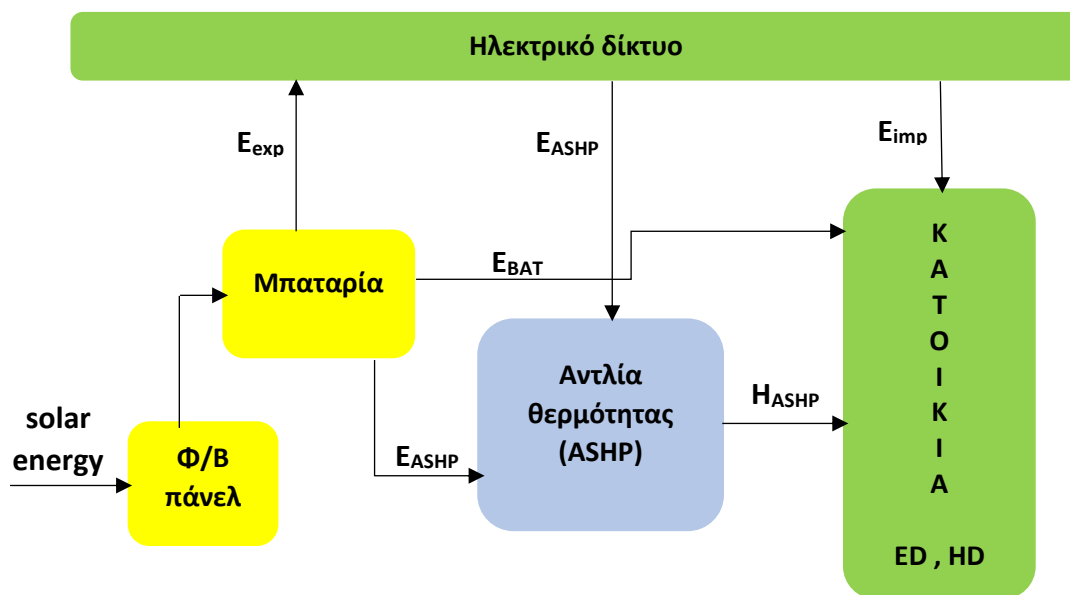
3.2.3 Αντλία θερμότητας με χημική αποθήκευση ενέργειας

Τρίτη και τελευταία εναλλακτική αυτού του σεναρίου είναι, αντί της χρήσης θερμικής αποθήκευσης με τη δεξαμενή νερού, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στη στέγη της κατοικίας σε συνδυασμό με μια μπαταρία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τέτοιο μοντέλο επιτοίχιας μπαταρίας για οικιακή χρήση φαίνεται στην εικόνα 3.[22] για την παραγωγή των πάνελ χρησιμοποιήθηκε μια στατιστική ετήσια κατανομή μία κατοικίας στην Αθήνα το έτος 2015.[31]



Εικόνα 3: Μπαταρία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή χρήση

Η συγκεκριμένη μπαταρία, η οποία επιλέχθηκε και για την εγκατάσταση που εξετάστηκε διαθέτει ενεργειακή χωρητικότητα της τάξεως των 7kWh που μπορεί να διαθέσει στο χρονικό εύρος μιας ώρας. Η ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ που τοποθετήθηκαν στη στέγη διαμορφώθηκε στα 7kW. Η τροποποίηση της εγκατάστασης με τη χρήση των πάνελ και της μπαταρίας δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια (και συνεπώς παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά), την οποία είτε να αξιοποιεί για την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας και την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του νοικοκυριού, είτε να πουλάει στο ηλεκτρικό δίκτυο αποκομίζοντας οικονομικά οφέλη. Παρακάτω, στο σχήμα 3, παρουσιάζεται σχηματικά η εγκατάσταση σε αυτήν την περίπτωση.



Σχήμα 3: Σύστημα με αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία

3.3 Σενάριο 2^ο: Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler)

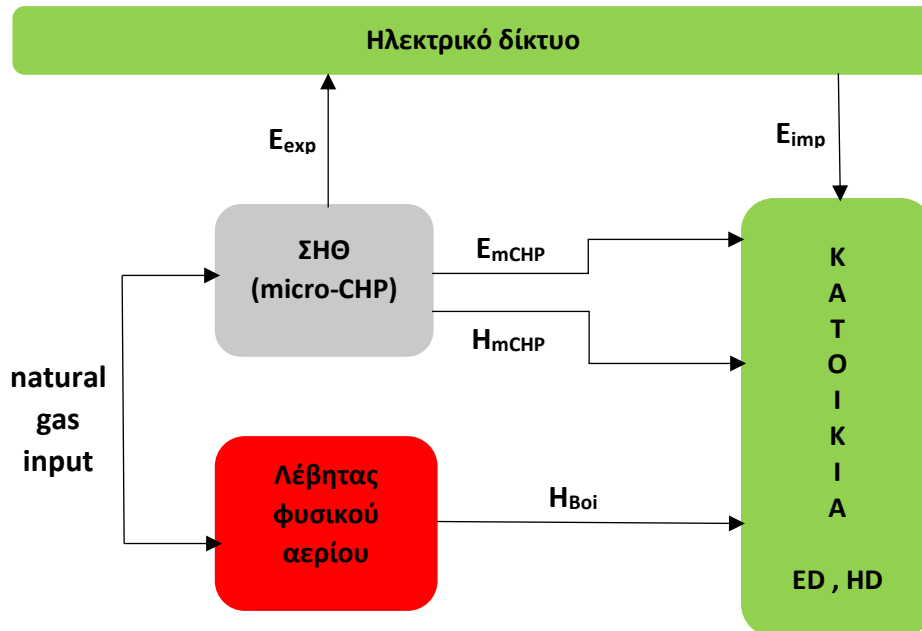
3.3.1 ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Το δεύτερο σενάριο που εξετάστηκε αφορά την εγκατάσταση συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας μικρής κλίμακας για οικιακή χρήση (micro-CHP) σε συνδυασμό με έναν συμβατικό λέβητα φυσικού αερίου. Η συμπαράγωγή έχει τη δυνατότητα καίγοντας φυσικό αέριο να παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρισμό και θερμότητα με λόγο συντελεστών 1:3 (power to heat ratio). Σε συνεργασία με το λέβητα καλύπτουν τις θερμικές ανάγκες του νοικοκυριού, ενώ οι ηλεκτρικές απαιτήσεις εξυπηρετούνται είτε από τη ΣΗΘ είτε απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Παράλληλα, σε περίπτωση περίσσειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη συμπαράγωγή, αυτή πωλείται στο δίκτυο.



Εικόνα 4: micro-CHP

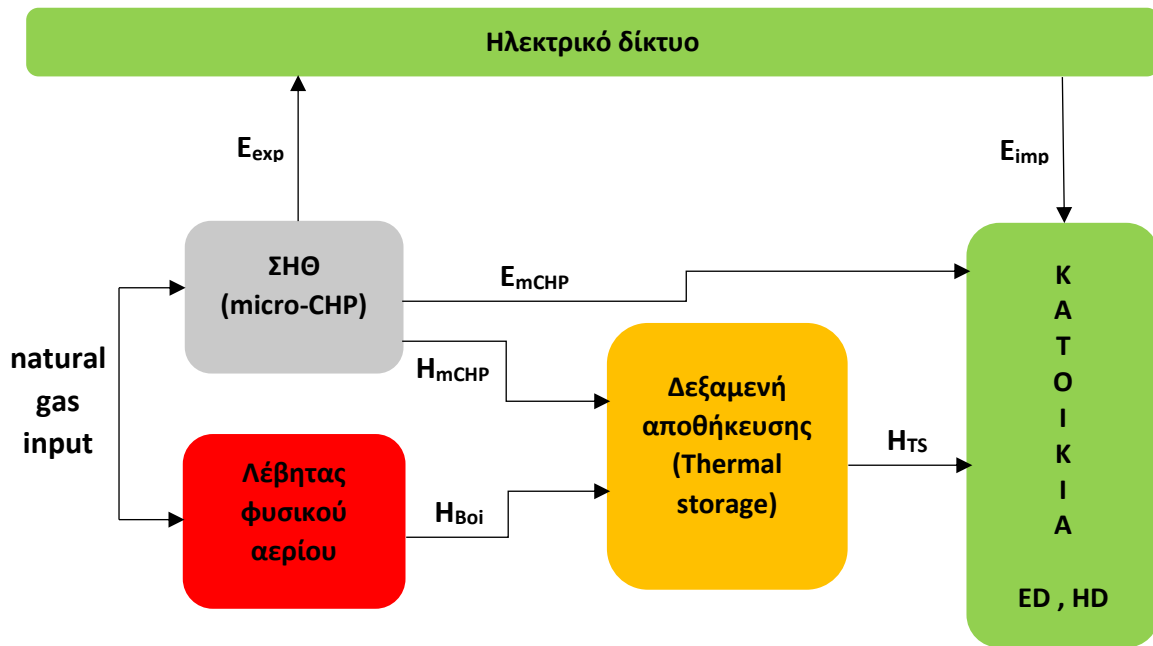
Με βάση τα υπάρχοντα μοντέλα στην αγορά επιλέχθηκε ΣΗΘ με ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 2kW που μπορεί να αποδώσει ταυτόχρονα 6kW θερμικής ισχύος. Ο λέβητας φυσικού αερίου επιλέχθηκε ώστε σε συνδυασμό με τη ΣΗΘ να καλύπτουν την αιχμή του θερμικού φορτίου και συνεπώς διαστασιολογήθηκε στα 6kW θερμικής ισχύος με συντελεστή απόδοσης 0.85. Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται μία τυπική ΣΗΘ και στο σχήμα 4 η μορφή της εγκατάστασης.



Σχήμα 4: Σύστημα με ΣΗΘ και λέβητα φυσικού αερίου

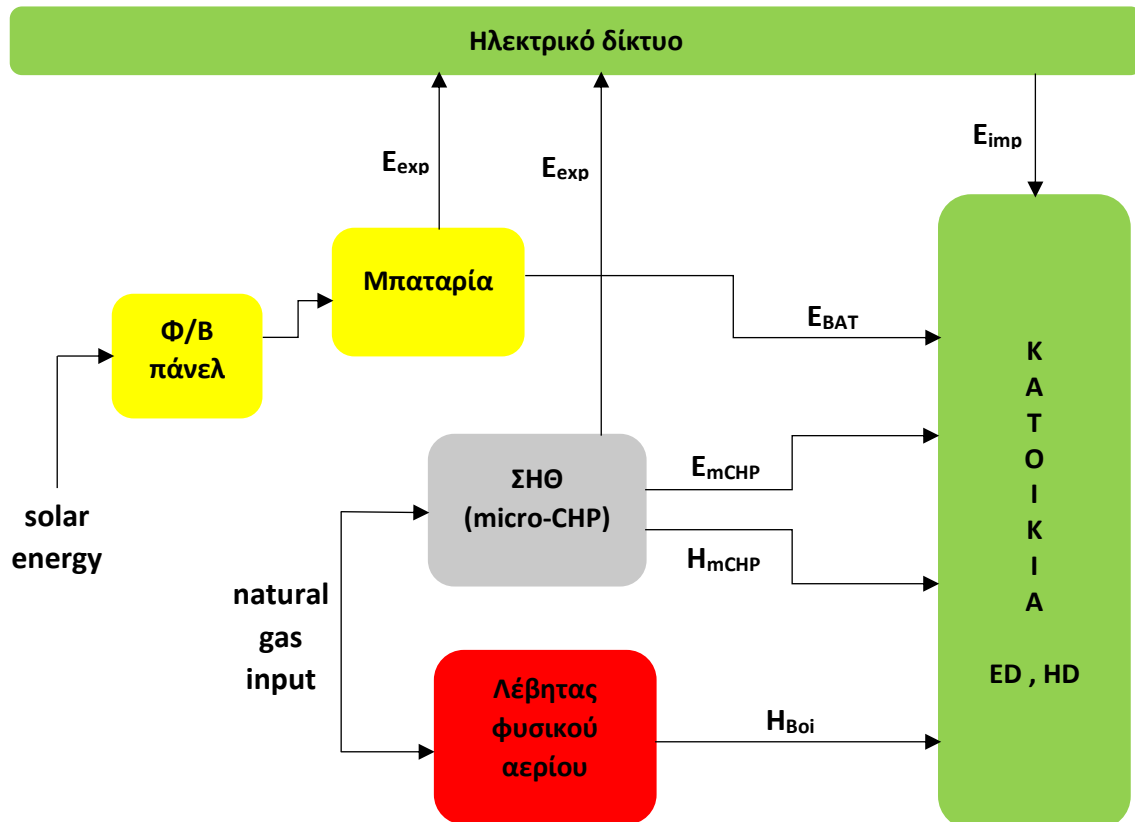
3.3.2 ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα με θερμική αποθήκευση ενέργειας

Η δεύτερη εναλλακτική αυτού του σεναρίου εξετάζει τη λειτουργία του συστήματος της ΣΗΘ με το λέβητα φυσικού αερίου με ταυτόχρονη χρήση της δεξαμενής νερού για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η δεξαμενή που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια με αυτή της ενότητας 3.2.2, δηλαδή 150 λίτρων με ενεργειακή χωρητικότητα 7 θερμικών kWh. Η τοποθέτησή της παρέχει στο σύστημα την ευελιξία, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση που η παραγωγή απλώς παρακολουθούσε το θερμικό φορτίο, να ρυθμίζει την παραγωγή του με βάση τις τρέχουσες τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος, ώστε να εξασφαλίζεται οικονομικό όφελος. Η σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5: Σύστημα με ΣΗΘ, λέβητα φυσικού αερίου και δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης

3.3.3 ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα με χημική αποθήκευση ενέργειας



Σχήμα 6: Σύστημα με ΣΗΘ, λέβητα φυσικού αερίου, φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία

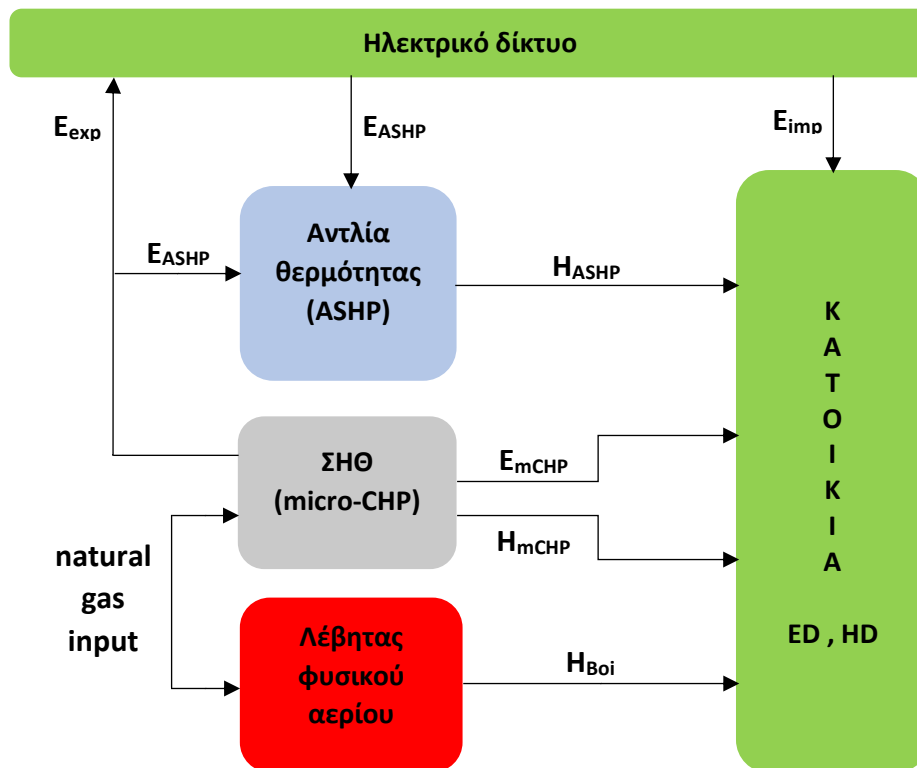
Τρίτη εναλλακτική του σεναρίου, είναι και πάλι η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στη στέγη σε συνδυασμό με μπαταρία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, αντί της χρήσης δεξαμενής νερού για θερμική αποθήκευση. Η διαστασιολόγηση παραμένει ίδια με την ενότητα 3.2.3, τόσο για τα πάνελ (7kW εγκατεστημένα), όσο και για τη μπαταρία (7kWh ενεργειακή χωρητικότητα). Για την εναλλακτική αυτή του δεύτερου σεναρίου εξετάστηκαν δύο υποπεριπτώσεις:

- i. Η μπαταρία τροφοδοτείται αποκλειστικά από τα φωτοβολταϊκά πάνελ
- ii. Η μπαταρία τροφοδοτείται από τα πάνελ και από τη ΣΗΘ.

Στο σχήμα 6 απεικονίζεται η υποπερίπτωση (i). Στην υποπερίπτωση (ii) όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη ΣΗΘ καταλήγει στην μπαταρία και από εκεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει τις ηλεκτρικές ανάγκες του νοικοκυριού ή να πωληθεί στο δίκτυο. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, έτσι και εδώ, η τοποθέτηση του συστήματος της μπαταρίας οδηγεί σε εξοικονόμηση, αφού επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας εκτός των ωρών της ζήτησης και αξιοποίηση της στις ώρες αιχμής.

3.4 Σενάριο 3^ο: Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) και αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler)

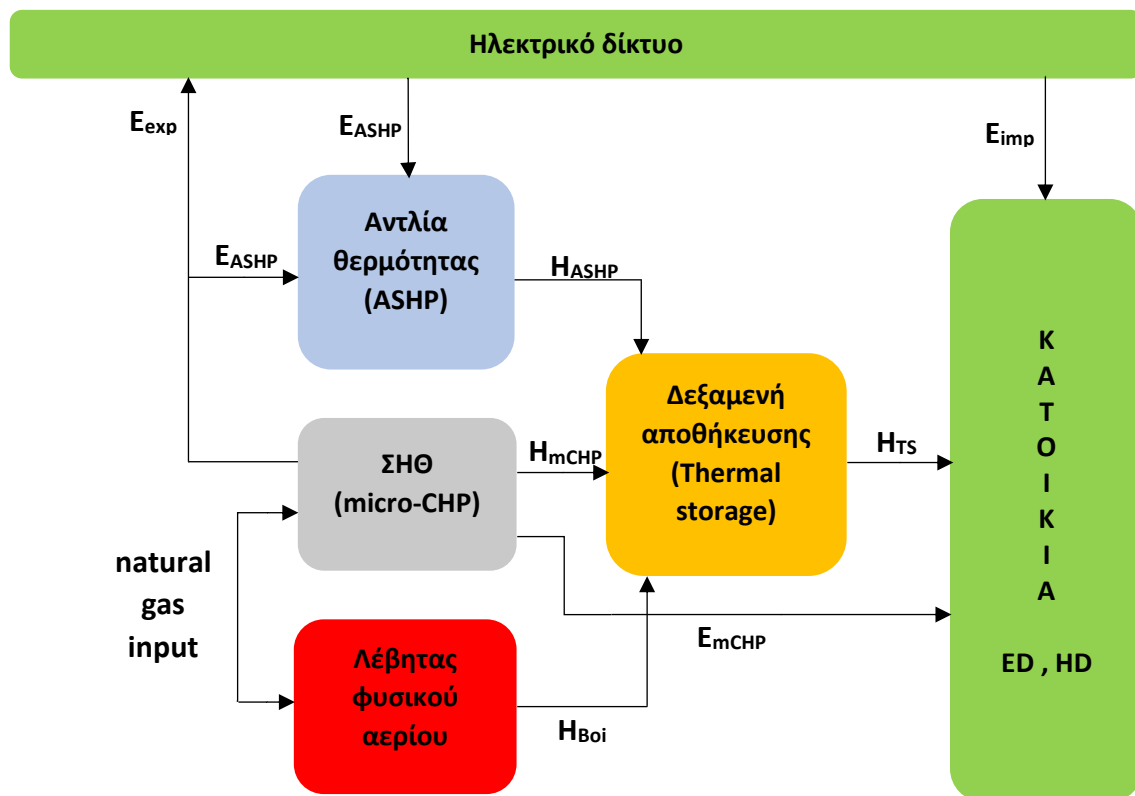
3.4.1 ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητας χωρίς αποθήκευση ενέργειας



Σχήμα 7: Σύστημα με ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητα φυσικού αερίου

Το τελευταίο και πιο πολύπλοκο σενάριο που εξετάστηκε περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση και των τριών συστημάτων παραγωγής που εμφανίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, δηλαδή συνδυασμό ΣΗΘ, αντλίας θερμότητας και βοηθητικού λέβητα. Η ΣΗΘ που χρησιμοποιήθηκε είναι ηλεκτρικής ονομαστικής ισχύος 2kW, με λόγο ηλεκτρικού προς θερμικό συντελεστή (power to heat ratio) 1:3, που σημαίνει ότι μπορεί να αποδώσει έως 6kW θερμικής ισχύος. Η αντλία θερμότητας επιλέχθηκε στα 4kW θερμικής ισχύος με συντελεστή απόδοσης (COP) 3, ενώ ο λέβητας στα 5 kW με βαθμό απόδοσης 0.85. Στην εγκατάσταση αυτή οι θερμικές απαιτήσεις της κατοικίας μπορούν να καλυφθούν από οποιοδήποτε από τα τρία συστήματα ή και το συνδυασμό τους, κάτι που καθορίζεται στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος βελτιστοποίησης. Οι ανάγκες της κατοικίας σε ηλεκτρισμό εξυπηρετούνται είτε από τη συμπαραγωγή είτε απευθείας από το δίκτυο. Για την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας έχει γίνει η εξής παραδοχή: το 40% της ηλεκτρικής παραγωγής της ΣΗΘ (όταν είναι σε λειτουργία) οδηγείται στην αντλία θερμότητας, ενώ το δίκτυο αναλαμβάνει την υπόλοιπη τροφοδοσία της αντλίας ή το σύνολο αυτής όταν η ΣΗΘ βρίσκεται εκτός λειτουργίας.[23] Όση από την ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ δεν ιδιοκαταναλώνεται, πωλείται στο δίκτυο. Η απεικόνιση της εγκατάστασης παρουσιάζεται στο σχήμα 7.

3.4.2 ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητας με θερμική αποθήκευση ενέργειας

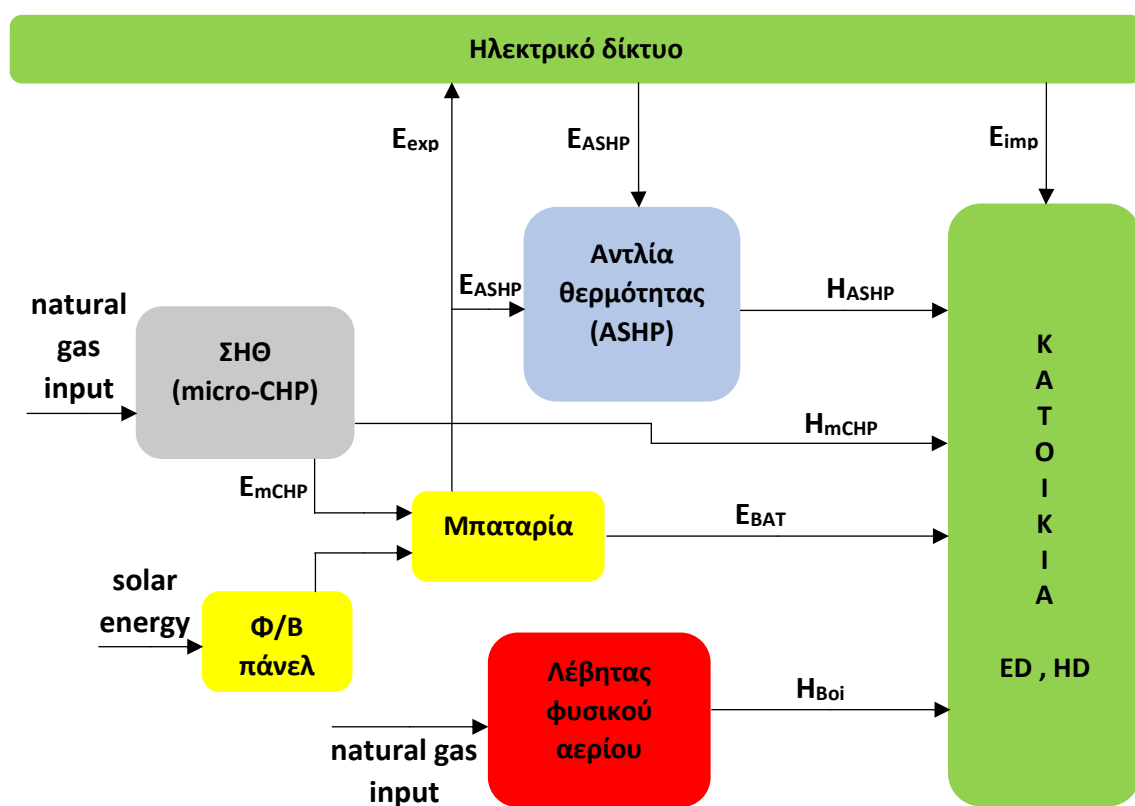


Σχήμα 8: Σύστημα με ΣΗΘ, αντλία θερμότητας, λέβητα φυσικού αερίου και δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης

Στη συνέχεια η εγκατάσταση ενισχύεται και πάλι με τη δεξαμενή νερού για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η επιλογή της είναι η ίδια όπως και στα προηγούμενα σενάρια με 150 λίτρα

χωρητικότητα και 7 kWh ικανότητα θερμικής αποθήκευσης. Η δεξαμενή τροφοδοτείται και από τα τρία συστήματα και κατόπιν εξυπηρετεί τις θερμικές ανάγκες της κατοικίας. Οι ηλεκτρικές απαιτήσεις του σπιτιού καθώς και η τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας, καλύπτονται είτε από τη συμπαραγωγή είτε από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως ακριβώς στην ενότητα 3.4.1. Ασφαλώς, η τοποθέτηση της δεξαμενής παρέχει στο σύστημα την ευελιξία του να παράγει θερμική ενέργεια εκτός των ωρών ζήτησης (εξοικονομώντας χρήματα μέσω της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας σε ώρες χαμηλότερων τιμών ηλεκτρικού ρεύματος), την οποία να αποθηκεύει και να προσφέρει προς κατανάλωση όταν υπάρχει η απαίτηση από τους ενοίκους. Στο σχήμα 8 βλέπουμε την απεικόνιση της εν λόγω εγκατάστασης.

3.4.3 ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και λέβητας με χημική αποθήκευση ενέργειας



Σχήμα 9: Σύστημα με ΣΗΘ, αντλία θερμότητας, λέβητα φυσικού αερίου, φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία

Η τελευταία εναλλακτική αυτού του σεναρίου αφορά τον συνδυασμό των τριών συστημάτων παραγωγής (αντλία, ΣΗΘ, λέβητας) με ταυτόχρονη χρήση των φωτοβολταϊκών πάνελ και της μπαταρίας για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς των πάνελ ορίζεται και εδώ στα 7kW, ενώ επιλέγεται και η ίδια επιτοίχια μπαταρία με 7kWh ενεργειακή χωρητικότητα. Όπως στην ενότητα 3.3.3 εξετάζονται και τώρα δύο υποπεριπτώσεις της συγκεκριμένης εγκατάστασης:

- i. Η μπαταρία τροφοδοτείται αποκλειστικά από τα φωτοβολταϊκά πάνελ
- ii. Η μπαταρία τροφοδοτείται από τα πάνελ και από τη ΣΗΘ

και στο σχήμα 9 παρουσιάζεται σχηματικά η υποπερίπτωση (ii). Στην υποπερίπτωση (i), η εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών αναγκών της κατοικίας και της τροφοδοσίας της αντλίας μπορεί να προέρχεται από τη ΣΗΘ, τη μπαταρία, το ηλεκτρικό δίκτυο ή και συνδυασμό αυτών ανάλογα με το οικονομικό συμφέρον της κατοικίας κάτι που θα προκύψει από τη βελτιστοποίηση που θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, τόσο από τη μπαταρία, όσο και από τη ΣΗΘ. Αντίθετα, όπως παρατηρούμε, στην υποπερίπτωση (ii) η ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ οδηγείται εξ' ολοκλήρου στην μπαταρία. Έτσι η ηλεκτρική ζήτηση από τους ενοίκους του σπιτιού και από την αντλία θερμότητας καλύπτεται είτε από την μπαταρία είτε από το δίκτυο, ενώ πώληση ηλεκτρισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω της μπαταρίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ GAMS

4.1 Εισαγωγή

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των διαφόρων σεναρίων, που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης GAMS.

Αρχικά, καταχωρήθηκαν στο πρόγραμμα όλα τα μέχρι στιγμής δεδομένα, όπως τα χαρακτηριστικά της πρότυπης κατοικίας, τα προφίλ ζήτησης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, οι τιμές καυσίμου και ηλεκτρικού ρεύματος, τα στοιχεία των συστημάτων παραγωγής κ.α. Κατόπιν, καθορίστηκαν οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν κάθε ένα από τα σεναρία που εξετάστηκαν, όπως το κόστος λειτουργίας, η παραγωγή κάθε συστήματος, οι καταναλώσεις σε καύσιμο και ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι τελικά, με την καταγραφή των μαθηματικών εξισώσεων σε κώδικα του προγράμματος και τη χρήση ενός MIP (mixed integer program) μοντέλου έγινε βελτιστοποίηση, για τη λειτουργία κάθε συστήματος παραγωγής, σε όλα τα σεναρία, με κριτήριο πάντα την ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους.

Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική παρουσίαση για τα τρία ακόλουθα σεναρία:

- Σενάριο 1.3 – Σύστημα με αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία
- Σενάριο 2.1 – Σύστημα με ΣΗΘ και βοηθητικό λέβητα χωρίς αποθήκευση ενέργειας
- Σενάριο 3.2 – Σύστημα με ΣΗΘ, αντλία θερμότητας και βοηθητικό λέβητα με θερμική αποθήκευση ενέργειας.

Οι υπόλοιπες εναλλακτικές κάθε σεναρίου προκύπτουν με ανάλογη λογική.

4.2 Μαθηματικό μοντέλο σεναρίου 1.3 (αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκά και μπαταρία)

Όπως έχει προαναφερθεί στόχος σε κάθε σενάριο είναι η ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους του συστήματος, που αντιπροσωπεύεται από την αντικειμενική συνάρτηση κάθε εναλλακτικής περίπτωσης και δίνεται στη σχέση (4.1):

$$\text{minimize } C_{total} = C_{el_buy} - C_{el_sell} \quad (4.1)$$

όπου:

C_{total} [euros]: το ετήσιο λειτουργικό κόστος, το οποίο μπορεί να γίνει αρνητικό σε περίπτωση που τα έσοδα είναι μεγαλύτερα από τα έξοδα,

C_{el_buy} [euros]: το ετήσιο κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, όπως αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση (4.2),

C_{el_sell} [euros]: τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, όπως προσδιορίζονται στη σχέση (4.3).

Το ετήσιο κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο δίνεται από τη σχέση (4.2):

$$C_{el_buy} = \sum_t E_{imp} * price_{el_buy} \quad (4.2)$$

όπου:

E_{imp} [kWh]: η ωριαία εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της κατοικίας και την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας,

$price_{el_buy}$ [euro/kWh]: η τιμή αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος, το προφίλ της οποίας, προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο δίνονται από τη σχέση (4.3):

$$C_{el_sell} = \sum_t E_{exp} * price_{el_sell} \quad (4.3)$$

όπου:

E_{exp} [kWh]: η ωριαία εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τη μπαταρία,

$price_{el_sell}$ [euro/kWh]: η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, της οποίας το προφίλ, επίσης, προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Η θερμική παραγωγή της αντλίας θερμότητας στο σενάριο αυτό που δεν υπάρχει άλλη πηγή παραγωγής θερμικής ενέργειας ή δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης ισούται σε κάθε ώρα με την αντίστοιχη θερμική ζήτηση της κατοικίας.

$$H_{ASHP} = H_{dem} \quad (4.4)$$

όπου:

H_{ASHP} [kWh]: η ωριαία παραγωγή θερμικής ενέργειας από την αντλία θερμότητας,

H_{dem} [kWh]: η ωριαία θερμική ζήτηση από την κατοικία, όπως προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.5.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από την αντλία θερμότητας δίνεται από τη σχέση (4.5):

$$E_{ASHP} = H_{ASHP} * COP_{ASHP} \quad (4.5)$$

όπου:

E_{ASHP} [kWh]: η ωριαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από την αντλία θερμότητας,

COP_{ASHP} [-]: ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας.

Η τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας στην εναλλακτική αυτή προέρχεται είτε από το δίκτυο, είτε από την μπαταρία, ή και από τον συνδυασμό τους.

$$E_{ASHP} = E_{ASHP_GRID} + E_{ASHP_BAT} \quad (4.6)$$

όπου:

E_{ASHP_GRID} [kWh]: η ωριαία εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την τροφοδοσία της αντλίας,

E_{ASHP_BAT} [kWh]: η ωριαία παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από την μπαταρία προς την αντλία.

Για το σύστημα της μπαταρίας η ηλεκτρική ισορροπία που πρέπει να τηρείται σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται στη σχέση (4.7):

$$E_{BAT}(t) = E_{BAT}(t-1) + PV_{prod} - E_{ASHP_BAT} - E_{CONS_BAT} - E_{exp} - loss_{BAT} \quad (4.7)$$

όπου:

$E_{BAT}(t)$ [kWh]: η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία σε κάθε τυχαία ώρα t του έτους,

$E_{BAT}(t-1)$ [kWh]: η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία την προηγούμενη ώρα από την t ,

PV_{prod} [kWh]: η ωριαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά[31],

E_{CONS_BAT} [kWh]: η ωριαία παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από την μπαταρία προς την κατοικία για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της,

$loss_{BAT}$ [kWh]: η ωριαία απώλεια ενέργειας από την μπαταρία.

Η ωριαία φόρτιση ή αποφόρτιση της μπαταρίας δίνεται από τη σχέση (4.8):

$$d_{E_BAT} = E_{BAT}(t) - E_{BAT}(t-1) \quad (4.8)$$

Ασφαλώς η μπαταρία έχει ένα ανώτατο και ένα κατώτατο επίπεδο φόρτισης, από τις προδιαγραφές κατασκευής της, τα οποία πρέπει να τηρούνται. Ο περιορισμός αυτός δίνεται στη σχέση (4.9):

$$E_{BAT_min} \leq E_{BAT}(t) \leq E_{BAT_max} \quad (4.9)$$

Η συνολική ηλεκτρική ισορροπία της εγκατάστασης φαίνεται στη σχέση (4.10):

$$E_{dem} = E_{CONS_BAT} - E_{ASHP_GRID} + E_{imp} \quad (4.10)$$

όπου:

E_{dem} [kWh]: η ωριαία ηλεκτρική ζήτηση από την κατοικία, όπως προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.5.

4.3 Μαθηματικό μοντέλο σεναρίου 2.1 (ΣΗΘ με βοηθητικό λέβητα)

Κριτήριο της βελτιστοποίησης είναι και τώρα η ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους. Ωστόσο, σε αντίθεση με το σενάριο 1.3 που το κόστος προερχόταν μόνο από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας τώρα υπάρχει και το κόστος του καυσίμου (φυσικού αερίου) για τη λειτουργία της ΣΗΘ και του λέβητα. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση σε αυτήν την περίπτωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{minimize } C_{total} = C_{el_buy} + C_{fuel} - C_{el_sell} \quad (4.11)$$

όπου:

C_{total} [euros]: το ετήσιο λειτουργικό κόστος, το οποίο μπορεί να γίνει αρνητικό σε περίπτωση που τα έσοδα είναι μεγαλύτερα από τα έξοδα,

C_{el_buy} [euros]: το ετήσιο κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, όπως αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση (4.12),

C_{el_sell} [euros]: τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, όπως προσδιορίζονται από τη σχέση (4.13),

C_{fuel} [euros]: το ετήσιο κόστος φυσικού αερίου για τη λειτουργία της ΣΗΘ και του λέβητα, όπως αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση (4.14).

Το ετήσιο κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο δίνεται από τη σχέση (4.12):

$$C_{el_buy} = \sum_t E_{imp} * price_{el_buy} \quad (4.12)$$

όπου:

E_{imp} [kWh]: η ωριαία εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της κατοικίας,

$price_{el_buy}$ [euro/kWh]: η τιμή αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος, το προφίλ της οποίας, προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο δίνονται από τη σχέση (4.13):

$$C_{el_sell} = \sum_t E_{exp} * price_{el_sell} \quad (4.13)$$

όπου:

E_{exp} [kWh]: η ωριαία εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τη ΣΗΘ,

$price_{el_sell}$ [euro/kWh]: η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, της οποίας το προφίλ, επίσης, προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Το ετήσιο κόστος φυσικού αερίου για τη λειτουργία της ΣΗΘ και του λέβητα δίνεται στη σχέση (4.14):

$$C_{fuel} = \sum_t (F_{mCHP} + F_{Boi}) * price_{fuel} \quad (4.14)$$

όπου:

F_{mCHP} [kWh]: η ωριαία κατανάλωση φυσικού αερίου από τη ΣΗΘ σε μονάδες ενέργειας,

F_{Boi} [kWh]: η ωριαία κατανάλωση φυσικού αερίου από το βοηθητικό λέβητα σε μονάδες ενέργειας,

$price_{fuel}$ [euro/kWh]: το κόστος του φυσικού αερίου, όπως προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Η ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ δίνεται από τη σχέση (4.15):

$$E_{mCHP} = F_{mCHP} * n_{e1} + I_{mCHP} * n_{e2} \quad (4.15)$$

όπου:

E_{mCHP} [kWh]: η ωριαία ηλεκτρική παραγωγή από τη ΣΗΘ,

I_{mCHP} : δυική μεταβλητή του μοντέλου που παίρνει την τιμή 1 όταν η ΣΗΘ βρίσκεται σε λειτουργία και την τιμή 0 όταν είναι εκτός λειτουργίας,

n_{e1}, n_{e2} [-]: συντελεστές που υπολογίζονται από παρεμβολή των χαρακτηριστικών καμπυλών ηλεκτρικής απόδοσης της ΣΗΘ σε συνδυασμό με την εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ της.

Η θερμική παραγωγή της ΣΗΘ δίνεται από τη σχέση (4.16):

$$H_{mCHP} = F_{mCHP} * n_{th1} + I_{mCHP} * n_{th2} \quad (4.16)$$

όπου:

H_{mCHP} [kWh]: η ωριαία θερμική παραγωγή από τη ΣΗΘ,

n_{th1}, n_{th2} [-]: συντελεστές που υπολογίζονται από παρεμβολή των χαρακτηριστικών καμπυλών θερμικής απόδοσης της ΣΗΘ σε συνδυασμό με την εγκατεστημένη θερμική ισχύ της.

Όσον αφορά την ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ ισχύει ο περιορισμός της σχέσης (4.17):

$$I_{mCHP} * E_{mCHP_min} \leq E_{mCHP} \leq I_{mCHP} * E_{mCHP_max} \quad (4.17)$$

όπου:

E_{mCHP_max} [kWh]: η ωριαία ονομαστική ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ,

E_{mCHP_min} [kWh]: η ωριαία ελάχιστη ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ (minimum stable generation), η οποία προσδιορίζεται περίπου στο 10% της ονομαστικής και σημαίνει ότι όταν η ΣΗΘ βρίσκεται σε λειτουργία δεν μπορεί να δουλεύει σε ισχύ μικρότερη από αυτή.

Το αντίστοιχο ισχύει και για τη θερμική παραγωγή της ΣΗΘ:

$$I_{mCHP} * H_{mCHP_min} \leq H_{mCHP} \leq I_{mCHP} * H_{mCHP_max} \quad (4.18)$$

Ακόμη, επειδή η αύξηση ή μείωση της παραγωγής από τη ΣΗΘ, στο διάστημα κάθε ώρας, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα όρια μεταβολής ισχύος ισχύει ο περιορισμός της ακόλουθης σχέσης:

$$-ramp \leq E_{mCHP}(t) - E_{mCHP}(t-1) \leq ramp \quad (4.19)$$

όπου:

$ramp$ [kW]: το όριο μεταβολής παραγόμενης ισχύος από τη ΣΗΘ στο διάστημα μίας ώρας (ή παραγόμενης ενέργειας αφού ο χρόνος αναφοράς είναι 1 ώρα).

Η θερμική παραγωγή από το λέβητα δίνεται στη σχέση (4.20):

$$H_{Boi} = F_{Boi} * n_{Boi} \quad (4.20)$$

όπου:

H_{Boi} [kWh]: η ωριαία θερμική παραγωγή από το λέβητα,

n_{Boi} [-]: ο θερμικός βαθμός απόδοσης του λέβητα.

Ασφαλώς η θερμική παραγωγή από τον λέβητα υπόκειται στον περιορισμό της σχέσης (4.21):

$$H_{Boi} \leq H_{Boi_max} \quad (4.21)$$

όπου:

H_{Boi_max} [kWh]: η ωριαία ονομαστική θερμική παραγωγή του λέβητα.

Η συνολική θερμική ισορροπία της εγκατάστασης δίνεται από τη σχέση (4.22):

$$H_{mCHP} + H_{Boi} = H_{dem} \quad (4.22)$$

ενώ, η συνολική ηλεκτρική ισορροπία από τη σχέση (4.23):

$$E_{dem} = E_{mCHP} + E_{imp} - E_{exp} \quad (4.23)$$

όπου:

E_{imp} [kWh]: η ωριαία εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του νοικοκυριού,

E_{exp} [kWh]: η ωριαία εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο που προέρχεται από την παραγωγή της ΣΗΘ.

4.4 Μαθηματικό μοντέλο σεναρίου 3.2 (ΣΗΘ, αντλία θερμότητας, βοηθητικός λέβητας και θερμική αποθήκευση)

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο για το οποίο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου είναι αυτό με το συνδυασμό ΣΗΘ, αντλίας θερμότητας, λέβητα και δεξαμενής νερού για

θερμική αποθήκευση. Ασφαλώς, η αντικειμενική συνάρτηση αφορά και πάλι την ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους του συστήματος και δίνεται στη σχέση (4.24):

$$\text{minimize } C_{total} = C_{el_buy} + C_{fuel} - C_{el_sell} \quad (4.24)$$

όπου:

C_{total} [euros]: το ετήσιο λειτουργικό κόστος, το οποίο μπορεί να γίνει αρνητικό σε περίπτωση που τα έσοδα είναι μεγαλύτερα από τα έξοδα,

C_{el_buy} [euros]: το ετήσιο κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, όπως αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση (4.25),

C_{el_sell} [euros]: τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, όπως προσδιορίζονται στη σχέση (4.26),

C_{fuel} [euros]: το ετήσιο κόστος φυσικού αερίου για τη λειτουργία της ΣΗΘ και του λέβητα, όπως αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση (4.27).

Το ετήσιο κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο δίνεται από τη σχέση (4.25):

$$C_{el_buy} = \sum_t E_{imp} * price_{el_buy} \quad (4.25)$$

όπου:

E_{imp} [kWh]: η ωριαία εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της κατοικίας και την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας,

$price_{el_buy}$ [euro/kWh]: η τιμή αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος, το προφίλ της οποίας, προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο δίνονται από τη σχέση (4.26):

$$C_{el_sell} = \sum_t E_{exp} * price_{el_sell} \quad (4.26)$$

όπου:

E_{exp} [kWh]: η ωριαία εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τη ΣΗΘ,

$price_{el_sell}$ [euro/kWh]: η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, της οποίας το προφίλ, επίσης, προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Το ετήσιο κόστος φυσικού αερίου για τη λειτουργία της ΣΗΘ και του λέβητα δίνεται στη σχέση (4.27):

$$C_{fuel} = \sum_t (F_{mCHP} + F_{Boi}) * price_{fuel} \quad (4.27)$$

όπου:

F_{mCHP} [kWh]: η ωριαία κατανάλωση φυσικού αερίου από τη ΣΗΘ σε μονάδες ενέργειας,

F_{Boi} [kWh]: η ωριαία κατανάλωση φυσικού αερίου από το βοηθητικό λέβητα σε μονάδες ενέργειας,

$price_{fuel}$ [euro/kWh]: το κόστος του φυσικού αερίου, όπως προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.6.

Η ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ δίνεται από τη σχέση (4.28):

$$E_{mCHP} = F_{mCHP} * n_{e1} + I_{mCHP} * n_{e2} \quad (4.28)$$

όπου:

E_{mCHP} [kWh]: η ωριαία ηλεκτρική παραγωγή από τη ΣΗΘ,

I_{mCHP} : δυική μεταβλητή του μοντέλου που παίρνει την τιμή 1 όταν η ΣΗΘ βρίσκεται σε λειτουργία και την τιμή 0 όταν είναι εκτός λειτουργίας,

n_{e1}, n_{e2} [-]: συντελεστές που υπολογίζονται από παρεμβολή των χαρακτηριστικών καμπυλών ηλεκτρικής απόδοσης της ΣΗΘ σε συνδυασμό με την εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ της.

Η θερμική παραγωγή της ΣΗΘ δίνεται από τη σχέση (4.29):

$$H_{mCHP} = F_{mCHP} * n_{th1} + I_{mCHP} * n_{th2} \quad (4.29)$$

όπου:

H_{mCHP} [kWh]: η ωριαία θερμική παραγωγή από τη ΣΗΘ,

n_{th1}, n_{th2} [-]: συντελεστές που υπολογίζονται από παρεμβολή των χαρακτηριστικών καμπυλών θερμικής απόδοσης της ΣΗΘ σε συνδυασμό με την εγκατεστημένη θερμική ισχύ της.

Όσον αφορά την ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ ισχύει ο περιορισμός της σχέσης (4.30):

$$I_{mCHP} * E_{mCHP_min} \leq E_{mCHP} \leq I_{mCHP} * E_{mCHP_max} \quad (4.30)$$

όπου:

E_{mCHP_max} [kWh]: η ωριαία ονομαστική ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ,

E_{mCHP_min} [kWh]: η ωριαία ελάχιστη ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ (minimum stable generation), η οποία προσδιορίζεται περίπου στο 10% της ονομαστικής και σημαίνει ότι όταν η ΣΗΘ βρίσκεται σε λειτουργία δεν μπορεί να δουλεύει σε ισχύ μικρότερη από αυτή.

Το αντίστοιχο ισχύει και για τη θερμική παραγωγή της ΣΗΘ:

$$I_{mCHP} * H_{mCHP_min} \leq H_{mCHP} \leq I_{mCHP} * H_{mCHP_max} \quad (4.31)$$

Ακόμη, επειδή η αύξηση ή μείωση της παραγωγής από τη ΣΗΘ, στο διάστημα κάθε ώρας, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα όρια μεταβολής ισχύος ισχύει ο περιορισμός της ακόλουθης σχέσης:

$$-ramp \leq E_{mCHP}(t) - E_{mCHP}(t-1) \leq ramp \quad (4.32)$$

όπου:

$ramp$ [kW]: το όριο μεταβολής παραγόμενης ισχύος από τη ΣΗΘ στο διάστημα μίας ώρας (ή παραγόμενης ενέργειας αφού ο χρόνος αναφοράς είναι 1 ώρα).

Από την ηλεκτρική παραγωγή της ΣΗΘ, έγινε η παραδοχή, ότι το 40% αυτής θα χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας κάτι που δείχνει η σχέση (4.33):

$$E_{ASHP_mCHP} = 0.4 * E_{mCHP} \quad (4.33)$$

όπου:

E_{ASHP_mCHP} [kWh]: η ωριαία παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΣΗΘ στην αντλία θερμότητας.

Η τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας στην εναλλακτική αυτή προέρχεται είτε από το δίκτυο, είτε από τη ΣΗΘ, ή και από τον συνδυασμό τους.

$$E_{ASHP} = E_{ASHP_GRID} + E_{ASHP_mCHP} \quad (4.34)$$

όπου:

E_{ASHP_GRID} [kWh]: η ωριαία εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την τροφοδοσία της αντλίας.

Η θερμική παραγωγή της αντλίας θερμότητας στο σενάριο αυτό δίνεται από τη σχέση (4.35):

$$H_{ASHP} = E_{ASHP} * COP_{ASHP} \quad (4.35)$$

και περιορίζεται από την ονομαστική ισχύ της σύμφωνα με τη σχέση (4.36)

$$H_{ASHP} \leq H_{ASHP_max} \quad (4.36)$$

όπου:

H_{ASHP_max} [kWh]: η ωριαία ονομαστική θερμική παραγωγή της αντλίας θερμότητας.

Η θερμική παραγωγή από το λέβητα δίνεται στη σχέση (4.37):

$$H_{Boi} = F_{Boi} * n_{Boi} \quad (4.37)$$

όπου:

H_{Boi} [kWh]: η ωριαία θερμική παραγωγή από το λέβητα,

n_{Boi} [-]: ο θερμικός βαθμός απόδοσης του λέβητα.

Ασφαλώς, και η θερμική παραγωγή από τον λέβητα υπόκειται στον περιορισμό της σχέσης (4.38):

$$H_{Boi} \leq H_{Boi_max} \quad (4.38)$$

όπου:

H_{Boi_max} [kWh]: η ωριαία ονομαστική θερμική παραγωγή του λέβητα.

Η ισορροπία θερμικής ενέργειας που πρέπει να επαληθεύεται στο σύστημα της δεξαμενής νερού για κάθε ώρα του έτους παρουσιάζεται στη σχέση (4.39):

$$H_{TS}(t) = H_{TS}(t-1) + H_{mCHP} + H_{Boi} + H_{ASHP} - H_{dem} - loss_{TS} \quad (4.39)$$

όπου:

H_{TS} [kWh]: η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια στη δεξαμενή για κάθε ώρα του έτους,

H_{dem} [kWh]: η ωριαία θερμική ζήτηση από την κατοικία, όπως προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.5,

$loss_{TS}$ [kWh]: η ωριαία απώλεια θερμικής ενέργειας από τη δεξαμενή νερού.

Για τη δεξαμενή ισχύει ο περιορισμός της σχέσης (4.40):

$$H_{TS_min} \leq H_{TS} \leq H_{TS_max} \quad (4.40)$$

όπου:

H_{TS_min} [kWh]: η θερμική ενέργεια της δεξαμενής όταν το νερό βρίσκεται στην ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία,

H_{TS_max} [kWh]: η θερμική ενέργεια της δεξαμενής όταν το νερό βρίσκεται στη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία.

Η ωριαία φόρτιση ή αποφόρτιση της δεξαμενής δίνεται προφανώς από τη σχέση:

$$d_{H_TS} = H_{TS}(t) - H_{TS}(t-1) \quad (4.41)$$

Τέλος, η συνολική ηλεκτρική ισορροπία της εγκατάστασης φαίνεται στη σχέση (4.42):

$$E_{dem} = 0.6E_{mCHP} - E_{ASHP_GRID} + E_{imp} - E_{exp} \quad (4.42)$$

όπου:

E_{dem} [kWh]: η ωριαία ηλεκτρική ζήτηση από την κατοικία, όπως προσδιορίστηκε στην ενότητα 2.3.5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΑΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΑΞΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα από τη χρήση του προγράμματος GAMS. Για κάθε ένα από τα τρία σενάρια, καθώς και για κάθε εναλλακτική τους, παρατίθενται 4 διαγράμματα (κάλυψη θερμικής και ηλεκτρικής ζήτησης για τις δύο τυπικές εβδομάδες), τα οποία απεικονίζουν την κατανομή της λειτουργίας κάθε συστήματος μέσα στο έτος όπως προέκυψε από τη βελτιστοποίηση με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, μεταβάλλοντας ορισμένες μεταβλητές του προβλήματος, ενώ τέλος, γίνεται οικονομική αξιολόγηση και σύγκριση μεταξύ των σεναρίων με τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ), λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ετήσιο λειτουργικό κόστος που προέκυψε από το πρόγραμμα, καθώς και το κεφαλαιουχικό κόστος για κάθε εγκατάσταση με βάση τα τρέχοντα οικονομικά δεδομένα της αγοράς.

5.2 Σενάριο 1^ο: Αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP)

Στο πρώτο σενάριο, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, έγινε χρήση μόνο μιας αντλίας θερμότητας αρχικά χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και στη συνέχεια, πρώτα με θερμική αποθήκευση και ύστερα με χημική αποθήκευση ενέργειας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης για τις τρεις εναλλακτικές του σεναρίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 7.

σύστημα	ισχύς	χωρητικότητα	απόδοση
αντλία (ASHP)	12 kW _{th}		COP=3
δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης		7 kWh _{th}	
φωτοβολταϊκά πάνελ	7 kW _e		
μπαταρία χημικής αποθήκευσης	5 kW _e	7 kWh _e	

Πίνακας 7: Σενάριο 1 – χαρακτηριστικά εγκατάστασης

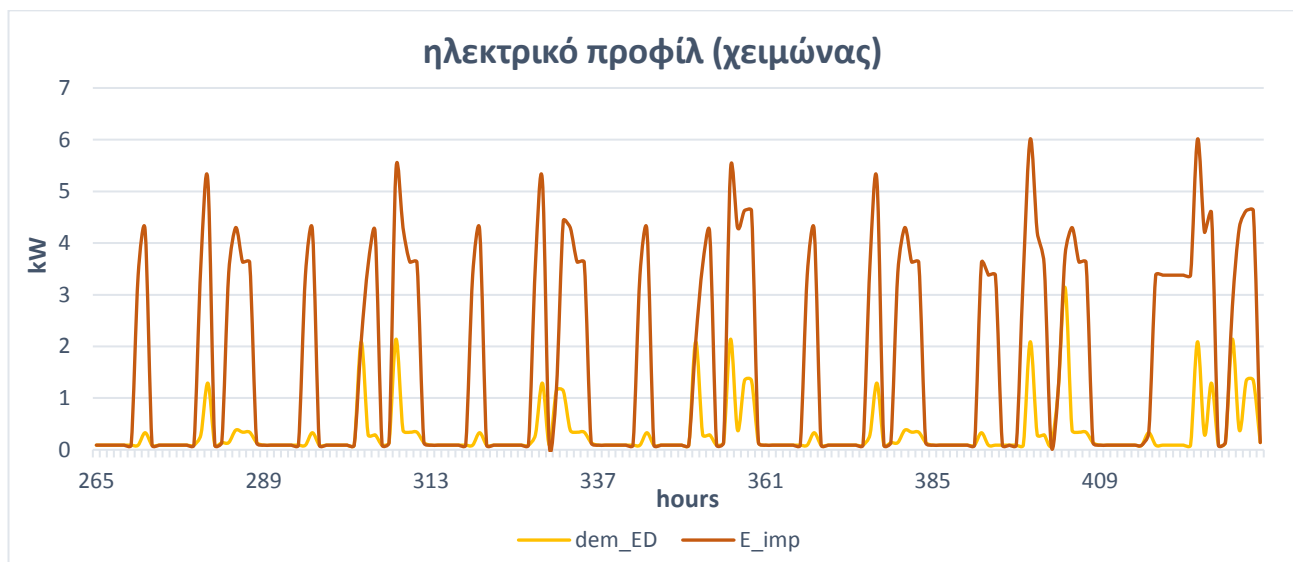
5.2.1 Αποτελέσματα σεναρίου 1.1 (χωρίς αποθήκευση ενέργειας)

Το θερμικό προφίλ της χειμερινής τυπικής εβδομάδας για το απλούστερο σενάριο 1.1, όπου χρησιμοποιείται μόνο μια αντλία θερμότητας φαίνεται στο γράφημα 7. Όπως αναμενόταν, η λειτουργία της αντλίας (H_ASHP) συμβαδίζει απόλυτα με τη θερμική ζήτηση (dem_HD) καθώς η εγκατάσταση δεν διαθέτει κάποια δυνατότητα ευελιξίας.

Στο γράφημα 8 παρουσιάζεται για το σενάριο 1.1 το ηλεκτρικό προφίλ για τη χειμερινή τυπική εβδομάδα. Λόγω της έλλειψης δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από την εγκατάσταση παρατηρούμε ότι όλη η ηλεκτρική ζήτηση (dem_ED) καλύπτεται με αγορά ρεύματος από το δίκτυο (E_imp). Έτσι, σε κάθε ώρα, τόσο οι ηλεκτρικές ανάγκες του νοικοκυριού, όσο και η τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας καλύπτονται εξ' ολοκλήρου με εισαγωγή από το δίκτυο. Αυτός είναι και ο λόγος που η καμπύλη της εισαγωγής βρίσκεται ψηλότερα από την καμπύλη ηλεκτρικής ζήτησης, αφού η διαφορά τους αντιστοιχεί στο φορτίο που απαιτεί η αντλία για τη λειτουργία της.



Γράφημα 7: Σενάριο 1.1 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 8: Σενάριο 1.1 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στα γραφήματα 9 και 10 όπου παρουσιάζονται τα προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα. Η λογική με την οποία καλύπτονται οι θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες είναι ακριβώς η ίδια με την περίπτωση της χειμερινής τυπικής εβδομάδας.



Γράφημα 9: Σενάριο 1.1 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



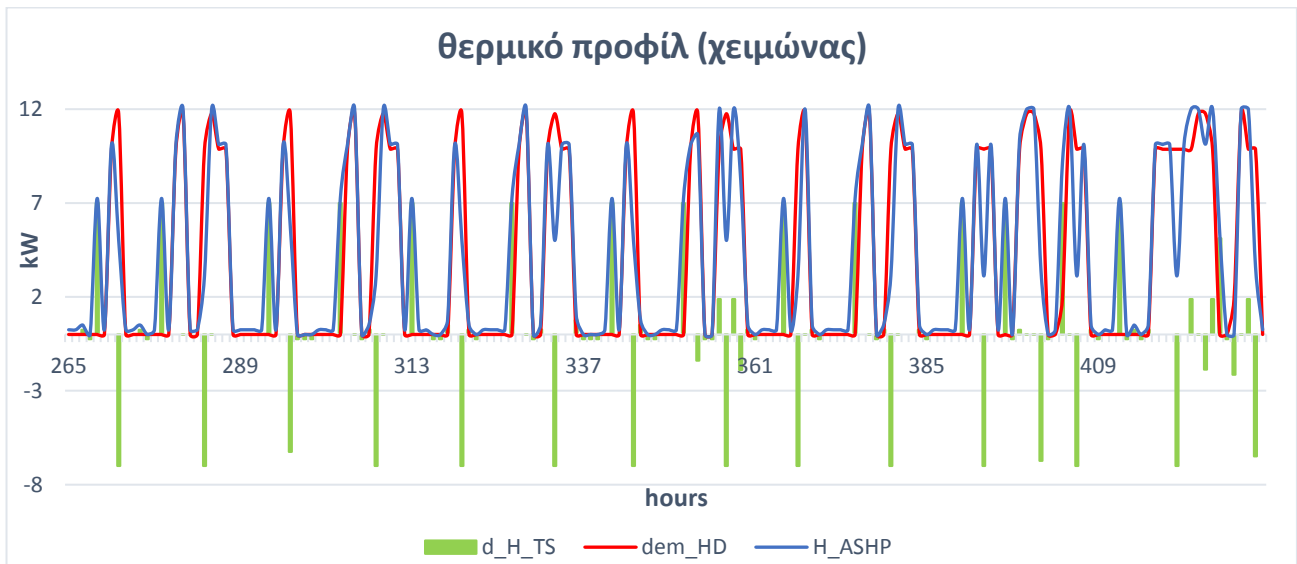
Γράφημα 10: Σενάριο 1.1 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

5.2.2 Αποτελέσματα σεναρίου 1.2 (θερμική αποθήκευση ενέργειας)

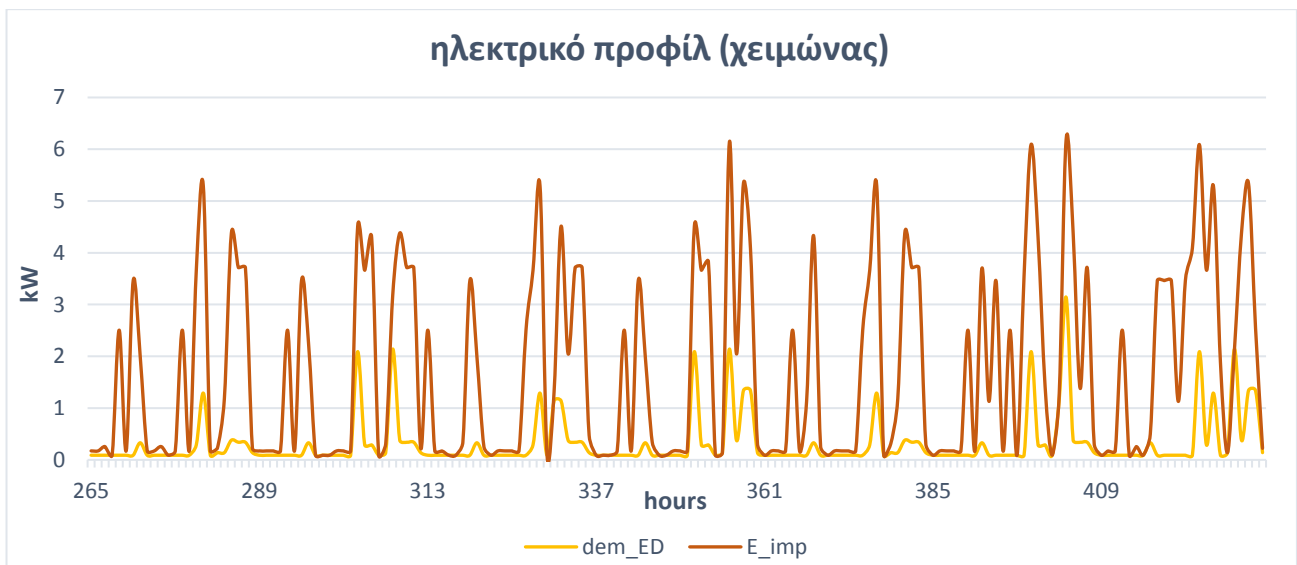
Στο γράφημα 11 παρουσιάζεται το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για την περίπτωση του σεναρίου 1.2. Οι κατακόρυφες στήλες πράσινου χρώματος (d_{H_TS}), αναπαριστούν στις αντίστοιχες ώρες, την αύξηση (θετικό πρόσημο) ή τη μείωση (αρνητικό πρόσημο) αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή. Όπως φαίνεται, σε αντίθεση με το σενάριο 1.1, η λειτουργία της αντλίας θερμότητας, δεν ακολουθεί πιστά τη θερμική ζήτηση. Αυτό, οφείλεται στην προσθήκη της δεξαμενής νερού για θερμική αποθήκευση, η οποία δίνει την ευελιξία στην αντλία να παράγει θερμική ενέργεια σε ώρες που το κόστος αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερο (όπως αποδεικνύεται από τη σύγκριση με την καμπύλη τιμών ηλεκτρικής ενέργειας) και να την αποθηκεύει για τη μετέπειτα αξιοποίησή της. Έτσι, στις ώρες που υπάρχει θερμική ζήτηση, χρησιμοποιείται πρώτα η αποθηκευμένη ενέργεια στη δεξαμενή, ενώ η αντλία λειτουργεί

σε χαμηλότερη ισχύ για να καλύψει τις επιπλέον ανάγκες. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση του ετήσιου λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης.

Το ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο αυτό φαίνεται στο γράφημα 12. Καθώς δεν υπάρχει εναλλακτική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο η ηλεκτρική ζήτηση από το νοικοκυριό, όσο και η τροφοδοσία της αντλίας εξυπηρετούνται συνεχώς με την αγορά ρεύματος από το δίκτυο.



Γράφημα 11: Σενάριο 1.2 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

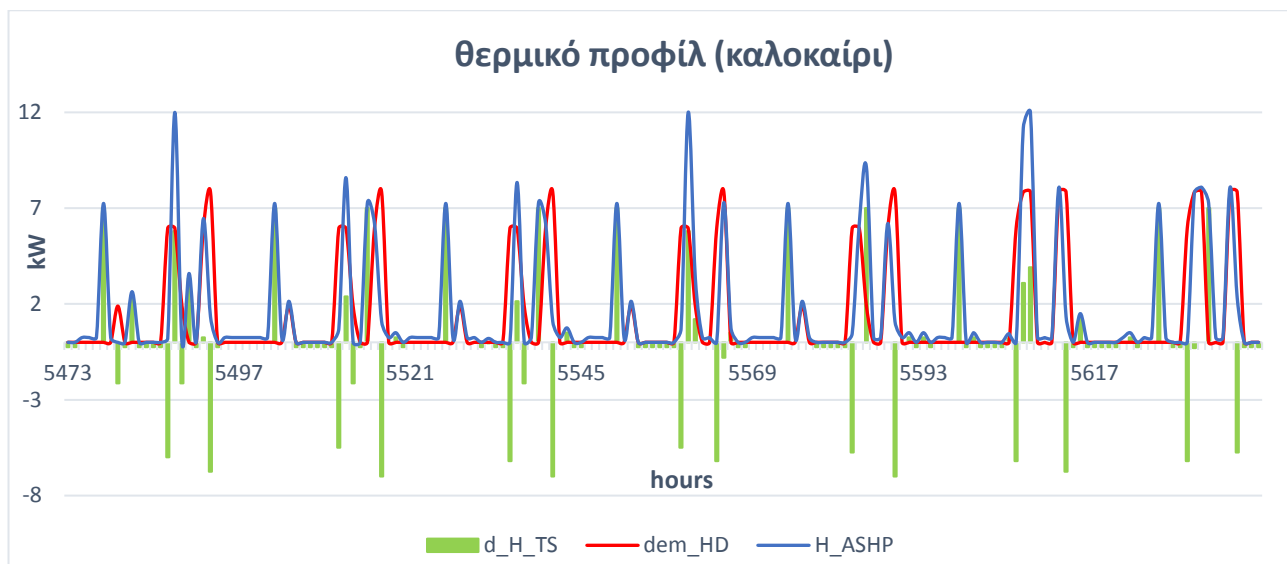


Γράφημα 12: Σενάριο 1.2 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

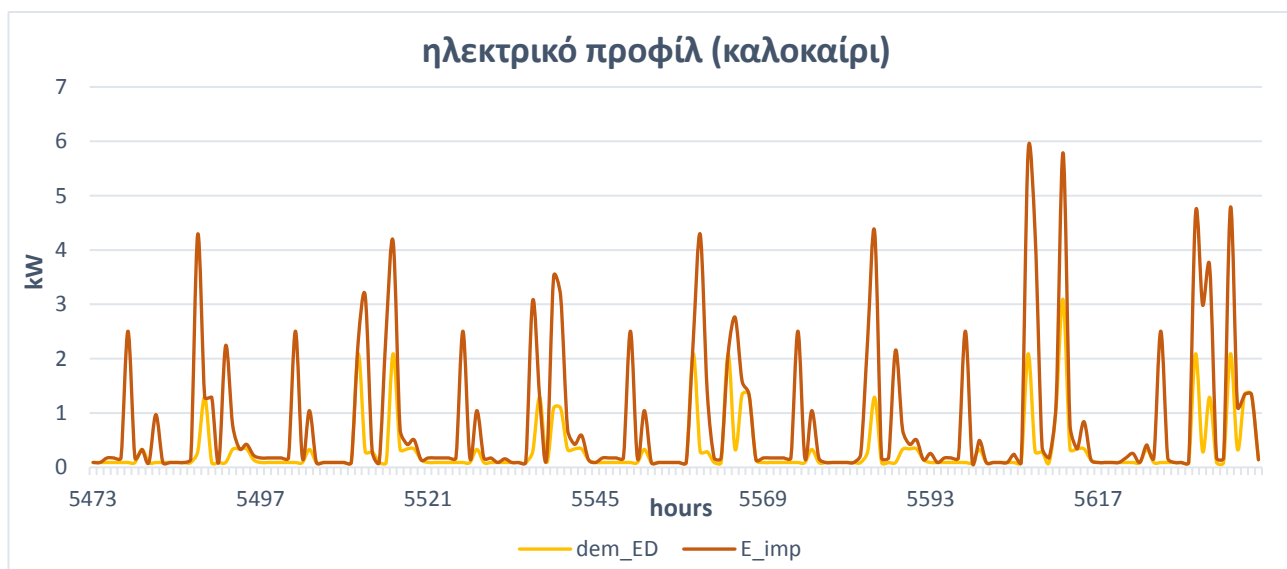
Στο γράφημα 13 παρουσιάζεται το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας. Η λογική λειτουργίας του συστήματος είναι παρόμοια με αυτήν της χειμερινής εβδομάδας. Ωστόσο, ενώ το χειμώνα υπήρχε η τάση η αντλία να λειτουργεί για να αποθηκεύει ενέργεια, κυρίως σε ώρες εκτός της ζήτησης, εδώ παρατηρείται σε αρκετές περιπτώσεις, που υπάρχει θερμική ζήτηση, η αντλία να

λειτουργεί σε μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ισχύ για να αποθηκεύσει ενέργεια. Αυτό συμβαίνει, επειδή στις περιπτώσεις αυτές τυχαίνει οι ώρες χαμηλών τιμών ηλεκτρικού ρεύματος να συμπίπτουν με τις ώρες θερμικής ζήτησης.

Το γράφημα 14 αποτυπώνει το ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής θερινής εβδομάδας, το οποίο δημιουργήθηκε με την ίδια ακριβώς λογική, όπως εκείνο της χειμερινής εβδομάδας.



Γράφημα 13: Σενάριο 1.2 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



Γράφημα 14: Σενάριο 1.2 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

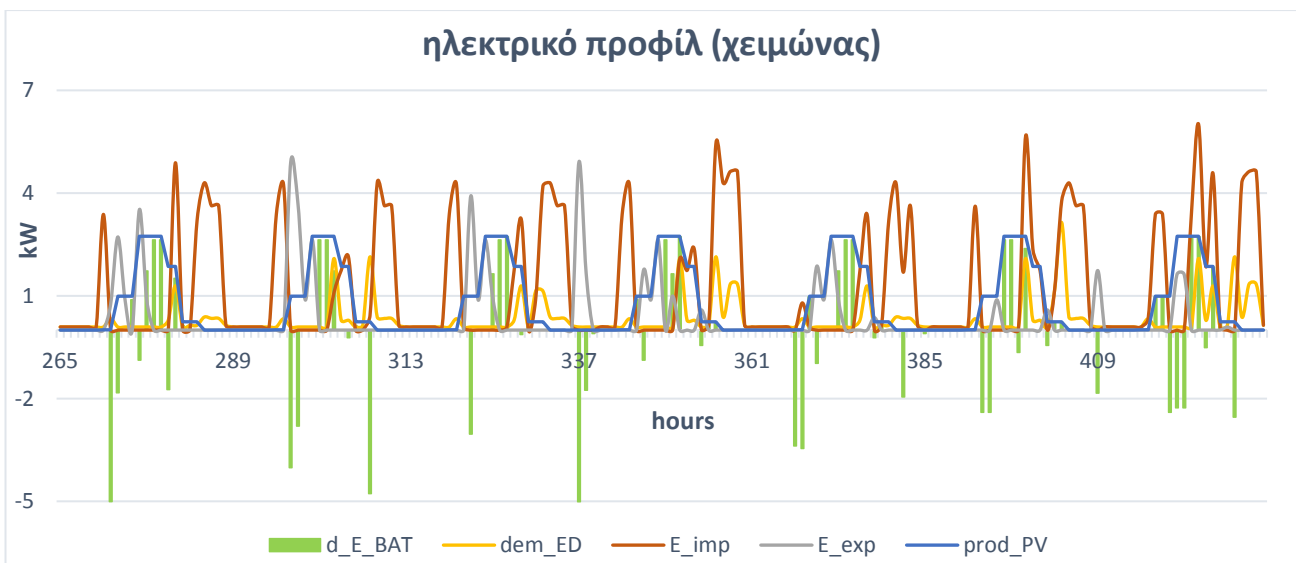
5.2.3 Αποτελέσματα σεναρίου 1.3 (χημική αποθήκευση ενέργειας)

Το γράφημα 15 δείχνει το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο 1.3. Αφού η μόνη πηγή παραγωγής θερμικής ενέργειας είναι η αντλία, χωρίς τη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης, επανέρχεται η λογική της συμπόρευσης της λειτουργίας της με τη θερμική ζήτηση.

Στο γράφημα 16 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό προφίλ του σεναρίου αυτού για την τυπική χειμερινή εβδομάδα. Εδώ, έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, η οποία αποθηκεύεται στην μπαταρία. Οι στήλες πράσινου χρώματος (d_E_BAT) αντιπροσωπεύουν, εδώ, τις φορτίσεις ή αποφορτίσεις της μπαταρίας. Κάθε φορά που υπάρχει ηλεκτρική ζήτηση από το νοικοκυριό, ή για την τροφοδοσία της αντλίας, το σύστημα είτε αξιοποιεί την αποθηκευμένη στη μπαταρία ενέργεια και εισάγει την επιπλέον από το δίκτυο, είτε εισάγει εξ' ολοκλήρου από το δίκτυο, όταν η μπαταρία είναι αφόρτιστη. Στην περίπτωση που η μπαταρία είναι φορτισμένη και δεν υπάρχει ζήτηση, το σύστημα επιλέγει να πουλήσει ηλεκτρική ενέργεια μόλις συναντήσει τη μέγιστη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξοικονομεί όσο το δυνατόν περισσότερο, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του ετήσιου λειτουργικού κόστους.



Γράφημα 15: Σενάριο 1.3 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

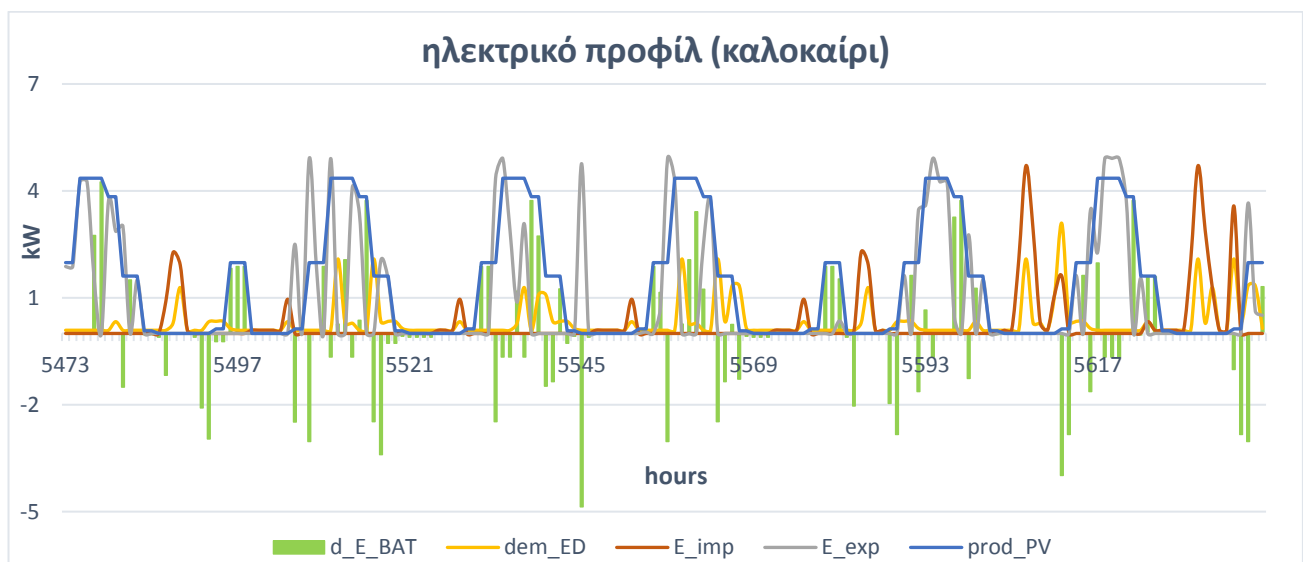


Γράφημα 16: Σενάριο 1.3 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Στα γραφήματα 17 και 18 αποτυπώνονται αντίστοιχα το θερμικό και ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα, στα οποία ακολουθείται η ίδια λογική λειτουργίας με τη χειμερινή εβδομάδα. Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο ηλεκτρικών προφίλ έγκειται στο ότι το καλοκαίρι μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η εισαγωγή από το δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πώληση ενέργειας σε αυτό. Τούτο, ασφαλώς, οφείλεται στη μεγιστοποίηση της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά πάνελ κατά τη θερινή περίοδο, κάτι που δίνει τη δυνατότητα για κάλυψη του μεγαλύτερου ποσοστού ηλεκτρικών αναγκών από την αποθηκευμένη ενέργεια, αφήνοντας παράλληλα αρκετή περίσσεια για εξαγωγή.



Γράφημα 17: Σενάριο 1.3 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



Γράφημα 18: Σενάριο 1.3 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

5.3 Σενάριο 2^ο: Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler)

Στο δεύτερο σενάριο έγινε χρήση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) και βοηθητικού λέβητα θερμότητας. Και εδώ, εξετάστηκε αρχικά η περίπτωση χωρίς αποθήκευση ενέργειας, και στη συνέχεια διαδοχικά ο συνδυασμός με θερμική ή χημική αποθήκευση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης για τις τρεις εναλλακτικές του σεναρίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 8.

σύστημα	ισχύς	χωρητικότητα	απόδοση
συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ)	$P_e : 2 \text{ kW}_e$		$n_e : 0.2$
	$P_{th} : 6 \text{ kW}_{th}$		$n_{th} : 0.6$
λέβητας φυσικού αερίου	6 kW_{th}		0.85
δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης		7 kWh_{th}	
φωτοβολταϊκά πάνελ	7 kW_e		
μπαταρία χημικής αποθήκευσης	5 kW_e	7 kWh_e	

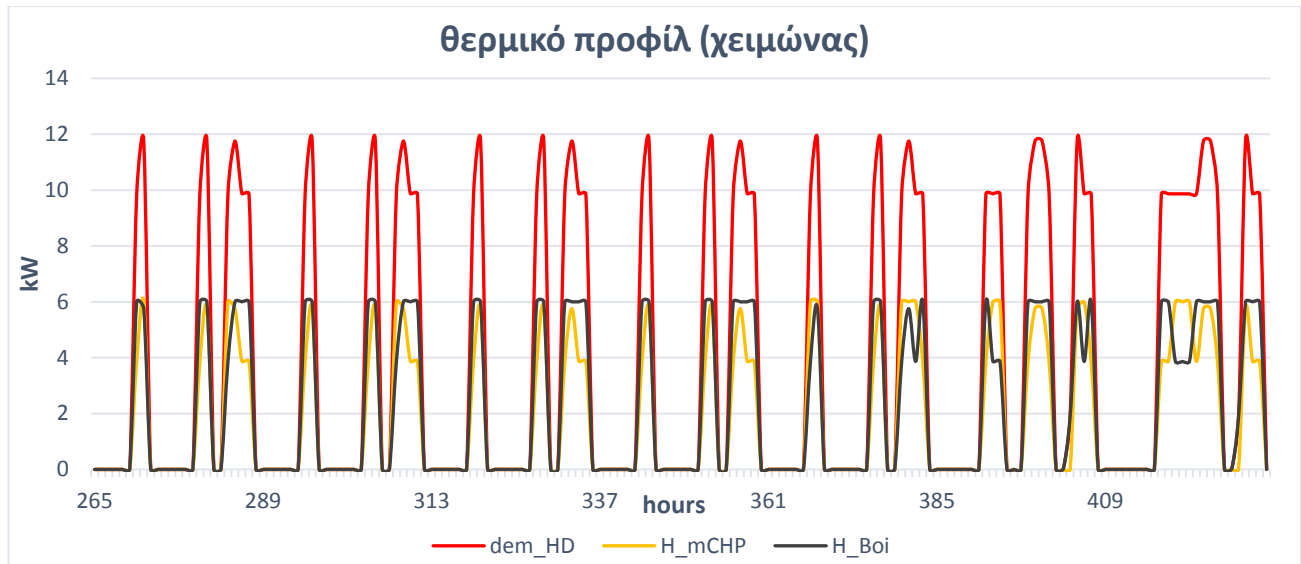
Πίνακας 8: Σενάριο 2 – χαρακτηριστικά εγκατάστασης

5.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου 2.1 (χωρίς αποθήκευση ενέργειας)

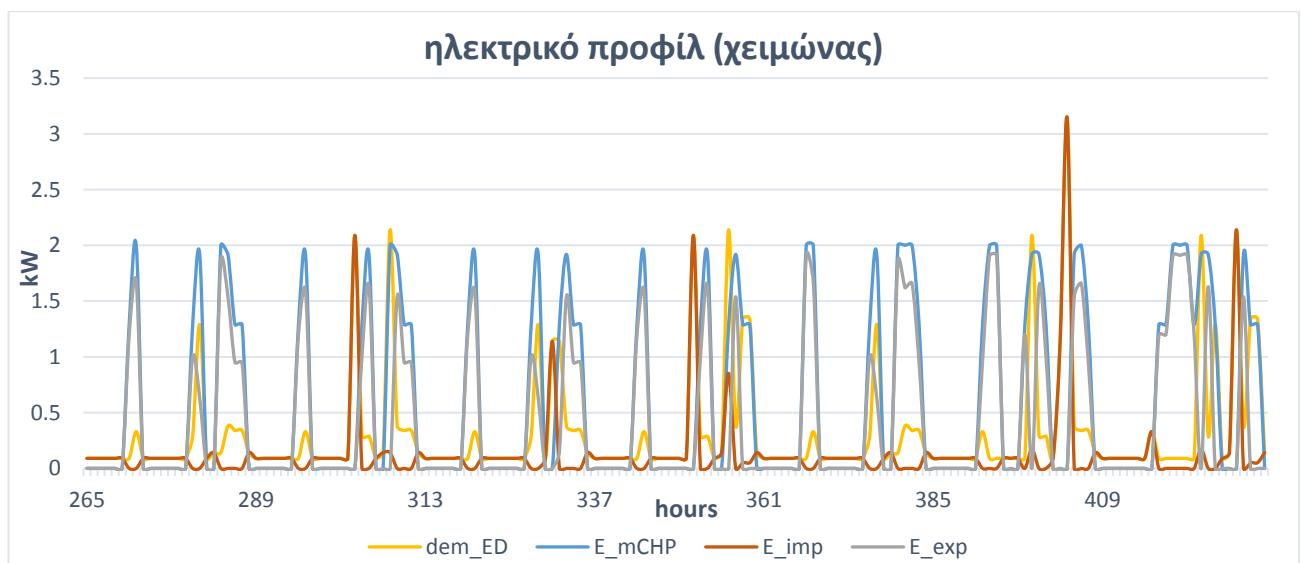
Το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο 2.1 παρουσιάζεται στο γράφημα 19. Η θερμική ζήτηση καλύπτεται με συνεργασία της ΣΗΘ και του λέβητα. Όπως παρατηρήθηκε από τα αναλυτικά αποτελέσματα, το σύστημα έχει την τάση να εξαντλεί την ισχύ του λέβητα και στη συνέχεια με τη ΣΗΘ να καλύπτει την επιπλέον ισχύ. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τόσο η ΣΗΘ, όσο και ο λέβητας καταναλώνουν φυσικό αέριο, ωστόσο ο τελευταίος έχει πολύ υψηλότερο συντελεστή θερμικής απόδοσης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες ώρες, όπου το σύστημα λειτουργεί αντίστροφα, εξαντλεί δηλαδή την ισχύ της ΣΗΘ και συμπληρώνει με το λέβητα. Μετά από σύγκριση με την καμπύλη τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται στις περιπτώσεις που η θερμική ζήτηση συμπίπτει με τα μέγιστα των τιμών του ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, στα σημεία αυτά, κρίθηκε μέσω της βελτιστοποίησης πιο συμφέρον οικονομικά να εξαντληθεί η ισχύς της ΣΗΘ, καθώς η εξοικονόμηση από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ υψηλή τιμή, είναι μεγαλύτερη της εξοικονόμησης καυσίμου από το λέβητα λόγω της διαφοράς θερμικών αποδόσεων.

Στο γράφημα 20 φαίνεται το ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα. Στο σενάριο αυτό η ηλεκτρική ζήτηση αποτελείται μόνο από τις ηλεκτρικές ανάγκες του νοικοκυριού και καλύπτεται κατά κύριο λόγο από τη ΣΗΘ. Αυτό συμβαίνει όταν η ηλεκτρική ζήτηση συμπίπτει με

τη θερμική και έτσι η ΣΗΘ βρίσκεται σε λειτουργία για την κάλυψη του θερμικού φορτίου. Στις περιπτώσεις που υπάρχει απαίτηση για ηλεκτρική ενέργεια εκτός των ωρών θερμικής ζήτησης, γίνεται εισαγωγή ρεύματος από το δίκτυο, καθώς είναι σαφώς φθηνότερο από τη λειτουργία της ΣΗΘ με φυσικό αέριο. Παρατηρούνται ακόμα, στο σενάριο αυτό, σημαντικές εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, καθώς η παραγωγή της ΣΗΘ υπερκαλύπτει κατά πολύ την ηλεκτρική ζήτηση.

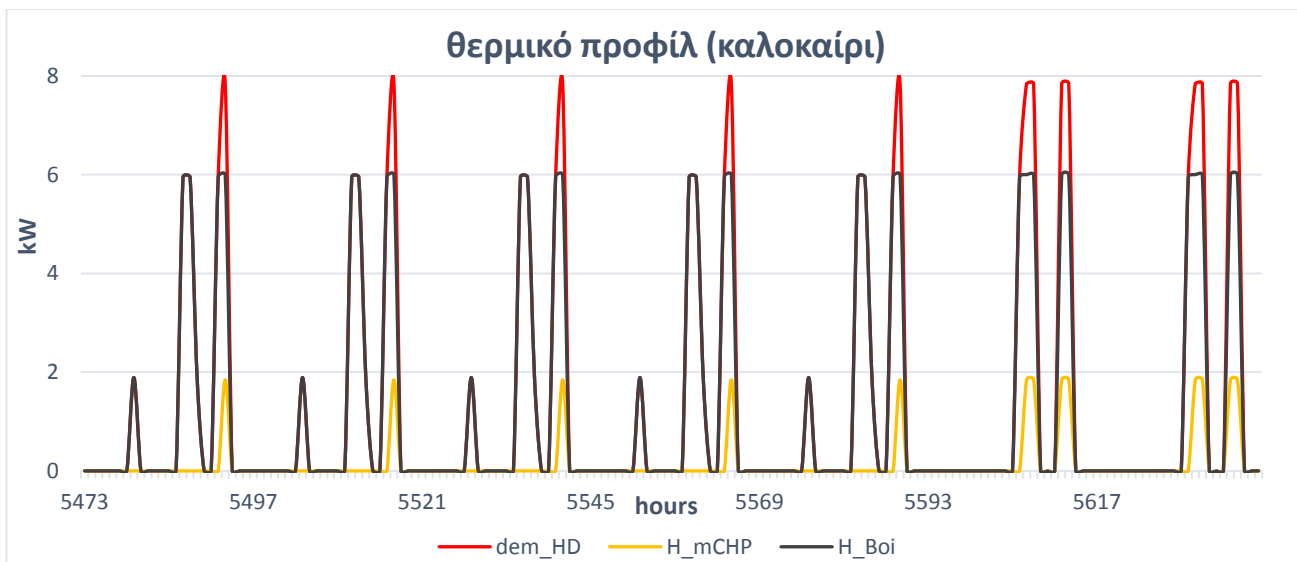


Γράφημα 19: Σενάριο 2.1 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

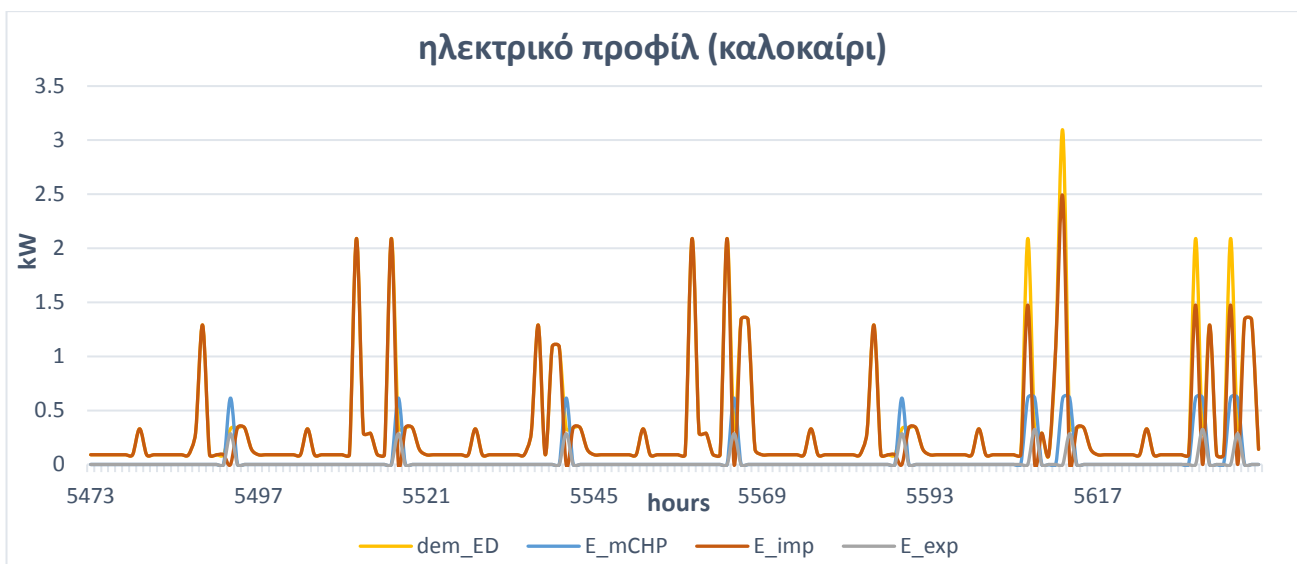


Γράφημα 20: Σενάριο 2.1 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Το γράφημα 21 αποτυπώνει το θερμικό προφίλ της τυπικής θερινής εβδομάδας για το σενάριο 2.1. Εδώ, είναι ξεκάθαρη η προτίμηση του συστήματος για την εξάντληση της ισχύος του λέβητα και τη συμπλήρωση από τη ΣΗΘ, με αποτέλεσμα αυτή να λειτουργεί σε ισχύες πολύ χαμηλότερες της ονομαστικής. Για το λόγο αυτό στο ηλεκτρικό προφίλ (γράφημα 22) παρατηρείται ότι η ηλεκτρική ζήτηση εξυπηρετείται βασικά με εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο, ενώ και η πώληση ηλεκτρικού ρεύματος έχει μειωθεί στο ελάχιστο.



Γράφημα 21: Σενάριο 2.1 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

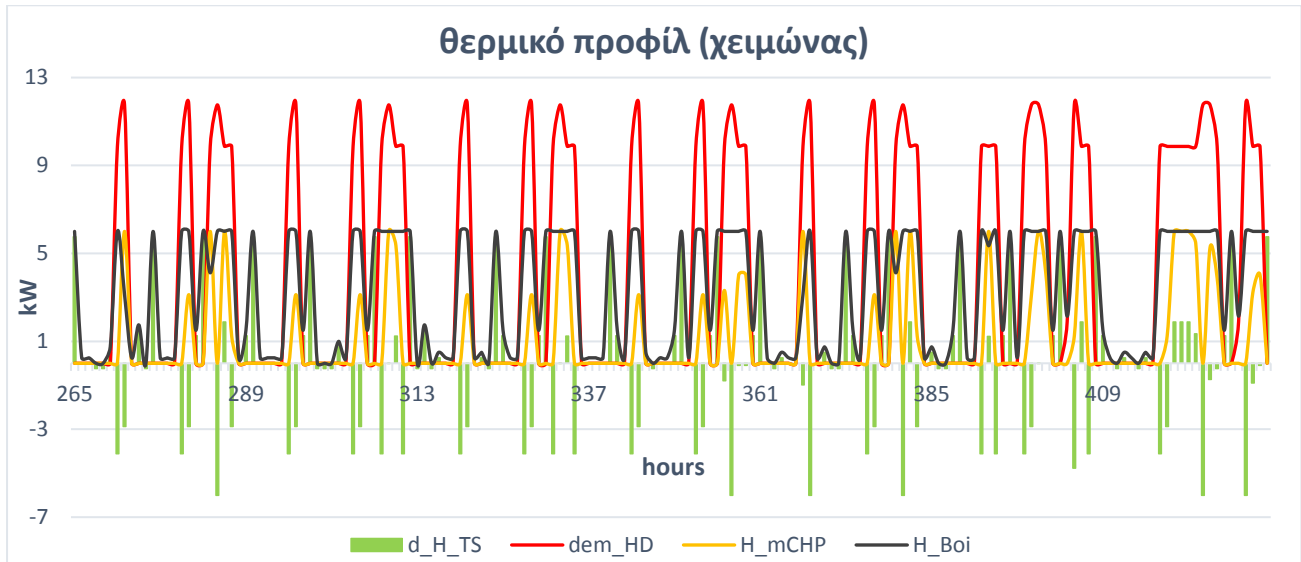


Γράφημα 22: Σενάριο 2.1 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

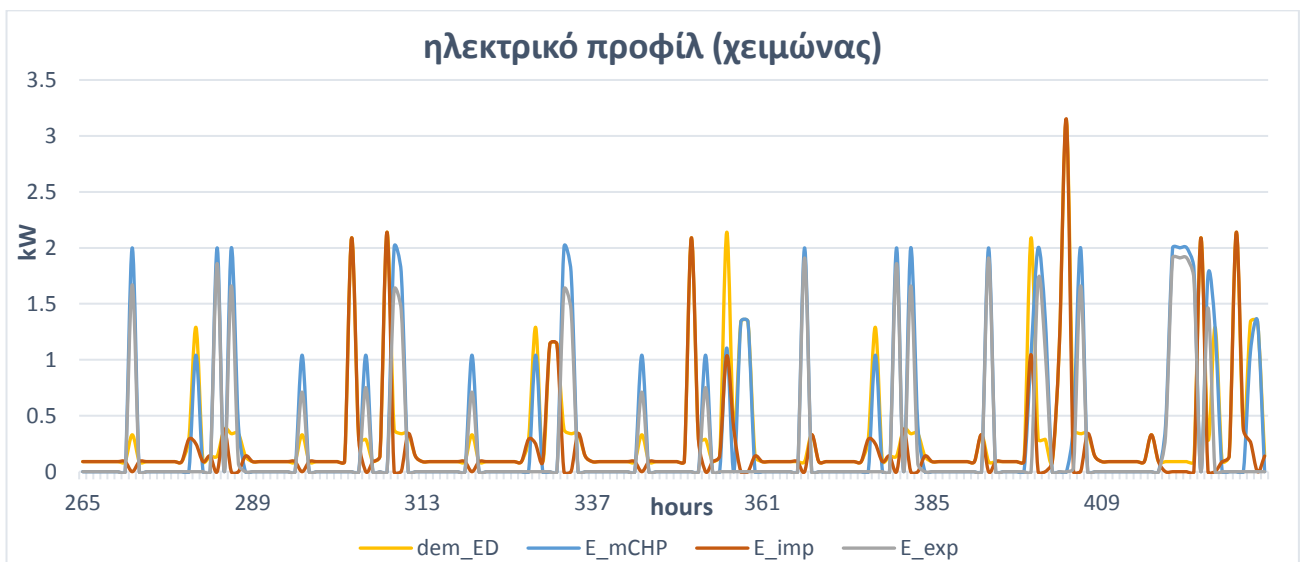
5.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου 2.2 (θερμική αποθήκευση ενέργειας)

Στο γράφημα 23 παρουσιάζεται το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο 2.2. Στην περίπτωση αυτή, στο συνδυασμό της ΣΗΘ με το λέβητα, προστίθεται η δεξαμενή νερού για θερμική αποθήκευση ενέργειας. Όπως και στο σενάριο 2.1, έτσι και εδώ, φαίνεται η προτίμηση του συστήματος για εξάντληση πρωταρχικά της ισχύος του λέβητα και στη συνέχεια της ΣΗΘ. Αυτό αποδεικνύεται, από το γεγονός ότι σε κάθε περίπτωση, για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή σε ώρες διαφορετικές από εκείνες της θερμικής ζήτησης, χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο λέβητας. Σε ελάχιστες ώρες μέσα στην εβδομάδα η ισχύς λειτουργίας της ΣΗΘ ξεπερνάει αυτή του λέβητα, και οι ώρες αυτές αντιστοιχούν σε πολύ υψηλές τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Το ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας φαίνεται στο γράφημα 24. Είναι ξεκάθαρο, ότι τις ώρες λειτουργίας της ΣΗΘ για την κάλυψη θερμικού φορτίου, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει, είναι υπεραρκετή για την εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών απαιτήσεων του νοικοκυριού, ενώ περισσεύει και ένα σημαντικό ποσοστό για πώληση στο δίκτυο. Αντίθετα, στις ώρες που η ηλεκτρική ζήτηση δεν συμπίπτει με τη θερμική, πραγματοποιείται εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για την κάλυψή της.



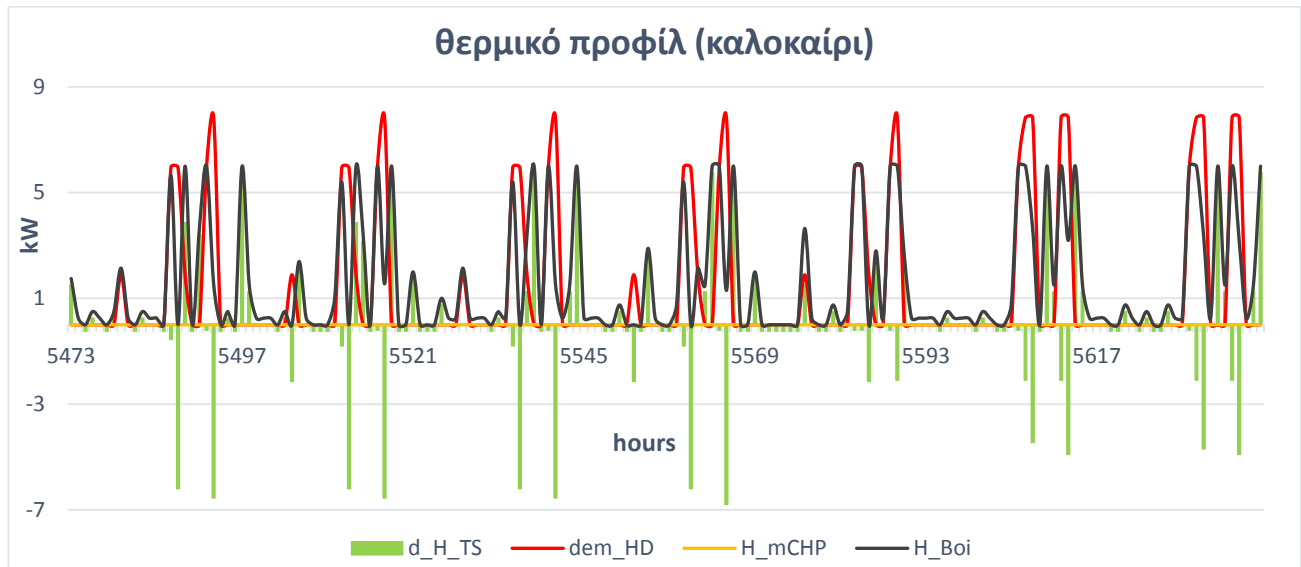
Γράφημα 23: Σενάριο 2.2 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



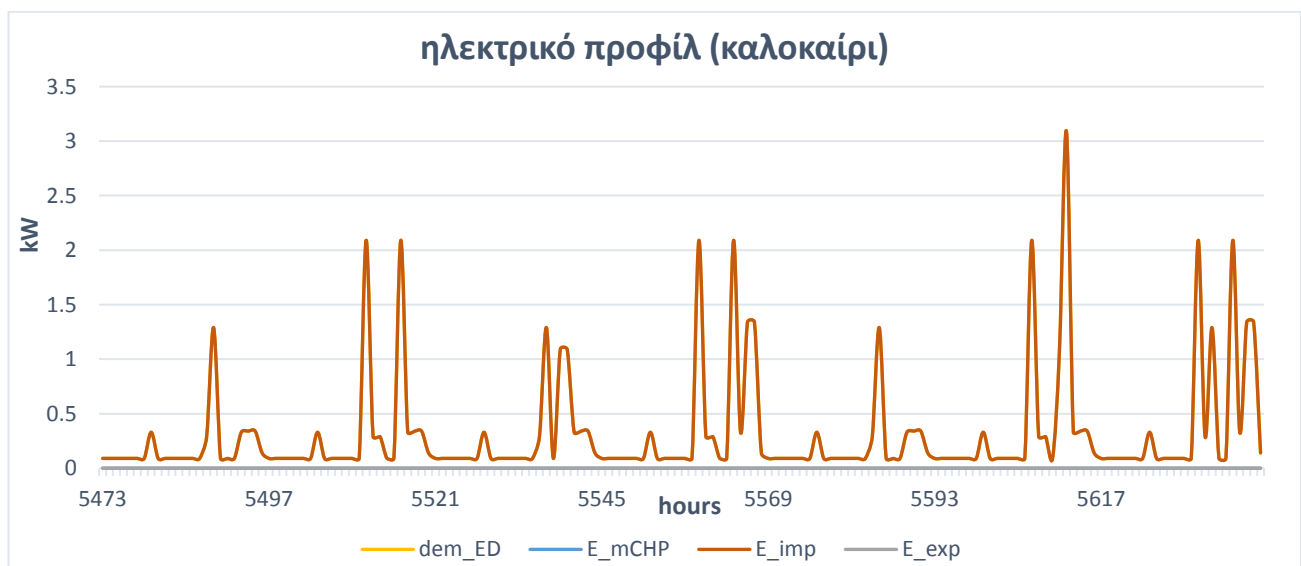
Γράφημα 24: Σενάριο 2.2 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Στα γραφήματα 25 και 26 παρουσιάζονται, αντίστοιχα, το θερμικό και ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής θερινής εβδομάδας. Παρατηρείται, ότι λόγω των χαμηλών (σε σχέση με το χειμώνα) μέγιστων θερμικών φορτίων, το σύστημα καταφέρνει να εξυπηρετήσει εξ' ολοκλήρου τη ζήτηση μόνο με το λέβητα, χωρίς να τεθεί καθόλου σε λειτουργία η ΣΗΘ, κάτι που οδηγεί στο ελάχιστο λειτουργικό κόστος. Έτσι, στο ηλεκτρικό προφίλ, φαίνεται, ότι εξ' αιτίας της μη χρήσης της ΣΗΘ,

η ηλεκτρική ζήτηση καλύπτεται αποκλειστικά με αγορά από το δίκτυο, ενώ προφανώς, οι εξαγωγές είναι μηδενικές.



Γράφημα 25: Σενάριο 2.2 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



Γράφημα 26: Σενάριο 2.2 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

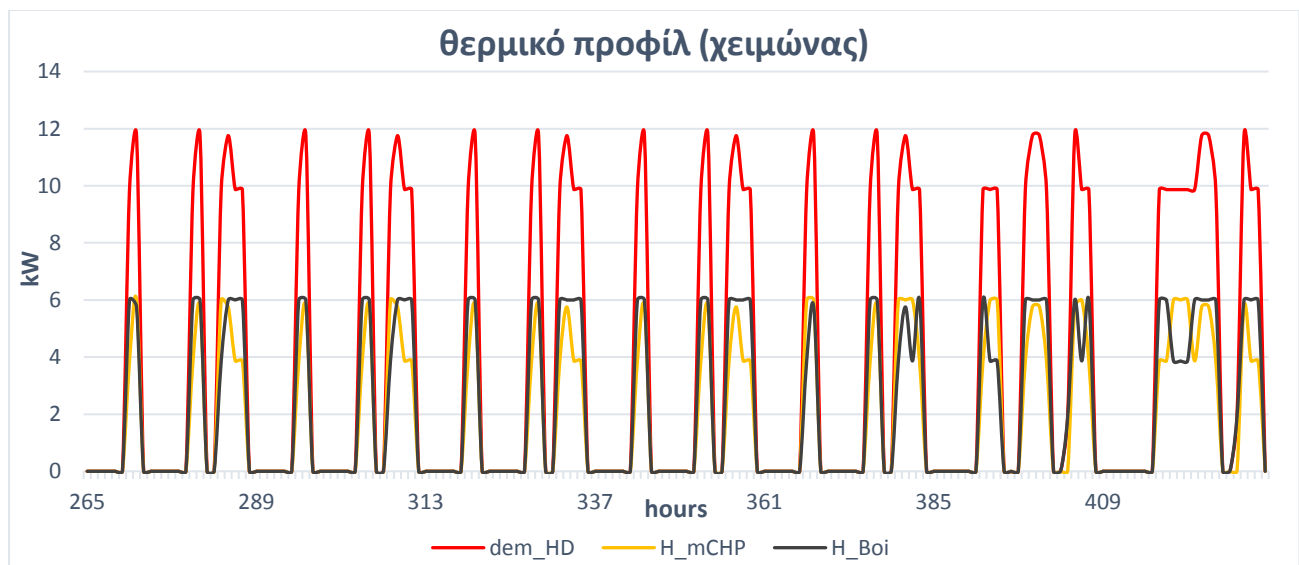
5.3.3 Αποτελέσματα σεναρίου 2.3 (χημική αποθήκευση ενέργειας)

ι) Η μπαταρία τροφοδοτείται αποκλειστικά από τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

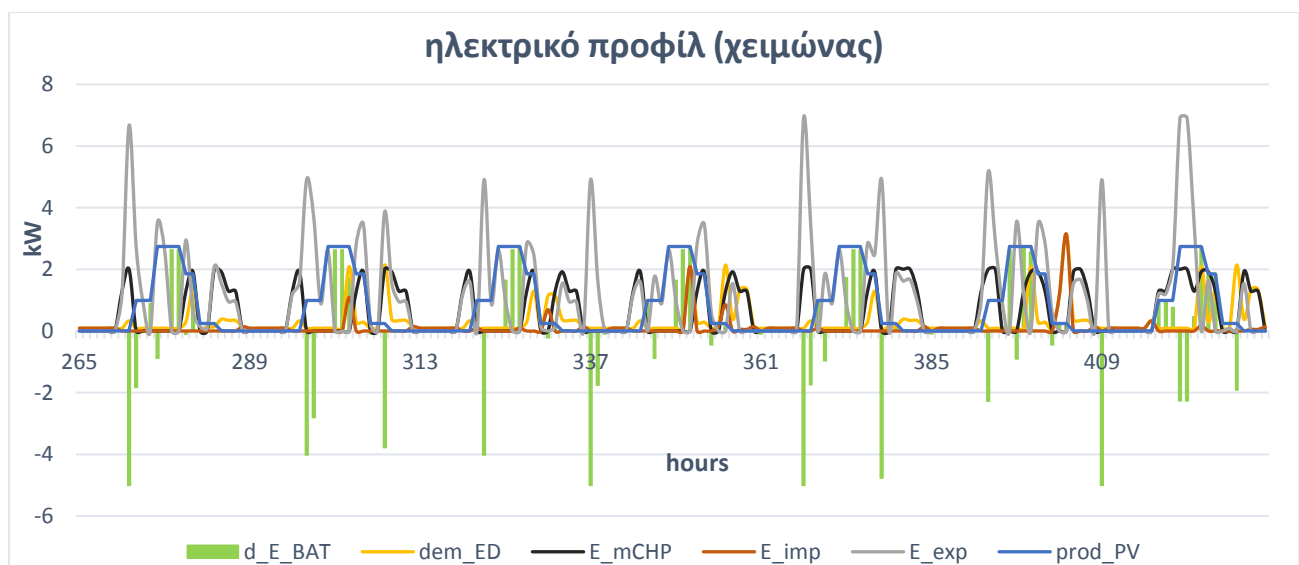
Στην πρώτη εναλλακτική του σεναρίου 2.3 η μπαταρία τροφοδοτείται αποκλειστικά από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Στο γράφημα 27 παρουσιάζεται το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο αυτό. Παρατηρείται και τώρα, ότι η κάλυψη της θερμικής ζήτησης, μοιράζεται στο λέβητα και τη ΣΗΘ, αφού η διαστασιολόγησή τους είναι τέτοια, ώστε λειτουργώντας στην ονομαστική τους ισχύ να επαρκούν για το μισό του μέγιστου θερμικού φορτίου (περί τα 12

kW). Στις περιπτώσεις που το θερμικό φορτίο είναι μικρότερο του μέγιστου, εξαντλείται πρώτα η ισχύς του λέβητα, εκτός από τις ώρες εκείνες που η τιμή του ρεύματος φτάνει στο ανώτερο σημείο και συνεπώς προτιμάται η εξάντληση της ισχύος της ΣΗΘ για πώληση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Το ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας φαίνεται στο γράφημα 28. Είναι σαφές, ότι η ταυτόχρονη χρήση της ΣΗΘ και των φωτοβολταϊκών παρέχει ηλεκτρική ενέργεια πολύ περισσότερη από τις ηλεκτρικές ανάγκες του νοικοκυριού. Έτσι, το σύστημα έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό και να εξάγει μεγάλο ποσοστό στο δίκτυο, περιορίζοντας τις εισαγωγές στο ελάχιστο.

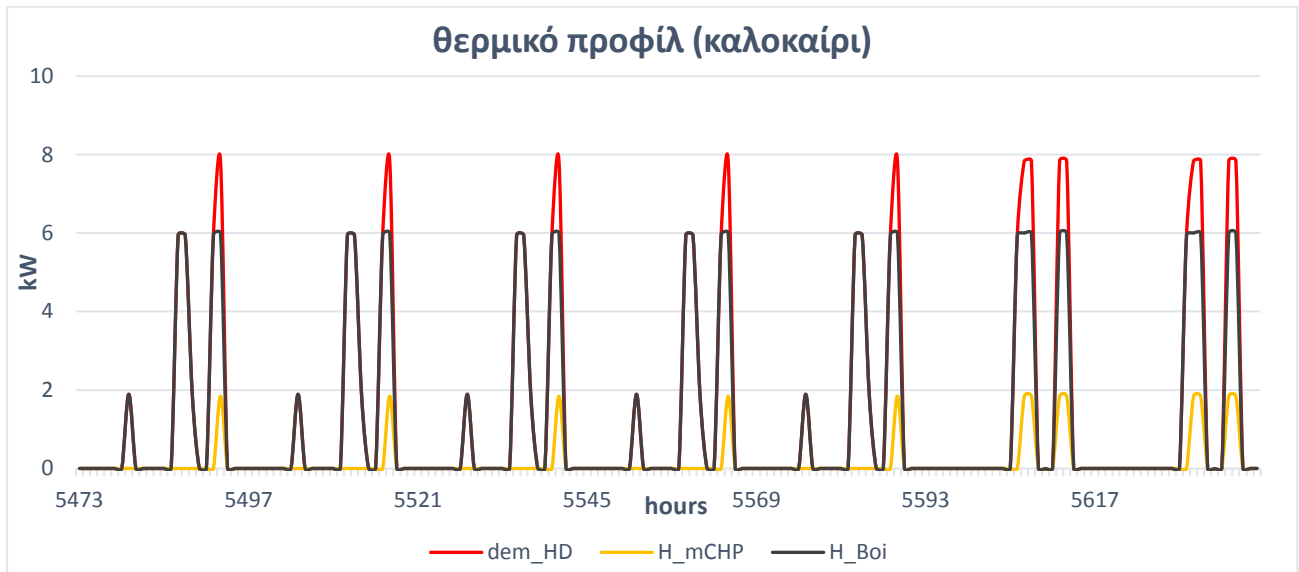


Γράφημα 27: Σενάριο 2.3.i – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

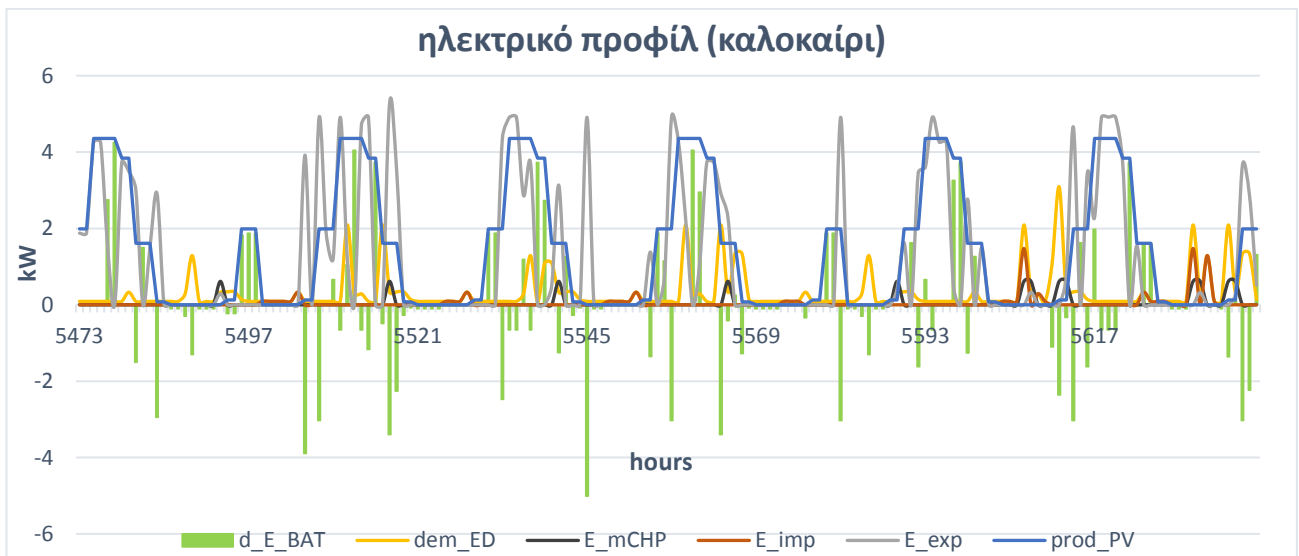


Γράφημα 28: Σενάριο 2.3.i – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Το γράφημα 29 δείχνει το θερμικό προφίλ της τυπικής θερινής εβδομάδας για το σενάριο 2.3.i. Λόγω των χαμηλών (σε σύγκριση με το χειμώνα) μέγιστων θερμικών φορτίων ο ρόλος της ΣΗΘ περιορίζεται και πάλι σε συμπληρωματικό ρόλο, καθώς το σύστημα επιλέγει τη λειτουργία του λέβητα σε πλήρη ισχύ, εξαιτίας της υπεροχής του σε θερμικό βαθμό απόδοσης. Έτσι, στο ηλεκτρικό προφίλ της θερινής περιόδου (γράφημα 30), η προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι περιορισμένη. Ωστόσο, η μεγαλύτερη παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάνελ το καλοκαίρι, επιτρέπει τόσο την εξυπηρέτηση της ηλεκτρικής ζήτησης, όσο και τη διατήρηση των εξαγωγών σε υψηλά επίπεδα, καθιστώντας αμελητέες τις εισαγωγές.



Γράφημα 29: Σενάριο 2.3.i – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

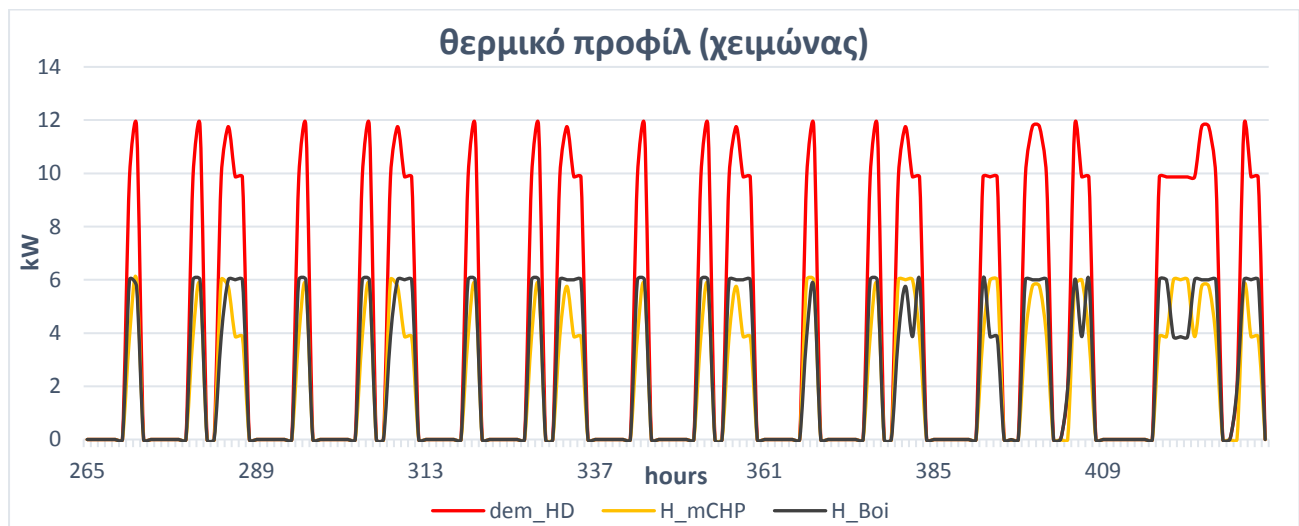


Γράφημα 30: Σενάριο 2.3.i – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

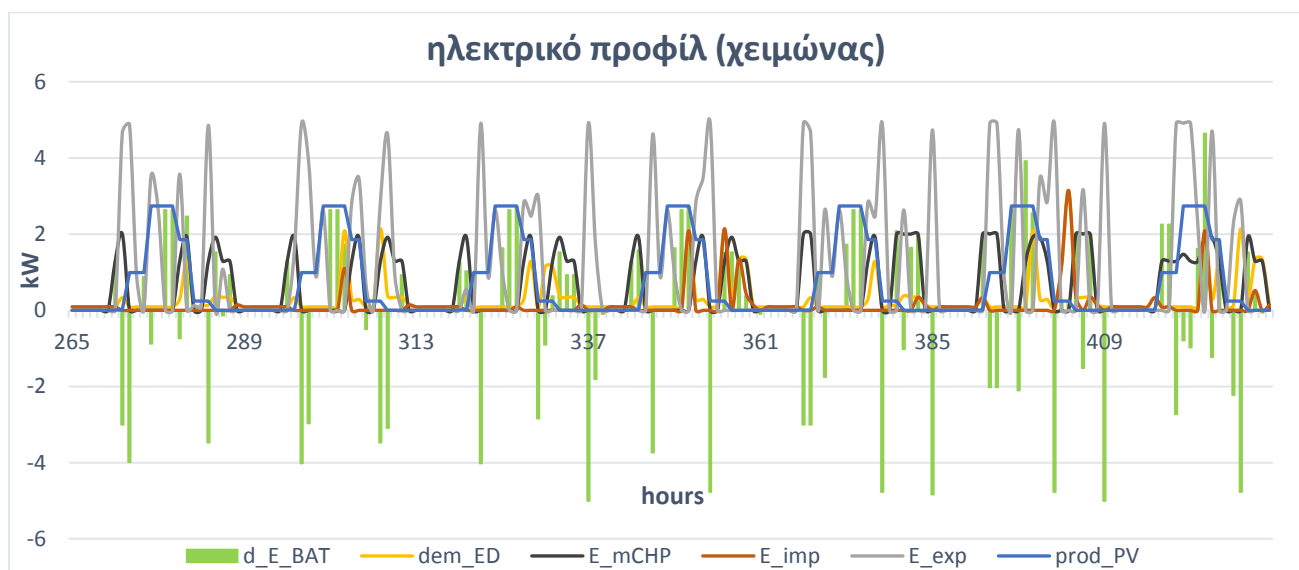
ii) Η μπαταρία τροφοδοτείται από τα πάνελ και από τη ΣΗΘ

Στη δεύτερη εναλλακτική αυτού του σεναρίου η μπαταρία τροφοδοτείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ και από τη ΣΗΘ. Τα θερμικά προφίλ για την τυπική χειμερινή και θερινή εβδομάδα (γραφήματα 31 και 33) δημιουργήθηκαν με την ίδια λογική με την προηγούμενη περίπτωση. Στις ώρες, επομένως, που δεν χρειάζεται να εξαντληθεί η ισχύς και των δύο συστημάτων, επιλέγεται η λειτουργία του λέβητα σε πλήρη ισχύ, εκτός από τις περιπτώσεις πολύ υψηλών τιμών ρεύματος.

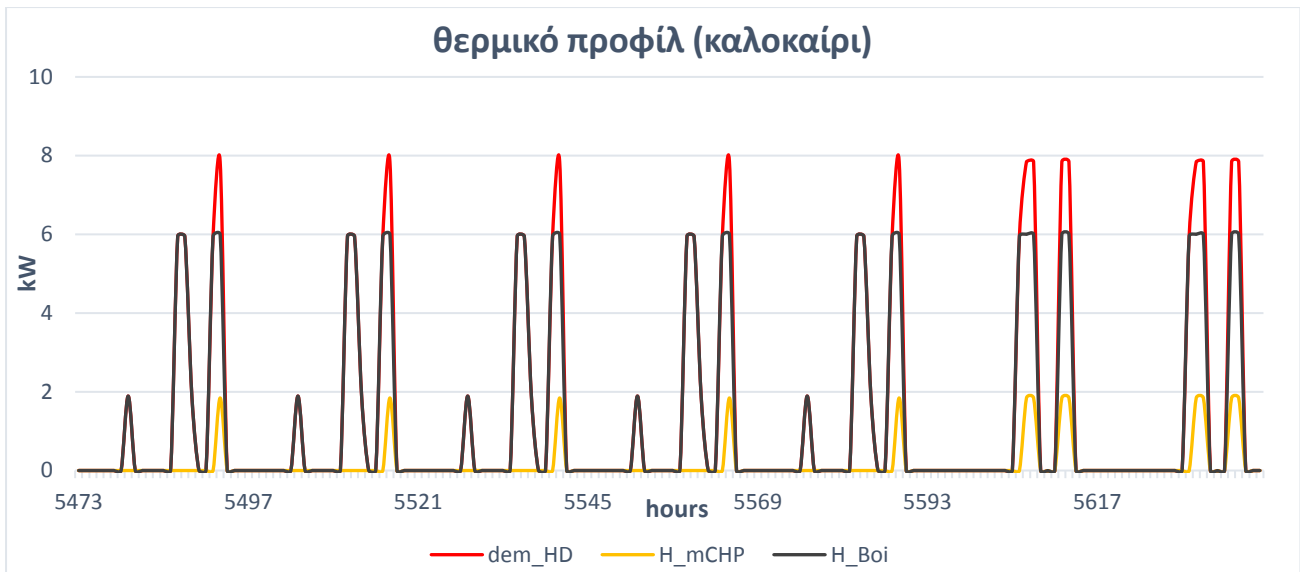
Στα γραφήματα 32 και 34 παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά προφίλ των δύο τυπικών εβδομάδων. Η διαφορά που παρατηρούμε στη χειμερινή εβδομάδα είναι ότι επειδή η παραγωγή της ΣΗΘ καταλήγει απευθείας στην μπαταρία, οι εξαγωγές ενέργειας περιορίζονται από την ισχύ αυτής, ωστόσο είναι πολύ πιο συχνές, καθώς η μπαταρία φορτίζεται ταχύτερα. Το θερινό ηλεκτρικό προφίλ, όπου η λειτουργία της ΣΗΘ μειώνεται αισθητά είναι παρόμοιο με αυτό του σεναρίου 2.3.i.



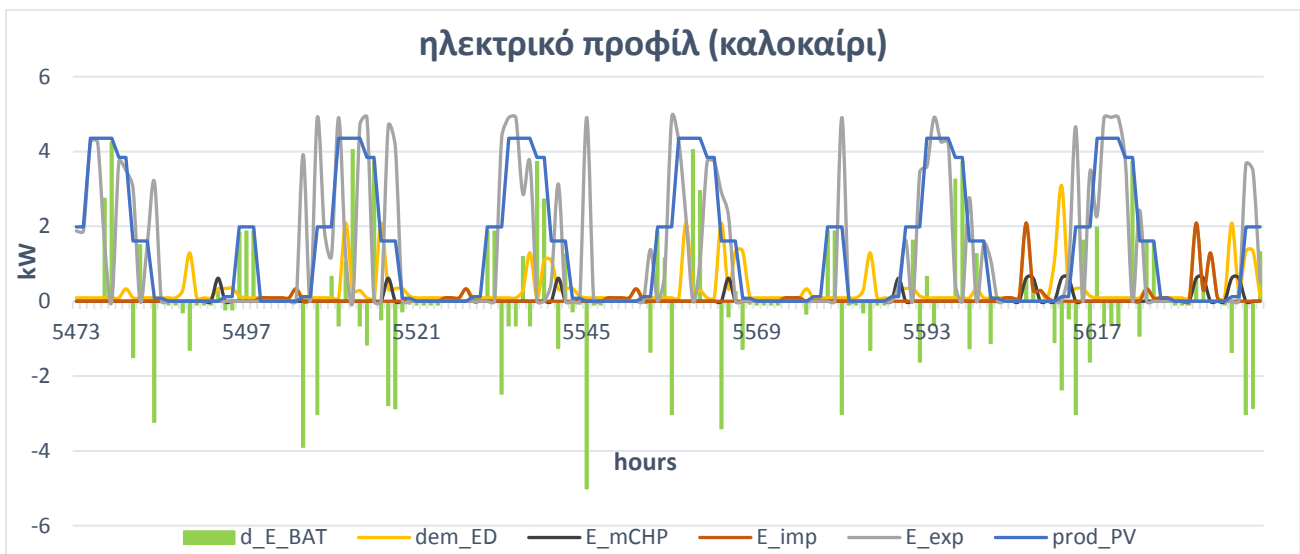
Γράφημα 31: Σενάριο 2.3.ii – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 32: Σενάριο 2.3.ii – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 33: Σενάριο 2.3.ii – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



Γράφημα 34: Σενάριο 2.3.ii – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

5.4 Σενάριο 3^ο: Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) και αντλία θερμότητας (air source heat pump-ASHP) με βοηθητικό λέβητα θερμότητας (auxiliary boiler)

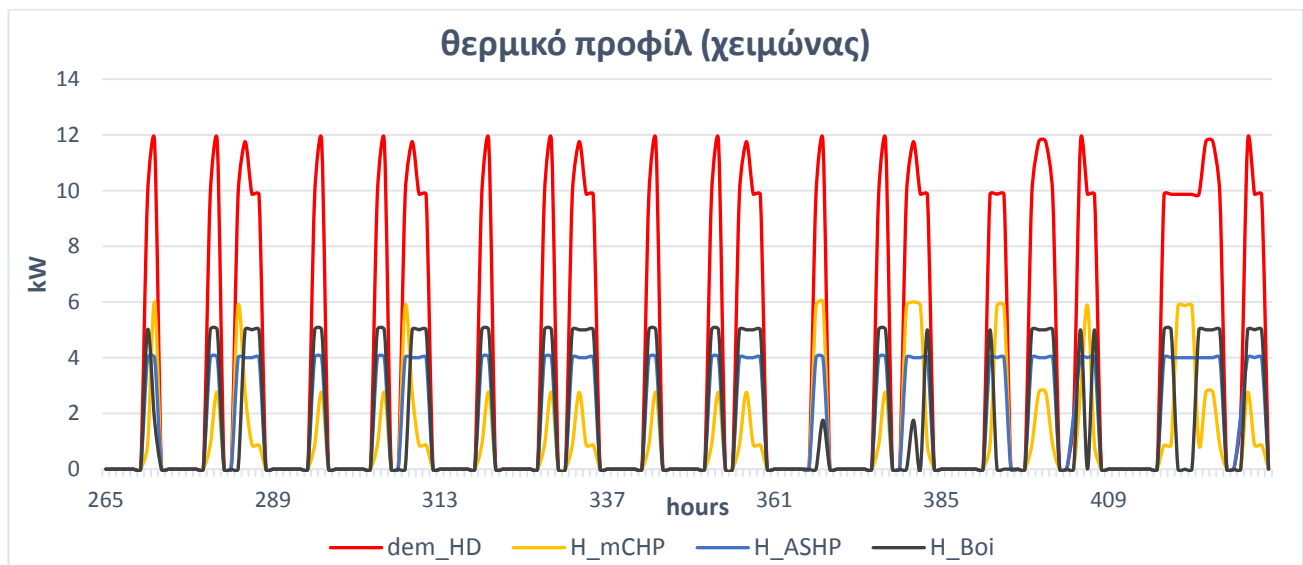
Στο τρίτο σενάριο έγινε χρήση συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), βοηθητικού λέβητα και αντλίας θερμότητας. Όπως και στο προηγούμενα σενάρια, εξετάστηκε αρχικά η περίπτωση χωρίς αποθήκευση ενέργειας, και στη συνέχεια ο συνδυασμός με θερμική ή χημική αποθήκευση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης για τις τρεις εναλλακτικές του σεναρίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 9.

σύστημα	ισχύς	χωρητικότητα	απόδοση
αντλία (ASHP)	4 kW _{th}		COP=3
συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ)	P _e : 2 kW _e		n _e : 0.2
	P _{th} : 6 kW _{th}		n _{th} : 0.6
λέβητας φυσικού αερίου	5 kW _{th}		0.85
δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης		7 kWh _{th}	
φωτοβολταϊκά πάνελ	7 kW _e		
μπαταρία χημικής αποθήκευσης	5 kW _e	7 kWh _e	

Πίνακας 9: Σενάριο 3 – χαρακτηριστικά εγκατάστασης

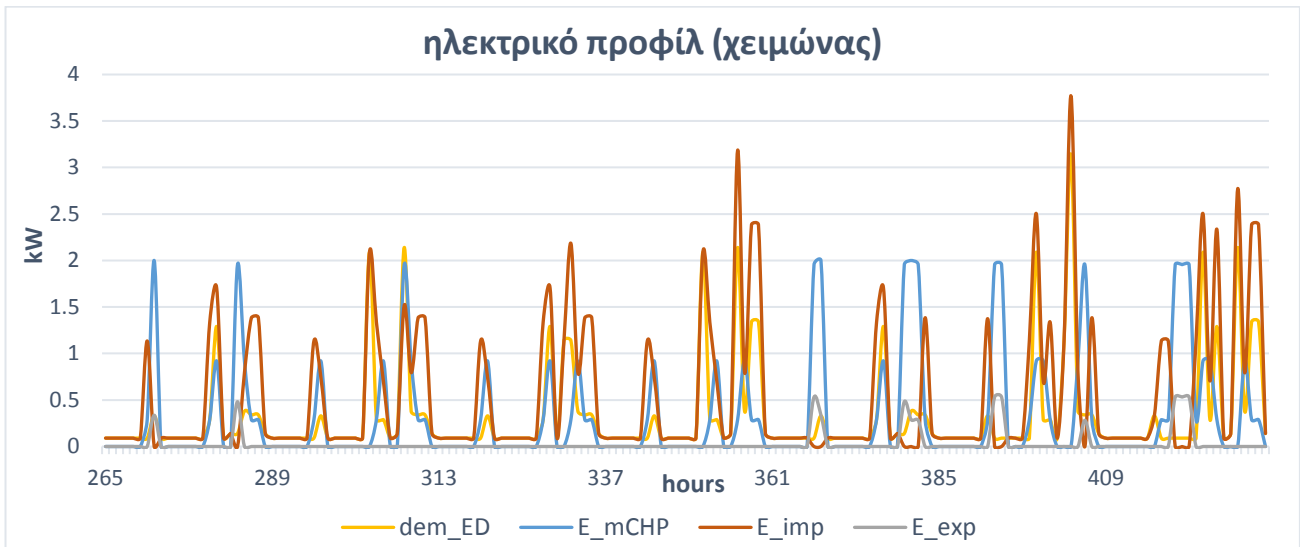
5.4.1 Αποτελέσματα σεναρίου 3.1 (χωρίς αποθήκευση ενέργειας)

Στο γράφημα 35 παρουσιάζεται το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο 3.1, όπου η εγκατάσταση διαθέτει ταυτόχρονα τη ΣΗΘ, το λέβητα και την αντλία θερμότητας. Όπως φαίνεται, το οικονομικότερο σύστημα είναι η αντλία, της οποίας η ισχύς εξαντλείται σε κάθε ώρα που υπάρχει θερμική ζήτηση. Στη συνέχεια, για την κάλυψη του επιπλέον θερμικού φορτίου, εξαντλείται στις περισσότερες περιπτώσεις η ισχύς του λέβητα, λόγω του υψηλότερου θερμικού βαθμού απόδοσης και συμπληρώνει η ΣΗΘ. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές ώρες μέσα στην εβδομάδα που συμβαίνει το αντίστροφο, λειτουργεί δηλαδή η ΣΗΘ στη μέγιστη ισχύ της και συμπληρώνεται από το λέβητα. Αυτό παρατηρείται, στις ώρες που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας για πώληση στο δίκτυο φτάνει σε τοπικό μέγιστο και συνεπώς συμφέρει η μέγιστη παραγωγή από τη ΣΗΘ.



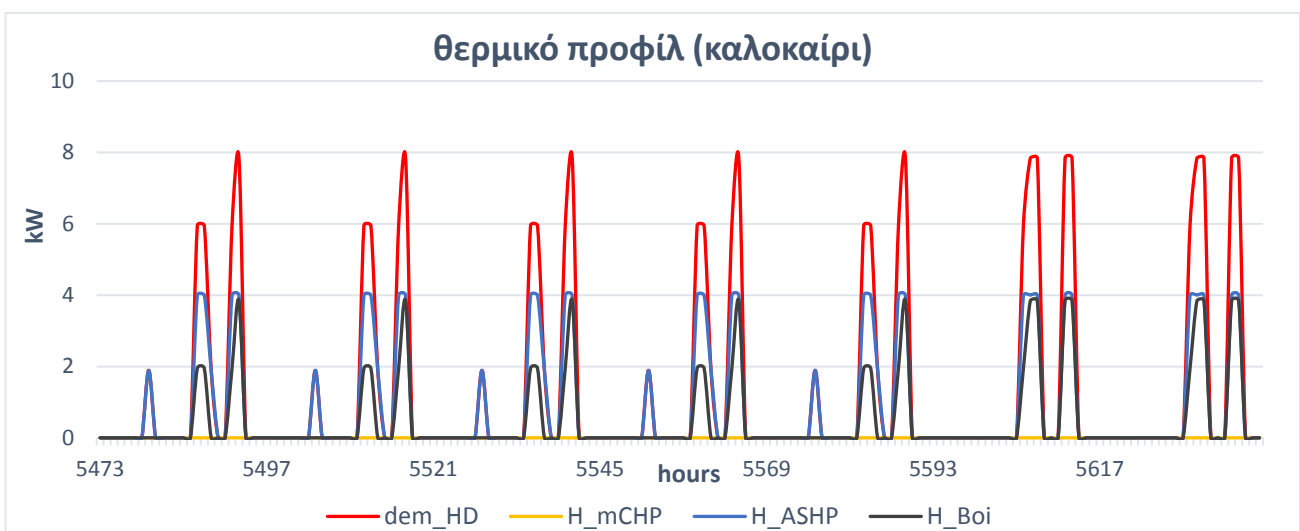
Γράφημα 35: Σενάριο 3.1 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Όσον αφορά το ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας (γράφημα 36), παρατηρείται, ότι αν και η ΣΗΘ τίθεται αρκετές ώρες σε λειτουργία και μάλιστα ορισμένες στη μέγιστη ισχύ της, υπάρχει σταθερά εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο, ενώ οι εξαγωγές είναι πολύ περιορισμένες. Τούτο οφείλεται, στο ότι στο σενάριο αυτό, η ηλεκτρική ζήτηση δεν προκύπτει μόνο από τις ανάγκες του νοικοκυριού, αλλά και από την τροφοδοσία της αντλίας, κάτι που η ΣΗΘ αδυνατεί να καλύψει από μόνη της.

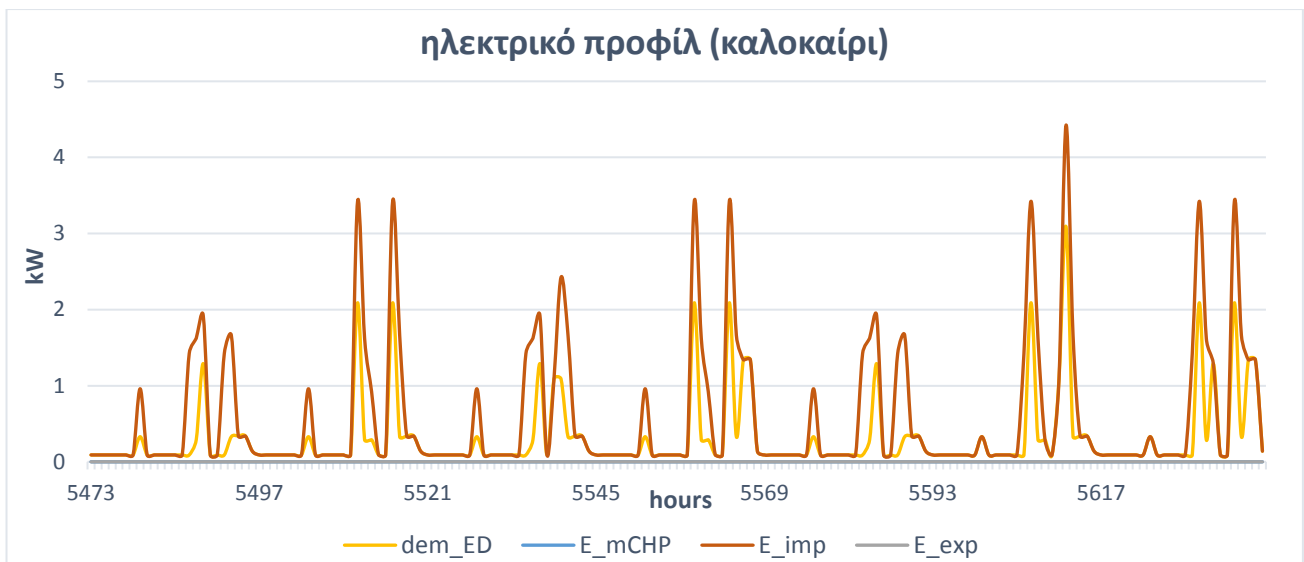


Γράφημα 36: Σενάριο 3.1 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Στα γραφήματα 37 και 38 φαίνονται το θερμικό και ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα. Στην περίοδο αυτή, λόγω των χαμηλών αιχμών θερμικού φορτίου, η εγκατάσταση εξυπηρετεί τη θερμική ζήτηση εξαντλώντας ασφαλώς την ισχύ της αντλίας και συμπληρώνοντας με τον λέβητα, χωρίς να αξιοποιεί καθόλου τη ΣΗΘ, η οποία αποδεικνύεται το πιο κοστοβόρο σύστημα. Για το λόγο αυτό στο ηλεκτρικό προφίλ βλέπουμε ότι τόσο οι ηλεκτρικές ανάγκες του νοικοκυριού, όσο και η τροφοδοσία της αντλίας καλύπτονται αποκλειστικά με εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο.



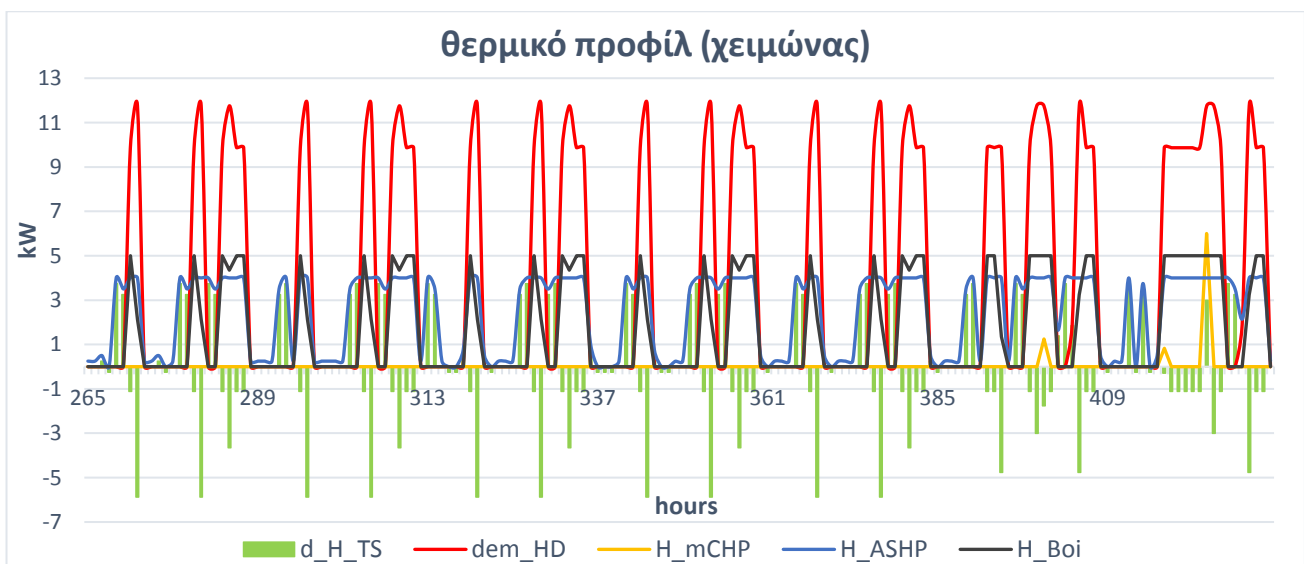
Γράφημα 37: Σενάριο 3.1 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



Γράφημα 38: Σενάριο 3.1 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

5.4.2 Αποτελέσματα σεναρίου 3.2 (θερμική αποθήκευση ενέργειας)

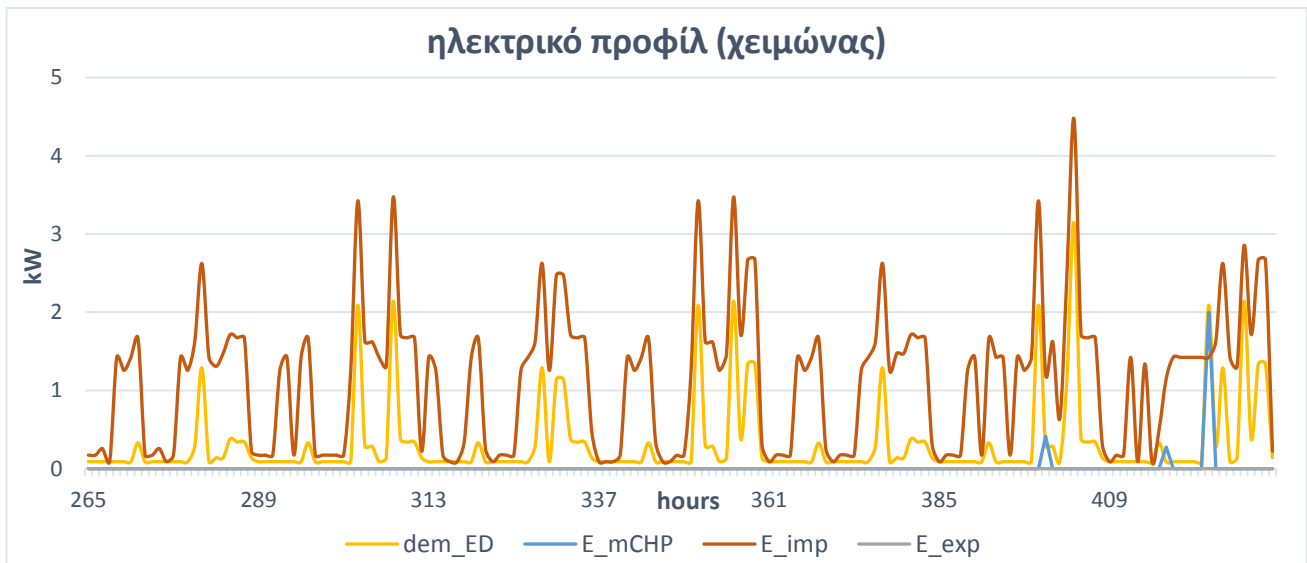
Το γράφημα 39 δείχνει το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας για το σενάριο 3.2. Όπως φαίνεται, η προσθήκη της δεξαμενής νερού για θερμική αποθήκευση οδηγεί στο εξής αποτέλεσμα: το σύστημα σε ώρες χαμηλού κόστους ηλεκτρικού ρεύματος επιλέγει να λειτουργεί την αντλία, ώστε να αποθηκεύει ενέργεια στη δεξαμενή. Έτσι, στις ώρες θερμικής ζήτησης καταφέρνει να εξυπηρετεί τις ανάγκες του νοικοκυριού λειτουργώντας την αντλία, αξιοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια και συμπληρώνοντας με το λέβητα, καταλήγοντας να μην χρησιμοποιεί παρά για ελάχιστες ώρες τη ΣΗΘ.



Γράφημα 39: Σενάριο 3.2 – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

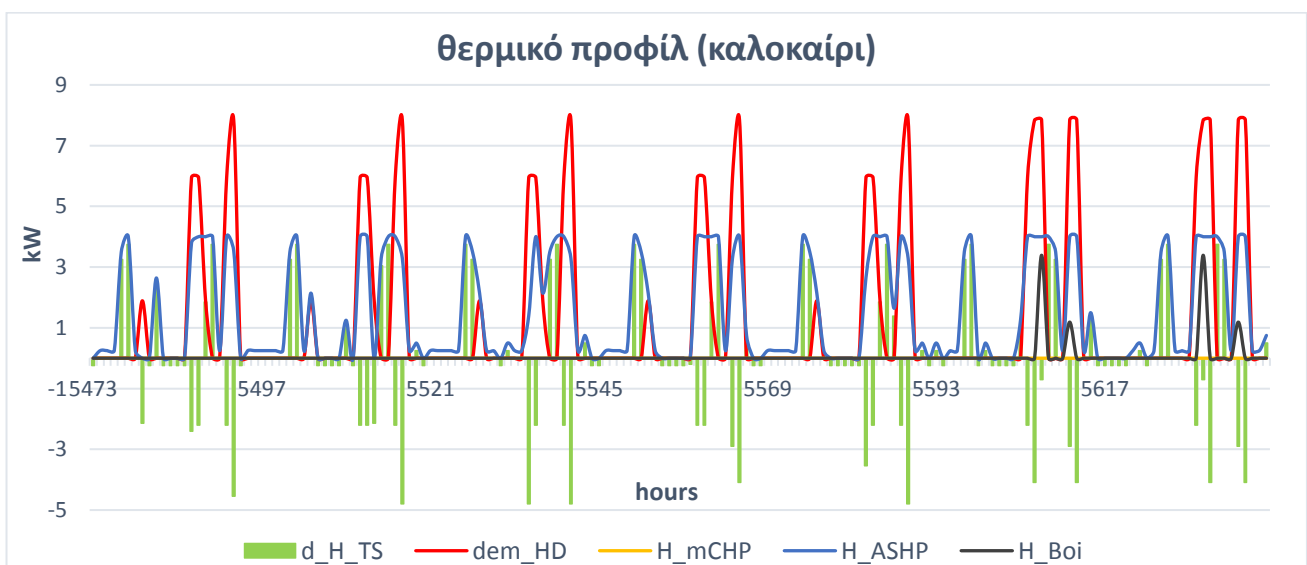
Στο ηλεκτρικό, λοιπόν, προφίλ που φαίνεται στο γράφημα 40, παρατηρούμε ότι καθ' όλη τη διάρκεια της χειμερινής εβδομάδας, εκτός από τις 3 ώρες που τέθηκε σε λειτουργία η ΣΗΘ, το

σύνολο της ηλεκτρικής ζήτησης (ανάγκες νοικοκυριού και τροφοδοσία αντλίας) καλύπτεται με εισαγωγή από το δίκτυο. Οι εξαγωγές ως αποτέλεσμα αυτού είναι μηδενικές.

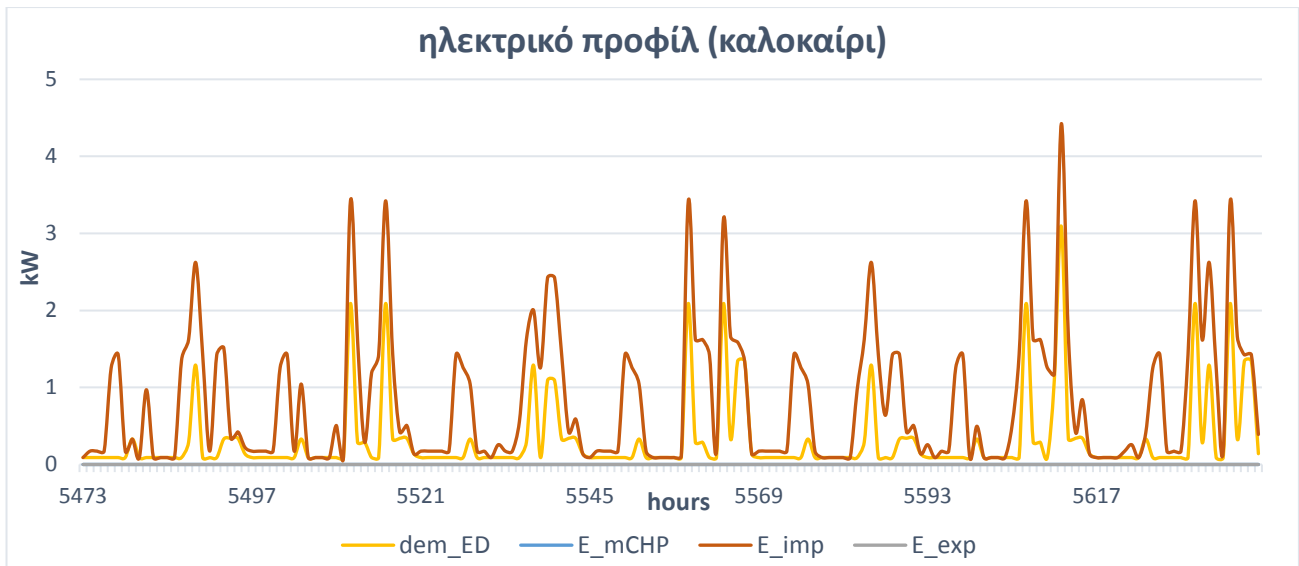


Γράφημα 40: Σενάριο 3.2 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Στα γραφήματα 41 και 42 παρουσιάζονται αντίστοιχα το θερμικό και ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής θερινής εβδομάδας. Εδώ βλέπουμε, ότι λόγω των χαμηλών ισχύων θερμικού φορτίου, το σύστημα έχει αφήσει εντελώς εκτός λειτουργίας τη ΣΗΘ, ενώ έχει χρησιμοποιήσει ελάχιστα και το λέβητα, αφού καταφέρνει μόνο με τη χρήση της αντλίας να αποθηκεύει ενέργεια και να καλύπτει το σύνολο της ζήτησης. Συνεπώς, όπως αναμενόταν, στο ηλεκτρικό προφίλ, η αγορά από το δίκτυο καλύπτει πλήρως τις ηλεκτρικές ανάγκες, χωρίς φυσικά να υπάρχει δυνατότητα εξαγωγών.



Γράφημα 41: Σενάριο 3.2 – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

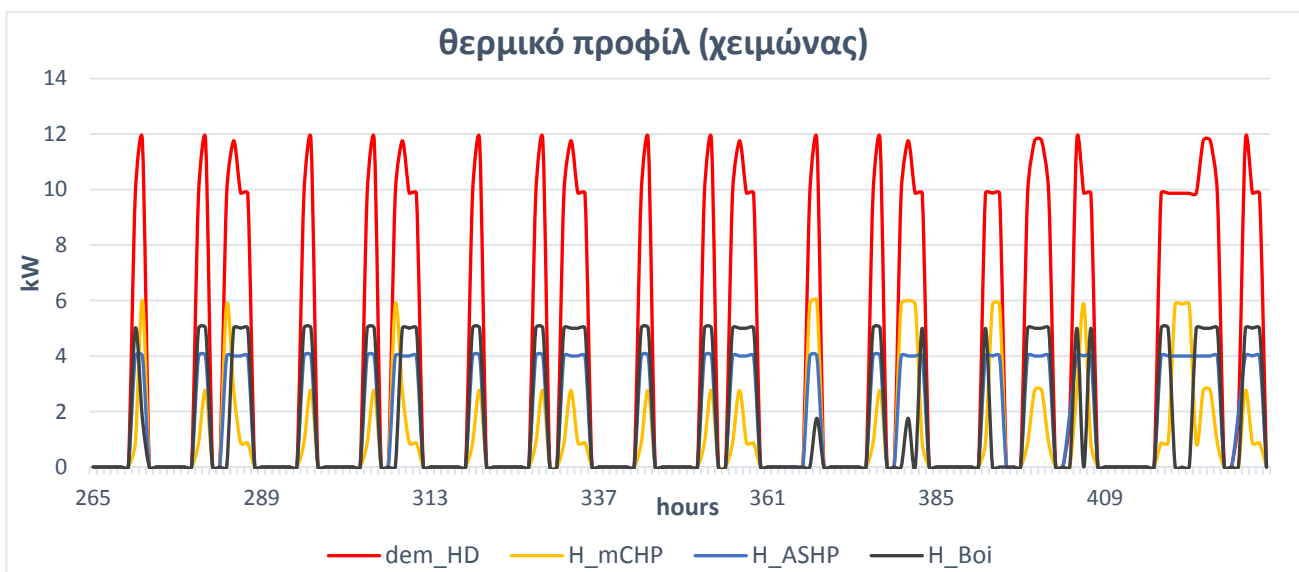


Γράφημα 42: Σενάριο 3.2 – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

5.4.3 Αποτελέσματα σεναρίου 3.3 (χημική αποθήκευση ενέργειας)

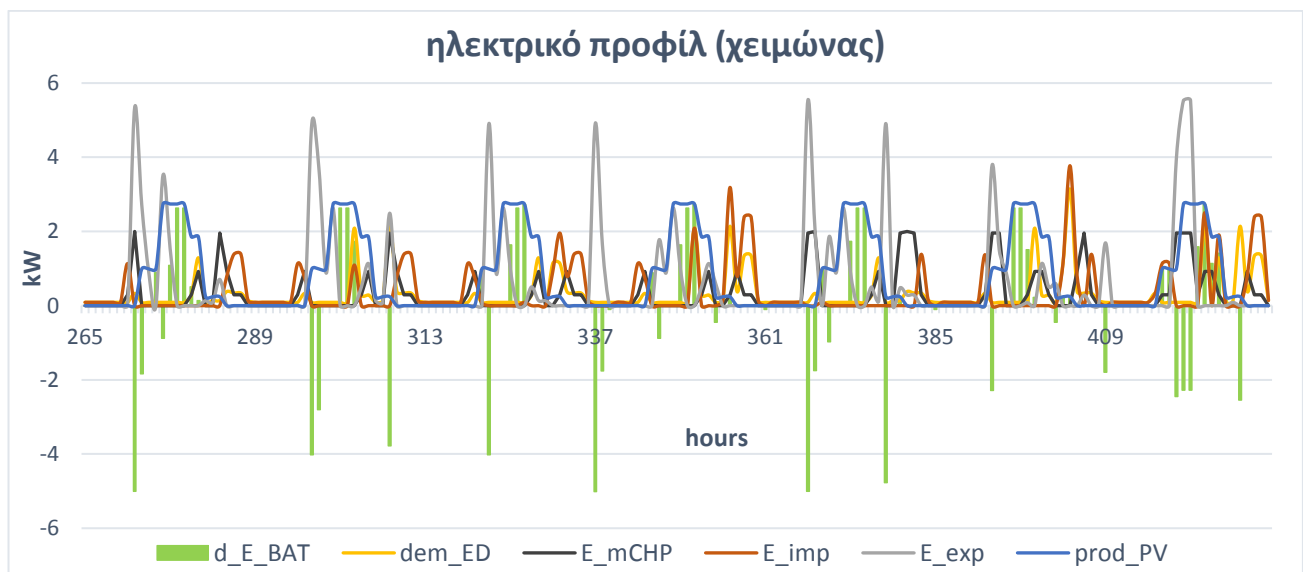
ι) Η μπαταρία τροφοδοτείται αποκλειστικά από τα φωτοβολταϊκά πάνελ

Στην πρώτη εναλλακτική του σεναρίου 3.3 η μπαταρία, που τοποθετείται, φορτίζεται μόνο από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Το θερμικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας που προέκυψε, δίνεται στο γράφημα 43. Από τη στιγμή που απουσιάζει η δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης, η λογική με την οποία καλύπτεται η θερμική ζήτηση είναι η ίδια με του σεναρίου 3.1. Η αντλία θερμότητας λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ, ενώ άλλοτε εξαντλείται η ισχύς του λέβητα και άλλοτε της ΣΗΘ. Αυτό καθορίζεται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ώρα και αν το όφελος από την πώληση της υπερκαλύπτει το μειονέκτημα της μεγαλύτερης κατανάλωσης καυσίμου.

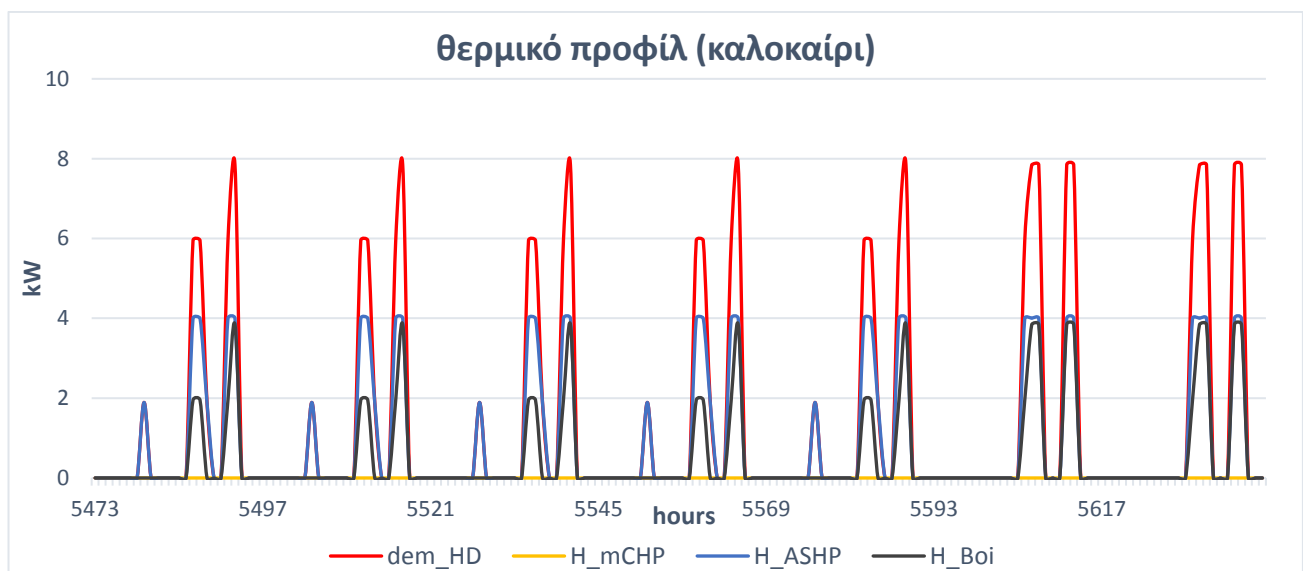


Γράφημα 43: Σενάριο 3.3.i – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Το ηλεκτρικό προφίλ της τυπικής χειμερινής εβδομάδας αποτυπώνεται στο γράφημα 44. Παρατηρείται, ότι η εξαγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την εισαγωγή, καθώς ο συνδυασμός της λειτουργίας της ΣΗΘ και της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι αρκετός για να καλύψει τις ηλεκτρικές απαιτήσεις. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, βλέπουμε ότι υπάρχει αρκετή περίσσεια ενέργειας, ώστε το σύστημα επιλέγει να αποφορτίσει την μπαταρία σε ώρες εκτός της ζήτησης όταν υπάρχουν υψηλές τιμές στην αγορά. Οι εισαγωγές από το δίκτυο είναι αναγκαίες, μόνο στις ώρες που η παραγωγή από τη ΣΗΘ και η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία δεν επαρκούν για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του νοικοκυριού και την τροφοδοσία της αντλίας.



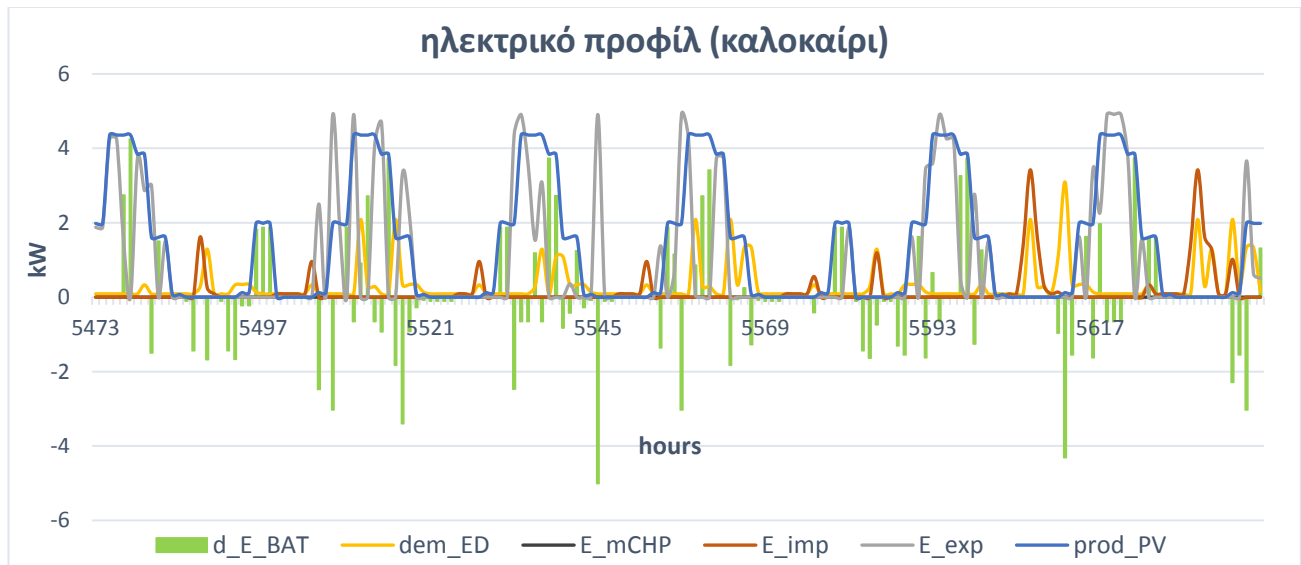
Γράφημα 44: Σενάριο 3.3.i – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 45: Σενάριο 3.3.i – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

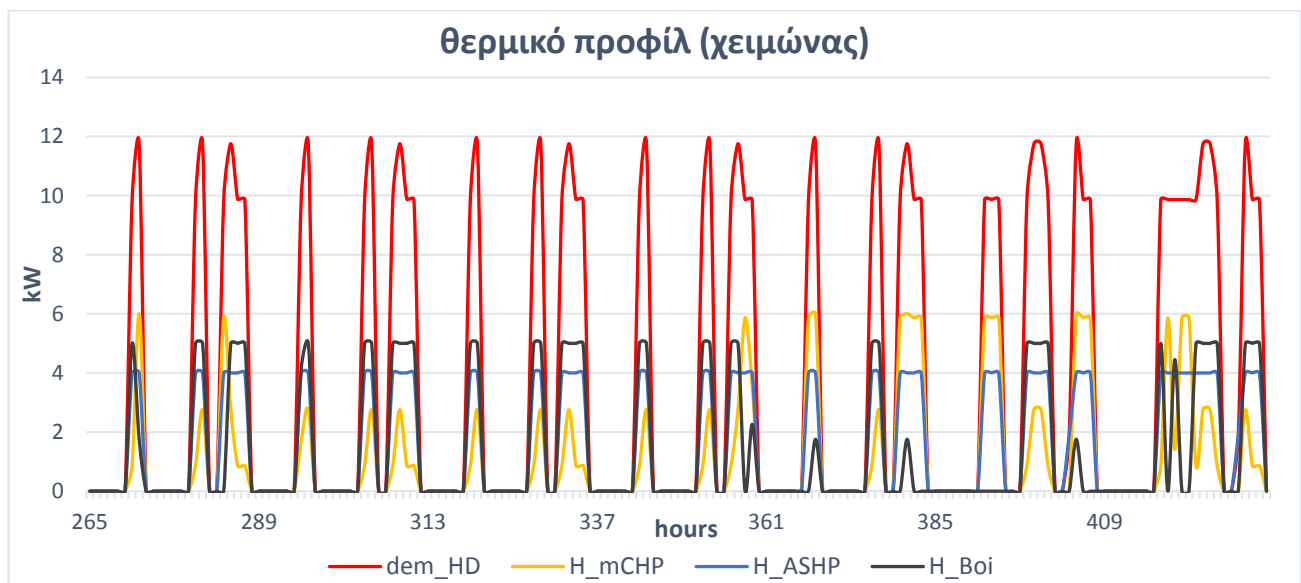
Στο γράφημα 45 φαίνεται το θερμικό προφίλ της τυπικής θερινής εβδομάδας, το οποίο είναι παρόμοιο με του σεναρίου 3.1. Λόγω των χαμηλών αιχμών θερμικού φορτίου, η ΣΗΘ δεν μπαίνει καθόλου σε λειτουργία και το σύνολο της θερμικής ζήτησης εξυπηρετείται από την αντλία και το λέβητα.

Το ηλεκτρικό προφίλ της θερινής περιόδου (γράφημα 46) αποδεικνύει την απουσία παραγωγής από τη ΣΗΘ. Ωστόσο, η αυξημένη παραγωγή των φωτοβολταϊκών το καλοκαίρι την αναπληρώνει, ώστε οι εξαγωγές να παραμένουν σε υψηλό επίπεδο και οι εισαγωγές σχετικά περιορισμένες.



Γράφημα 46: Σενάριο 3.3.i – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα

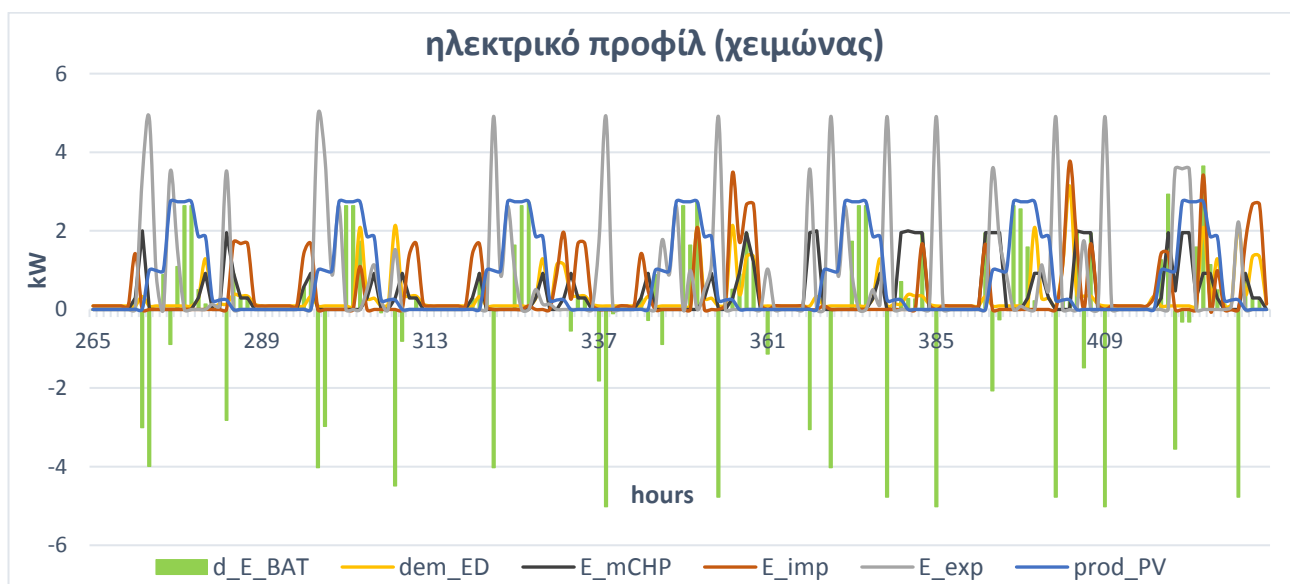
ii) Η μπαταρία τροφοδοτείται από τα πάνελ και από τη ΣΗΘ



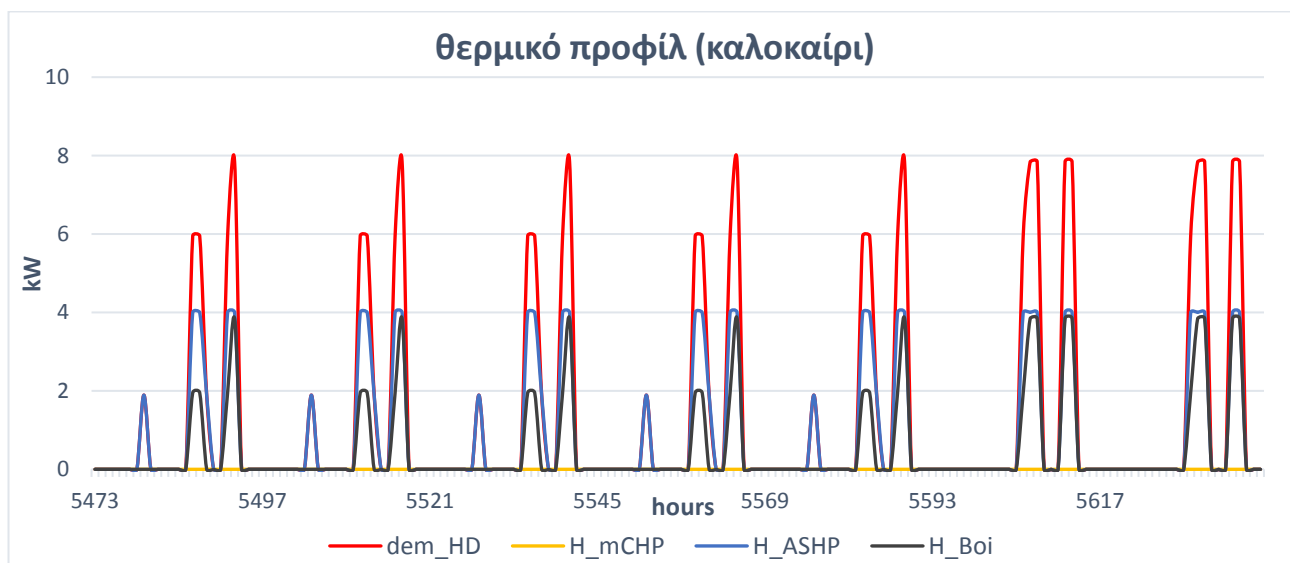
Γράφημα 47: Σενάριο 3.3.ii – θερμικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα

Στη δεύτερη εναλλακτική του σεναρίου 3.3 η μπαταρία τροφοδοτείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τη ΣΗΘ. Τα θερμικά προφίλ δημιουργήθηκαν με την ίδια λογική όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Για την τυπική χειμερινή εβδομάδα (γράφημα 47) εξαντλείται η ισχύς της αντλίας και συμπληρώνεται από το λέβητα και τη ΣΗΘ, που λειτουργούν σε ισχύ, η οποία καθορίζεται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά για κάθε ώρα. Για τη θερινή τυπική εβδομάδα (γράφημα 49) το θερμικό φορτίο καλύπτεται μόνο από την αντλία και το λέβητα.

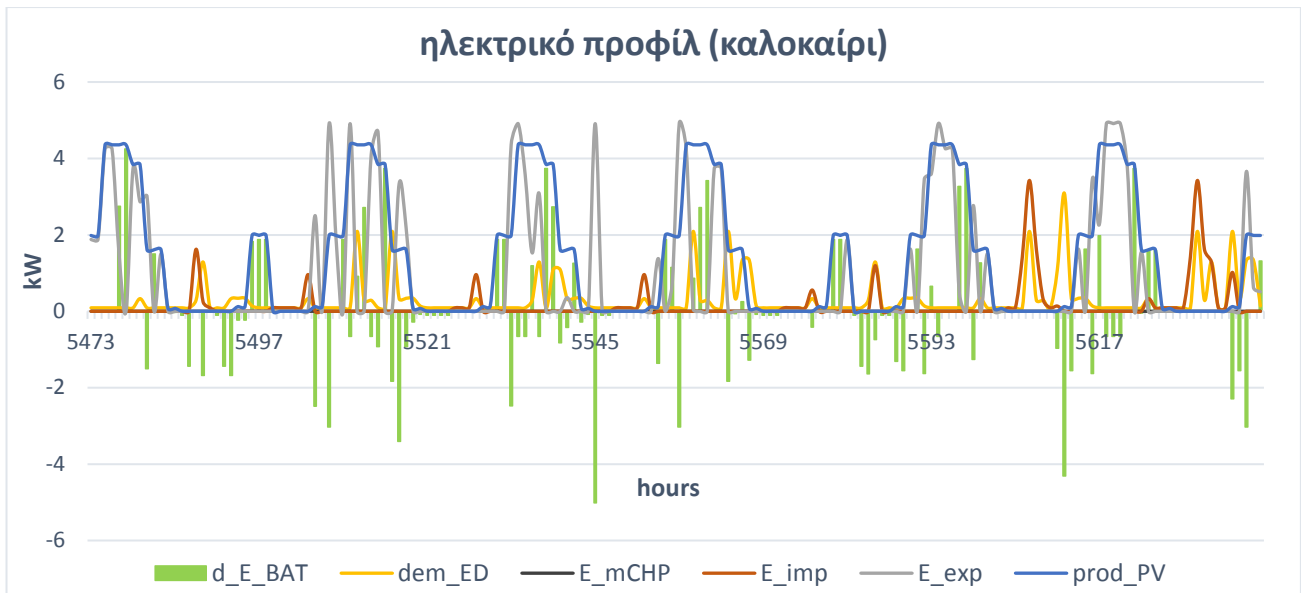
Στα γραφήματα 48 και 50 παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά προφίλ των δύο τυπικών εβδομάδων. Η διαφορά που παρατηρούμε στη χειμερινή εβδομάδα είναι ότι επειδή η παραγωγή της ΣΗΘ καταλήγει απευθείας στην μπαταρία, οι εξαγωγές ενέργειας περιορίζονται από την ισχύ αυτής, ωστόσο είναι πολύ πιο συχνές, καθώς η μπαταρία φορτίζεται ταχύτερα. Το θερινό ηλεκτρικό προφίλ, όπου η λειτουργία της ΣΗΘ μειώνεται αισθητά είναι παρόμοιο με αυτό του σεναρίου 3.3.i.



Γράφημα 48: Σενάριο 3.3.ii – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική χειμερινή εβδομάδα



Γράφημα 49: Σενάριο 3.3.ii – θερμικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα



Γράφημα 50: Σενάριο 3.3.ii – ηλεκτρικό προφίλ για την τυπική θερινή εβδομάδα.

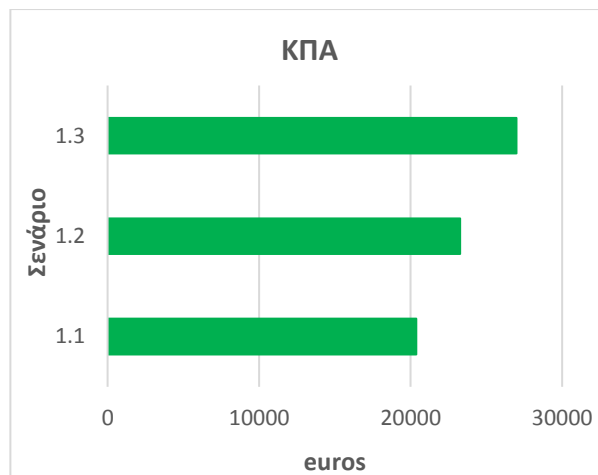
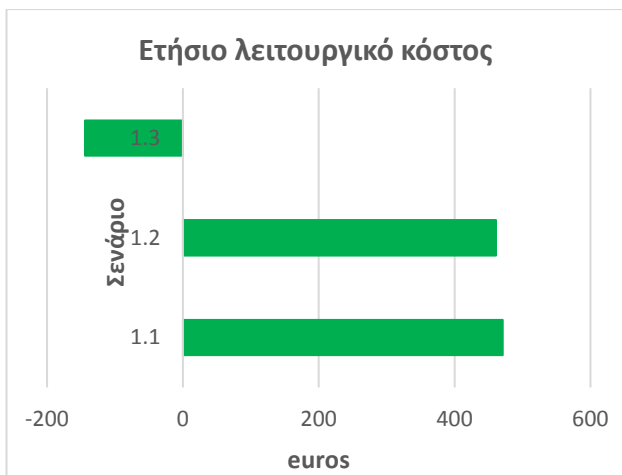
5.5 Αναλύσεις ευαισθησίας και τελική οικονομική αξιολόγηση των σεναρίων με τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ)

Από τη βελτιστοποίηση με τη χρήση του προγράμματος GAMS προέκυψε για κάθε ένα από τα σεναρία που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες το ελάχιστο δυνατό ετήσιο λειτουργικό κόστος. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τα τρέχοντα οικονομικά δεδομένα της αγοράς για τα κεφαλαιουχικά κόστη και τα κόστη συντήρησης κάθε συστήματος παραγωγής (πίνακας 10), υπολογίστηκε η Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) για κάθε σενάριο. Οι υπολογισμοί έγιναν για χρονικό διάστημα 15ετίας θεωρώντας επιτόκιο 5%.

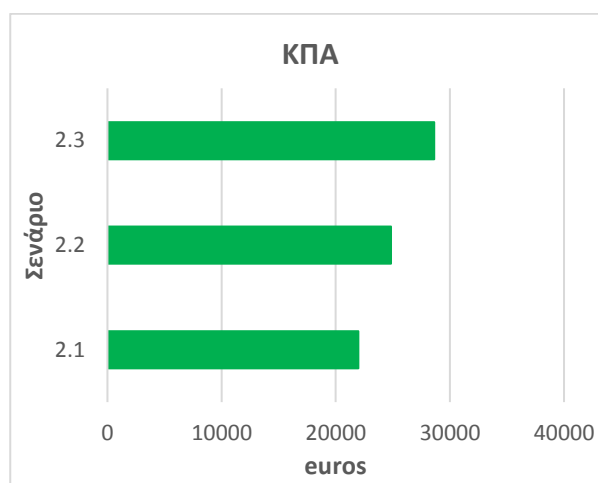
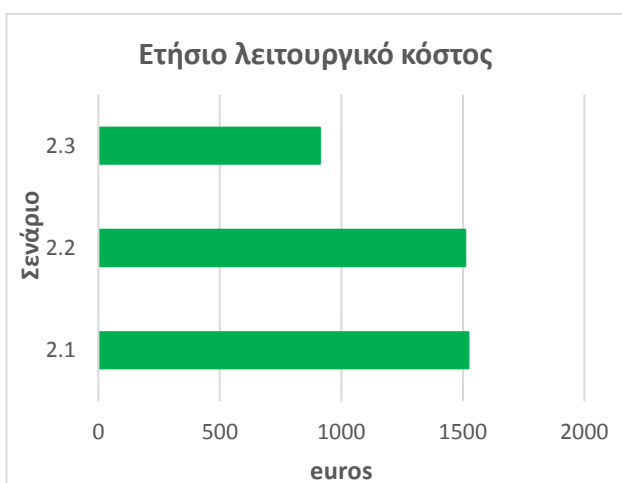
	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος συντήρησης
Αντλία θερμότητας	1290 euro/kWth	-
ΣΗΘ	1700 euro/kWe	70 euro/year
Λέβητας	236.5 euro/kWth	60 euro/year
Δεξαμενή νερού θερμικής αποθήκευσης	3000 euro/150litres	-
Φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία	12000euro	-

Πίνακας 10: Κεφαλαιουχικά κόστη και κόστη συντήρησης συστημάτων παραγωγής

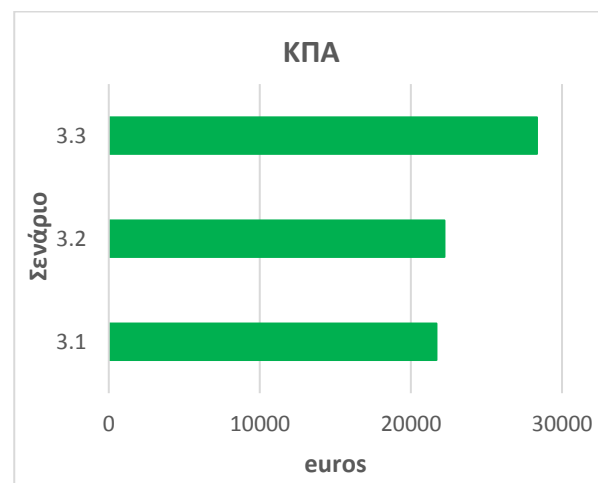
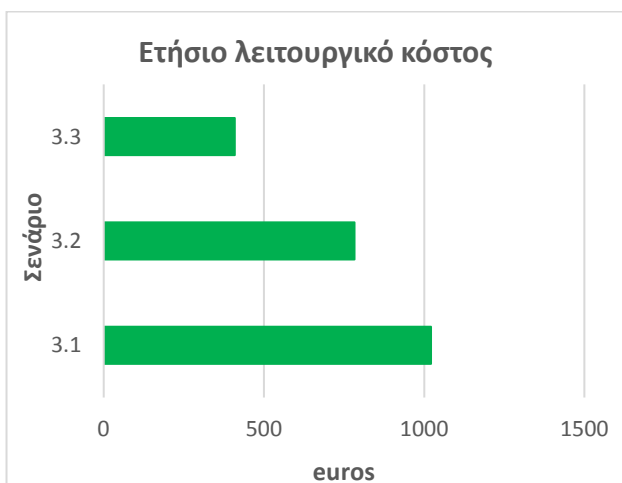
Στα γραφήματα 51-53 παρουσιάζονται για τα τρία σεναρία το ετήσιο λειτουργικό κόστος και η ΚΠΑ κάθε εναλλακτικής. Στην περίπτωση της χημικής αποθήκευσης, όπου εξετάστηκαν δύο υποπεριπτώσεις, λόγω της πολύ μικρής διαφοράς στα οικονομικά αποτελέσματα παραθέτονται τα δεδομένα της ελαφρώς οικονομικότερης από τις δύο λύσεις. Η ΚΠΑ κάθε σεναρίου προέκυψε αρνητικός αριθμός, καθώς ουσιαστικά αναφέρεται σε κόστος. Ωστόσο, στα παρακάτω γραφήματα δίνεται η απόλυτη τιμή και έτσι ουσιαστικά η μικρότερη ΚΠΑ οδηγεί στο πιο συμφέρον σενάριο.



Γράφημα 51: Ετήσιο λειτουργικό κόστος και ΚΠΑ για το σενάριο 1



Γράφημα 52: Ετήσιο λειτουργικό κόστος και ΚΠΑ για το σενάριο 2



Γράφημα 53: Ετήσιο λειτουργικό κόστος και ΚΠΑ για το σενάριο 3

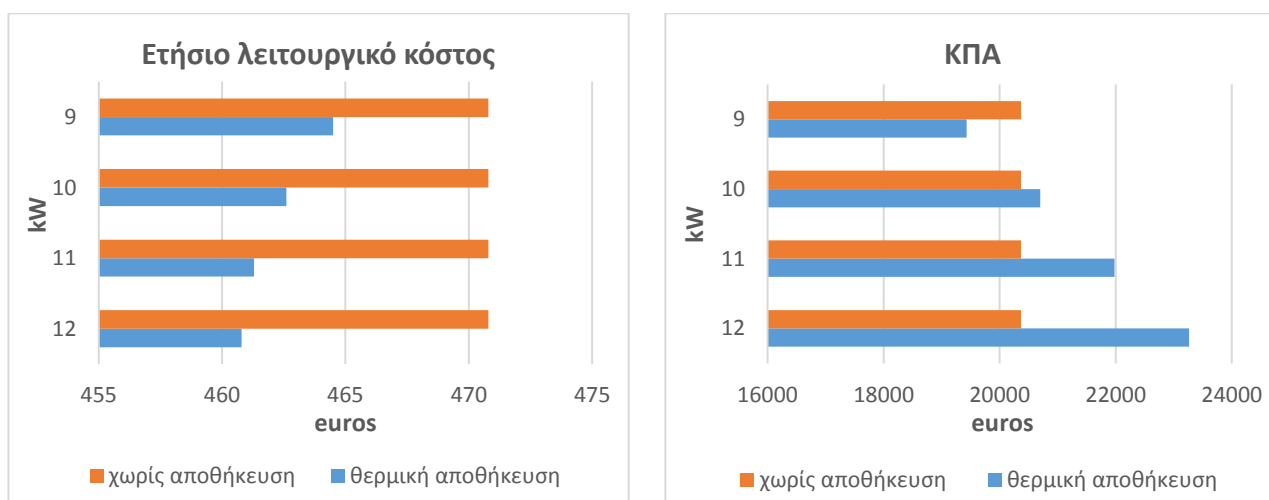
Σε όλα τα σενάρια παρατηρείται μια κοινή συμπεριφορά. Όσον αφορά το ετήσιο λειτουργικό κόστος, η χρήση θερμικής αποθήκευσης οδηγεί σε μικρή εξοικονόμηση και η χρήση χημικής αποθήκευσης σε ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση (μάλιστα στο πρώτο σενάριο η χημική

αποθήκευση επιφέρει κέρδος σε ετήσια βάση). Παρόλα αυτά, παρατηρώντας την ΚΠΑ, διαπιστώνεται ότι τα υψηλά κεφαλαιουχικά κόστη των τεχνολογιών αποθήκευσης, τις καθιστούν ασύμφορες στο πλαίσιο της 15ετίας που εξετάστηκε. Πιο συγκεκριμένα, η χημική αποθήκευση προκύπτει η λιγότερο συμφέρουσα, παρότι δίνει το μικρότερο ετήσιο λειτουργικό κόστος, στη συνέχεια η θερμική αποθήκευση, ενώ την μικρότερη ΚΠΑ δίνουν οι εναλλακτικές χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης.

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από τα ανωτέρω γραφήματα είναι η διαφορά της εξοικονόμησης που προσφέρει η θερμική αποθήκευση σε κάθε σενάριο. Έτσι, ενώ στα σενάρια 1 και 2 το ποσοστό της ετήσιας εξοικονόμησης κυμαίνεται μεταξύ 1-3% στο σενάριο 3 το ποσοστό αυτό φτάνει στο 23%. Θα περίμενε κανείς η χρήση θερμικής αποθήκευσης να οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση του λειτουργικού κόστους ειδικά στα δύο πρώτα σενάρια. Όμως η ετήσια εξοικονόμηση από τη χρήση της αποθήκευσης είναι σχετικά μικρή, καθώς το κέρδος από την προσαρμογή της λειτουργίας των συστημάτων στην τιμή του ηλεκτρισμού σχεδόν ισοσκελίζεται από τις απώλειες ενέργειας στη δεξαμενή νερού. Από την άλλη η σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους στο τρίτο σενάριο (σε σύγκριση και με τα δύο πρώτα) οφείλεται στην μεγάλη ευελιξία που προσφέρει η συνύπαρξη της αντλίας θερμότητας και της ΣΗΘ και στη συνεργασία των δύο αυτών συστημάτων.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας μεταβάλλοντας ορισμένες μεταβλητές του προβλήματος (κόστος αποθήκευσης, χωρητικότητα αποθήκευσης, ισχύς συστημάτων παραγωγής, τιμή ηλεκτρισμού και καυσίμου), ώστε να εντοπιστεί αν υπάρχουν παράγοντες, η αλλαγή των οποίων, καθιστά συμφέρουσα την αποθήκευση και σε ποια σενάρια.

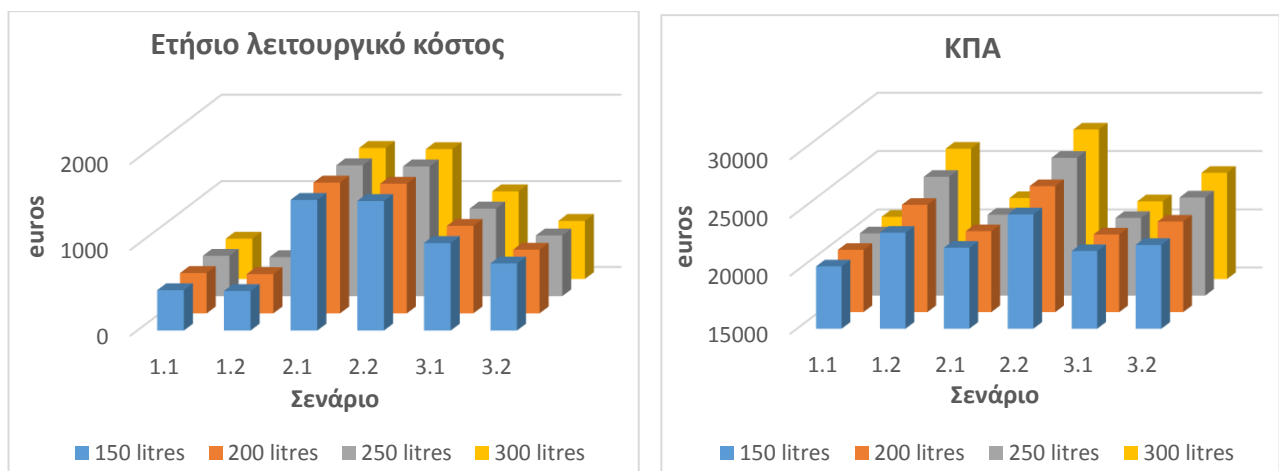
Η πρώτη ανάλυση ευαισθησίας που έγινε αφορούσε το πρώτο σενάριο και συγκεκριμένα τη μεταβολή της ισχύος της αντλίας θερμότητας στην περίπτωση χρήσης θερμικής αποθήκευσης. Όπως είναι λογικό η ισχύς της αντλίας είχε οριστεί στα 12kW ώστε να καλύπτει το μέγιστο θερμικό φορτίο στη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, η χρήση της θερμικής αποθήκευσης επιτρέπει την πλήρη κάλυψη του φορτίου και από αντλία μικρότερης ονομαστικής ισχύος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω γράφημα 54.



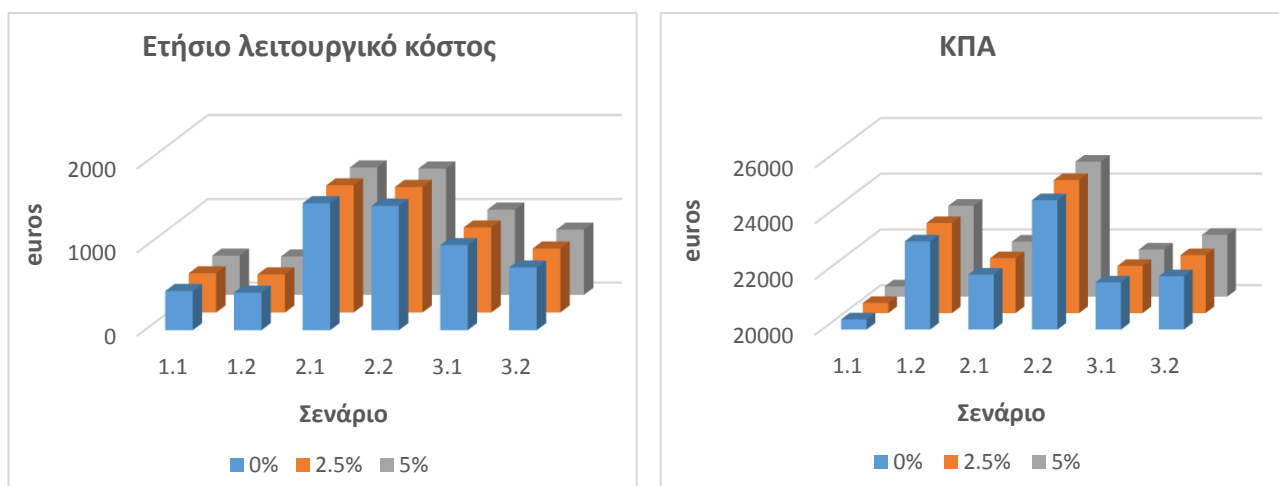
Γράφημα 54: Ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας την ισχύ της αντλίας για το σενάριο 1

Όπως διαπιστώνεται, η μείωση της ισχύος της αντλίας κατά 1kW τη φορά οδηγεί σε αμελητέα αύξηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους, όμως λόγω του υψηλού κεφαλαιουχικού κόστους της (πίνακας 10) η ΚΠΑ συνεχώς αυξάνεται. Έτσι για ισχύ της αντλίας ίση με 9 kW (η ελάχιστη δυνατή με την οποία μπορούσε να καλυφθεί η απαίτηση σε θερμικό φορτίο) η ΚΠΑ της εναλλακτικής με χρήση θερμικής αποθήκευσης γίνεται μεγαλύτερη από εκείνη χωρίς αποθήκευση. Αντίστοιχη ανάλυση ευαισθησίας δεν μπορούσε να γίνει στο δεύτερο και το τρίτο σενάριο καθώς οι ισχύες των συστημάτων παραγωγής ήταν ήδη οι ελάχιστες που απαντώνται στην αγορά.

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας μεταβάλλοντας πρώτα τη χωρητικότητα και ύστερα τις θερμικές απώλειες της δεξαμενής νερού για θερμική αποθήκευση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίνονται στα γραφήματα 55-56.



Γράφημα 55: Ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα της δεξαμενής θερμικής αποθήκευσης



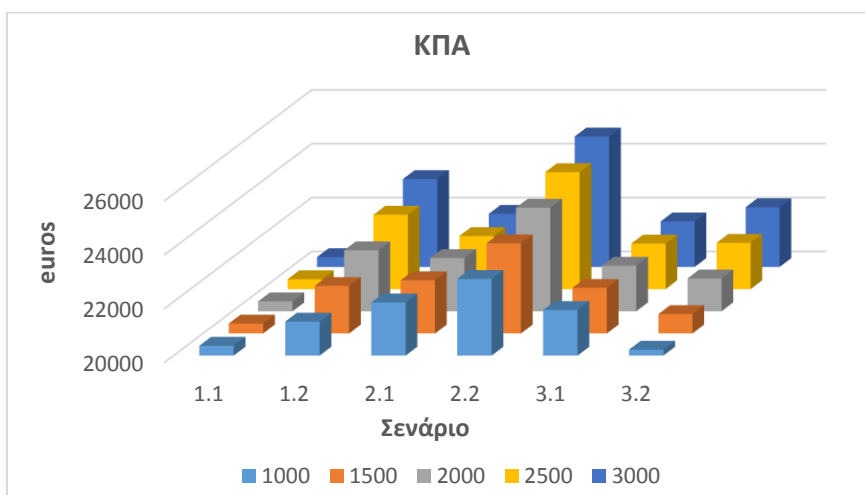
Γράφημα 56: Ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας το ποσοστό θερμικών απωλειών της δεξαμενής θερμικής αποθήκευσης

Από το γράφημα 55, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι η αύξηση της χωρητικότητας της δεξαμενής νερού για θερμική αποθήκευση μειώνει ανεπαίσθητα το ετήσιο λειτουργικό κόστος, ωστόσο το

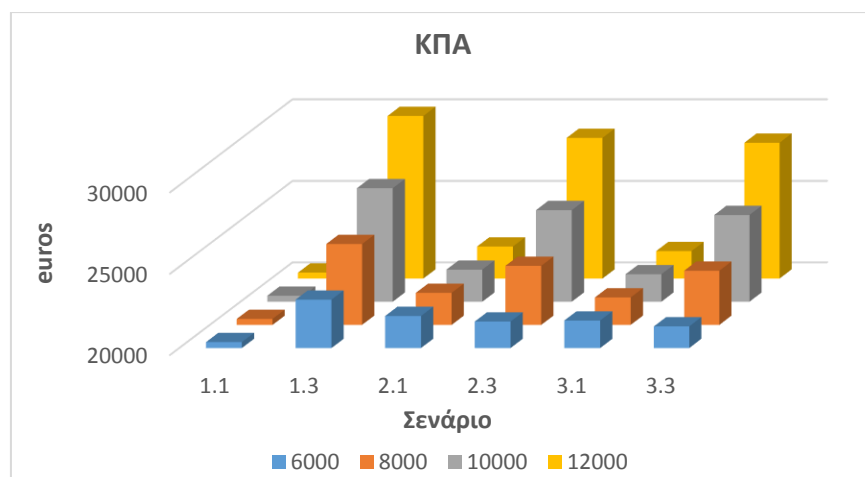
επιπλέον κεφαλαιουχικό κόστος για την εγκατάσταση μεγαλύτερης δεξαμενής, οδηγεί τελικά σε μείωση της ΚΠΑ για όλα τα σενάρια.

Στο γράφημα 56, βλέπουμε, ότι η μείωση των θερμικών απωλειών της δεξαμενής προκαλεί και αυτή μια μικρή ελάττωση του ετήσιου λειτουργικού κόστους και κατ' επέκταση μια αντίστοιχη μικρή αύξηση της ΚΠΑ, η οποία όμως δεν είναι αρκετή για να καταστήσει συμφέρουσα τη χρήση της θερμικής αποθήκευσης. Ακόμα και στο υποθετικό σενάριο με μηδενικές θερμικές απώλειες, που εξετάστηκε, η ΚΠΑ της εναλλακτικής με θερμική αποθήκευση πλησιάζει αρκετά αυτής χωρίς αποθήκευση, παραμένει, ωστόσο, σταθερά μικρότερη. Τα ίδια ακριβώς συμπεράσματα προέκυψαν και από αναλύσεις ευαισθησίας για τη χωρητικότητα και τις απώλειες της μπαταρίας, αφού σε καμία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν και σε κανένα σενάριο, η ΚΠΑ της εναλλακτικής με χρήση χημικής αποθήκευσης δεν ξεπέρασε εκείνης χωρίς αποθήκευση.

Η επόμενη ανάλυση ευαισθησίας που έγινε αφορούσε τη μεταβολή του κεφαλαιουχικού κόστους τόσο της θερμικής όσο και της χημικής αποθήκευσης. Το κόστος εγκατάστασης κάθε τεχνολογίας δεν επηρεάζει το ετήσιο λειτουργικό κόστος του συστήματος αλλά μόνο την ΚΠΑ του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα γραφήματα 57-58.



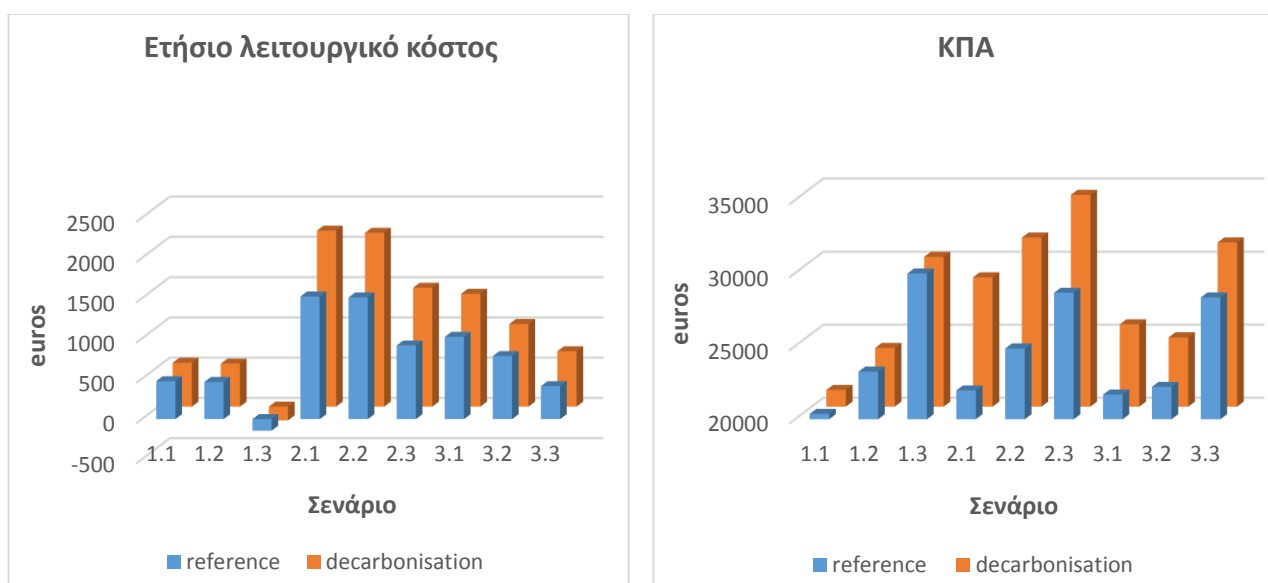
Γράφημα 57: Ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας το κόστος θερμικής αποθήκευσης



Γράφημα 58: Ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας το κόστος θερμικής αποθήκευσης

Διαπιστώνεται, ότι το κόστος αποθήκευσης, είναι πράγματι ένας παράγοντας που καθορίζει το αν η αποθήκευση θα αποδειχθεί συμφέρουσα ή όχι. Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω γραφήματα, η μείωση του κόστους της δεξαμενής για θερμική αποθήκευση κατά 33% οδηγεί σε συμφέρουσα λύση για το τρίτο σενάριο, ενώ στην περίπτωση της χημικής αποθήκευσης η μείωση του συνολικού κόστους (φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία) κατά 50% την καθιστά συμφέρουσα στα σενάρια 2 και 3. Συνεπώς, η εξέλιξη της τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια και η δημιουργία τεχνολογιών αποθήκευσης με μικρότερο κεφαλαιουχικό κόστος, μπορεί να αποβεί καθοριστική, καθιστώντας τη χρήση αποθήκευσης σαφώς πιο συμφέρουσα.

Στην τελευταία ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε εξετάστηκε η λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιώντας διαφορετική τιμή ηλεκτρικού ρεύματος και καυσίμου, οι οποίες ορίζονται από το σενάριο εξηλεκτρισμού (decarbonisation), που θέτει πολύ αυστηρούς και υψηλούς στόχους για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών, έως το 2030.[32] Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του ηλεκτρισμού στο σενάριο αυτό είναι κατά 17% υψηλότερη και η τιμή του φυσικού αερίου κατά 43.5% υψηλότερη από το σενάριο αναφοράς. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω γράφημα 59.



Γράφημα 59: Ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας τις τιμές ηλεκτρισμού και καυσίμου

Παρατηρείται, πως οι νέες τιμές ηλεκτρισμού και καυσίμου είχαν ως αποτέλεσμα, στο τρίτο σενάριο με το συνδυασμό όλων των συστημάτων παραγωγής, η ΚΠΑ της εναλλακτικής με χρήση θερμικής αποθήκευσης να γίνει μεγαλύτερη από ότι χωρίς αποθήκευση. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεγάλη άνοδος της τιμής του καυσίμου οδήγησε σε σημαντική ποσοστιαία αύξηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους για το σενάριο 3.1 (όπου δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης), ενώ στο σενάριο 3.2 η ευελιξία που παρέχει η χρήση θερμικής αποθήκευσης στη λειτουργία των συστημάτων προκάλεσε μικρότερη ποσοστιαία αύξηση του ετήσιου κόστους με αποτέλεσμα η ΚΠΑ του σεναρίου αυτού να προκύψει υψηλότερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη, έτσι όπως αυτή παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια συνάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα, τόσο για τη σημασία συνδυασμού διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων, όσο και για την αξία και την οικονομική βιωσιμότητα που προσφέρει η αποθήκευση ενέργειας, με βάση τα τρέχοντα οικονομικά δεδομένα της αγοράς και τις προοπτικές μελλοντικής εξέλιξης της τεχνολογίας.

Καταρχάς, όπως αναμενόταν και αποδείχθηκε από την επίλυση του μοντέλου με το μαθηματικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης GAMS, η χρήση αποθήκευσης ενέργειας έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει την παραγωγή ενέργειας σε ώρες εκτός της ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, η θερμική αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει στην προσαρμογή στις μεταβολές της τιμής του ηλεκτρισμού καθοδηγώντας το σύστημα να παράγει όταν βρίσκει πολύ χαμηλές οριακές τιμές και όχι όταν υπάρχει η αντίστοιχη ζήτηση από τους καταναλωτές. Από την άλλη, η χημική αποθήκευση ενέργειας σε συνδυασμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ, εξασφαλίζει την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια στις ώρες ηλιοφάνειας μειώνοντας τις εισαγωγές από το δίκτυο. Η ευελιξία αυτή που προσφέρει η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την αποφόρτιση του ηλεκτρικού δικτύου στις ώρες αιχμής, όπου ζητείται το μέγιστο θερμικό φορτίο.

Ακόμη, ο έλεγχος των τριών σεναρίων με τους διαφορετικούς συνδυασμούς συστημάτων παραγωγής ενέργειας, οδήγησε στο συμπέρασμα, ότι η ταυτόχρονη χρήση περισσότερων τεχνολογιών σε συνδυασμό με χρήση θερμικής αποθήκευσης, προσφέρει αρκετά μεγαλύτερη ποσοστιαία εξοικονόμηση σε σχέση με τη χρήση μιας μόνο τεχνολογίας για την κάλυψη της θερμικής ζήτησης. Στην παρούσα εργασία, η συγκεκριμένη διαπίστωση επιβεβαιώθηκε από τις αναλύσεις του τρίτου σεναρίου (αντλία θερμότητας, ΣΗΘ, λέβητας), όπου τα τρία συστήματα παραγωγής συνδυάστηκαν με τη δεξαμενή νερού για θερμική αποθήκευση. Η συνεργασία λοιπόν της αντλίας θερμότητας και της ΣΗΘ αποφέρει σημαντικό οικονομικό όφελος, το οποίο φτάνει σε αξιοσημείωτα επίπεδα με την ευελιξία παραγωγής που προσφέρει η θερμική αποθήκευση ενέργειας.

Παρόλα αυτά, συγκρίνοντας από καθαρά οικονομική σκοπιά τα σενάρια όπου τα συστήματα λειτουργούσαν χωρίς αποθήκευση ενέργειας, με εκείνα στα οποία χρησιμοποιήθηκε είτε θερμική είτε χημική αποθήκευση, προκύπτει ότι σε καμία από τις περιπτώσεις η αποθήκευση δεν καταλήγει σε μεγαλύτερη ΚΠΑ, ώστε να αποβεί συμφέρουσα. Αυτό οφείλεται, στο ότι η εξοικονόμηση που προσφέρει στο ετήσιο λειτουργικό κόστος κάθε σεναρίου υπερκαλύπτεται από τα υψηλά κεφαλαιουχικά κόστη των τεχνολογιών αποθήκευσης με συνέπεια να μην πραγματοποιείται ουσιαστικά απόσβεση στο πλαίσιο της 15ετίας, όπου έγιναν οι αναλύσεις.

Ενδιαφέροντα συμπεράσματα ανέκυψαν και από τις διάφορες αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν μετά την ολοκλήρωση των βασικών σεναρίων. Ένα από αυτά, προέκυψε από τη μείωση της ισχύος της αντλίας θερμότητας στο πρώτο σενάριο και στην εναλλακτική που αυτή

συνδυάστηκε με θερμική αποθήκευση ενέργειας. Η λογική στην οποία στηρίχθηκε η διάρθρωση της παρούσας εργασίας, αφορούσε τον έλεγχο του αρχικού σεναρίου χωρίς χρήση δυνατότητας αποθήκευσης και στη συνέχεια το συνδυασμό με αποθήκευση ενέργειας διατηρώντας, ωστόσο, σταθερές τις ισχύες των συστημάτων παραγωγής. Όμως, ένα από τα οφέλη της χρήσης θερμικής αποθήκευσης είναι ότι επιτρέπει την κάλυψη όλης της θερμικής ζήτησης, χωρίς να απαιτείται η συνολική ισχύς των συστημάτων παραγωγής να είναι ίση με την αιχμή του φορτίου. Έτσι, μειώνοντας σταδιακά την ισχύ της αντλίας στο πρώτο σενάριο, διαπιστώθηκε, ότι στην ελάχιστη τιμή που μπορούσε αυτή να πάρει, ώστε να είναι δυνατή η κάλυψη της ζήτησης, η ΚΠΑ της εναλλακτικής με χρήση αποθήκευσης έγινε μεγαλύτερη από ότι χωρίς αποθήκευση. Αντίστοιχη ανάλυση ευαισθησίας δεν μπορούσε να γίνει στο δεύτερο και το τρίτο σενάριο καθώς οι ισχύες των συστημάτων παραγωγής ήταν ήδη οι ελάχιστες που απαντώνται στην αγορά. Ωστόσο, το συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι ο εξαρχής σχεδιασμός μιας εγκατάστασης με χρήση αποθήκευσης ενέργειας, ώστε να χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη δυνατή ισχύς για τα συστήματα παραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά αποτελέσματα που να συνηγορούν υπέρ της αποθήκευσης. Επίσης, προς αυτή την κατεύθυνση μπορεί να συνεισφέρει και η εξέλιξη της τεχνολογίας με τη δημιουργία συστημάτων ακόμα χαμηλότερης ονομαστικής ισχύς.

Από τις υπόλοιπες αναλύσεις ευαισθησίας διαπιστώθηκε, ότι παράγοντες όπως το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης και η διαμόρφωση των τιμών ηλεκτρισμού και καυσίμου μπορούν να επηρεάσουν το κατά πόσο η αποθήκευση ενέργειας θα αποδειχθεί συμφέρουσα, ενώ άλλοι όπως η χωρητικότητα αποθήκευσης και οι απώλειες ενέργειας δεν παίζουν σημαντικό ρόλο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε όσον αφορά τα κόστη αποθήκευσης ότι για να γίνει συμφέρουσα η θερμική αποθήκευση πρέπει να γίνει ελάττωση του κόστους της κατά 33%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τη χημική αποθήκευση διαμορφώθηκε περί το 50%. Όσον αφορά τις τιμές ηλεκτρισμού και καυσίμου, προέκυψε από τη μελέτη του σεναρίου εξηλεκτρισμού, ότι για ίδια η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της τιμής του ηλεκτρισμού σε σχέση με του καυσίμου η θερμική αποθήκευση εξακολουθεί να μην είναι συμφέρουσα. Αντίθετα, για ποσοστιαία αύξηση της τιμής του καυσίμου μεγαλύτερη από ότι του ηλεκτρισμού το σενάριο της θερμικής αποθήκευσης τείνει να γίνει οικονομικότερο σε σύγκριση με την απουσία αποθήκευσης. Η διαπίστωση αυτή ισχύει μόνο για την περίπτωση του τρίτου σεναρίου με το συνδυασμό όλων των συστημάτων παραγωγής, ενώ η σύγκριση των σεναρίων με ή χωρίς χημική αποθήκευση δεν επηρεάζεται.

Αναφορικά με τις μελλοντικές προοπτικές της παρούσας εργασίας έχει μεγάλη αξία το μοντέλο να επεκταθεί για τη μελέτη εγκαταστάσεων μεγαλύτερης κλίμακας (συγκρότημα πολυκατοικιών, ξενοδοχείο, νοσοκομειακή μονάδα), όπου η θερμικής αποθήκευσης θα αποδειχθεί σαφώς πιο συμφέρουσα οικονομικά. Ακόμη, εκτός από την καθαρά οικονομική σκοπιά, μπορεί να γίνει αντίστοιχη μελέτη σχετικά με τις εκπομπές ρύπων και την περιβαλλοντική ελάφρυνση που μπορούν να προσφέρουν μελλοντικά ο συνδυασμός διαφορετικών συστημάτων παραγωγής και η αποθήκευση ενέργειας. Άλλωστε η συνεισφορά στην περιβαλλοντική προστασία μπορεί να οδηγήσει και σε κρατική χρηματοδότηση τέτοιων εγχειρημάτων ελαττώνοντας τα υψηλά κόστη για την εγκατάσταση αυτών των τεχνολογιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση, την τροποποίηση των Οδηγιών 2009/125/EK και 2010/30/EE και την κατάργηση των Οδηγιών 2004/8/EK και 2006/32/EK (2012/27/EE).
- [2] COM(2008) 772 τελικό, Ενεργειακή απόδοση: επίτευξη του στόχου του 20%, Βρυξέλλες, 2008.
- [3] Tomislav Capuder, Pierluigi Mancarella, Techno-economic and environmental modelling and optimization of flexible distributed multi-generation options, Elsevier, 2014.
- [4] Pierluigi Mancarella, MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models, Elsevier, 2013.
- [5] Pierluigi Mancarella, Smart multi-energy grid: concepts, benefits and challenges, In: IEEE PES general meeting, San Diego, 2012.
- [6] G. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: a comprehensive view, Renew Sustain Energy Rev, 2009.
- [7] G. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: energy models and analyses, Nova Publisher, New York, 2009.
- [8] C. Yang, Hydrogen and electricity: parallels, interactions and convergence, Int J Hydrogen Energy, 2008.
- [9] P. Papadaskalopoulos, G. Strbac, P. Mancarella, M. Aunedi, V. Stanojevic, Decentralised participation of flexible demand in electricity markets Part II: application with electric vehicles and heat pump systems, IEEE Trans Power Syst, 2013.
- [10] JH. Horlock, Advanced gas turbine cycles, Elsevier, 2013.
- [11] A. Martens, The energetic feasibility of CHP compared to the separate production of heat and power, Appl Therm Eng, 1998.
- [12] P. Mancarella, C. Gan, G. Strbac, Evaluation of the impact of electric heat pumps and distributed CHP on LV networks, In: IEEE Powertech, 2011.
- [13] H. Lund, A. Andersen, Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices, Energy Convers Manage, 2005.
- [14] M. Blarke, H. Lund, Large scale heat pumps in sustainable energy systems: system and project perspectives, Therm Sci, 2007.
- [15] B. Mathiesen, M. Blarke, K. Hansen, D. Connolly, The role of large scale heat pumps for short term integration of renewable energy, Europeiska Unionen, 2011.
- [16] H. Lund, Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources, IET Renew Power Gener, 2009.
- [17] http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_esdgr_a&lang=en
nrg_esdgr_a – EUROSTAT – Data Explorer.
- [18] Odyssee – MURE - <http://www.odyssee-mure.eu>
- [19] Survey on Energy Consumption of Households in Greece Project - SECH Project Greece.
- [20] <http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/timologia-chreosis-christon>
- [21] P. Mancarella, N. Good, A. Martinez-Cesena, Mapping multi-form flows in smart multi-energy districts to facilitate new business cases, University of Manchester, 2014.
- [22] <https://www.tesla.com/powerwall>

- [23] P. Mancarella, Cogeneration systems with electric heat pumps: Energy-shifting properties and equivalent plant modelling, Elsevier, 2009.
- [24] A. Ahmed, P. Mancarella, strategic techno-economic assessment of heat network options for distributed energy systems in UK, Elsevier, 2014.
- [25] N. Good, L. Zhang, A. Navarro-Espinosa, P. Mancarella, High resolution modelling of multi-energy domestic demand profiles, Elsevier, 2014.
- [26] V. Verda, F. Colella, Primary energy savings through thermal storage in district heating networks, Elsevier, 2011.
- [27] V. Verda, E. Guelpa, A. Kona, S. Lo Russo, Reduction of primary energy needs in urban areas through optimal planning of district heating and heat pump installations, Elsevier, 2012.
- [28] A. Hawkes, M. Leach, Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power, Elsevier, 2005.
- [29] N. Tsakomakas, Integrated evaluation of residential micro-combined heat and power systems, International Hellenic University, School of Science and Technology, 2011
- [30] M. Houwing, R. Negenborn, B. De Schutter, Demand response with micro-CHP systems, Delft University of Technology, 2011
- [31] <http://www.lagie.gr/>
- [32] <http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/>
- [33] I. Staffel, D. Brett, N. Brandon, A. Hawkes, A review of domestic heat pumps, Energy and Environmental Science, Dynamic Article Links, 2012