



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πολυτεχνική Σχολή

Ενεργειακή κατεύθυνση  
Τομέας μεταφοράς και παραγωγής ενέργειας

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ  
ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.**

**OPTIMIZATION OF MULTI ENERGY SYSTEMS  
FOR DOMESTIC HOT WATER USES.**

**ΚΙΛΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΝΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**



**ΚΟΖΑΝΗ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020**



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πολυτεχνική Σχολή

Ενεργειακή κατεύθυνση  
Τομέας μεταφοράς και παραγωγής ενέργειας

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ  
ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.**

**OPTIMIZATION OF MULTI ENERGY SYSTEMS  
FOR DOMESTIC HOT WATER USES.**

**ΚΙΛΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ  
(ΑΕΜ: 1944)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΝΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020**

## Ευχαριστίες

---

Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι εξαιρετικά σημαντικό να αποδοθούν από μέρους μου ευχαριστίες σε ανθρώπους που με εμπιστεύθηκαν και με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια πραγματοποίησής της.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πανάρα Γεώργιο, ο οποίος με την εμπιστοσύνη του και την αδιάλειπτη καθοδήγησή του με ώθησε στην διεξαγωγή και στην περάτωση της παρούσας εργασίας. Έναυσμα αποτέλεσε η συνεργασία μας και οι γνώσεις που μου παρείχε σε πολλά μαθήματα ενεργειακού περιεχομένου κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Επιπρόσθετα, οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Πλόσκα Νικόλαο για την συνδρομή του στην διαχείριση των θεμάτων που αφορούσαν το προγραμματιστικό κομμάτι γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού.

Σημαντικό είναι να δοθεί και ένα ευχαριστώ σε φίλους και συμφοιτητές μου που με συμβούλεψαν και με στήριξαν καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Θεό και στην οικογένειά μου, τον πατέρα, τη μητέρα και την αδερφή μου, που με ανιδιοτέλεια, στήριξη και αγάπη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, μου έδιναν θάρρος και δύναμη να εκπληρώσω τους στόχους μου.

## Περίληψη

---

Τα τελευταία χρόνια το ενεργειακό ζήτημα απασχολεί ολόκληρο το κόσμο τόσο σε βιοτικό και οικονομικό επίπεδο για τον άνθρωπο όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο εξαιτίας των αυξανόμενων ρύπων που εκλύονται στο περιβάλλον. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη λήψη δραστικών αποφάσεων ακόμη και στην ενέργεια που καταναλώνεται στα κτήρια. Για την ανατροπή της κατάστασης που επικρατεί γίνεται πλέον αφενός στροφή προς συστήματα ΑΠΕ και αφετέρου βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων συμβατικών συστημάτων για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων των κτηριακών εγκαταστάσεων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων για την κάλυψη των αναγκών του ζεστού νερού οικιακής χρήσης για ένα κτήριο 200 m<sup>2</sup>. Το παρόν κτήριο εδράζεται σε περιοχές δύο διαφορετικών κλιματικών ζωνών όπως αυτές ορίζονται από τον Κ.Εν.Α.Κ, ώστε να προκύψουν συγκριτικά συμπεράσματα. Για την βελτιστοποίηση επιλέγονται ορισμένα συστήματα, συμβατικά και ΑΠΕ, και αναπτύσσονται ενεργειακά και περιβαλλοντικά μοντέλα ελαχιστοποίησης του κόστους. Τα μοντέλα αυτά στηρίζονται σε διαφορετικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, με αποτέλεσμα να συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα αφορούν τη βέλτιστη συμμετοχή των συστημάτων, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κόστη αλλά και τις ενεργειακές καταναλώσεις. Αναφορικά με τα μοντέλα, δομούνται απλές προσεγγίσεις γραμμικών αντικειμενικών συναρτήσεων, πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με ή χωρίς συντελεστές βαρύτητας και μοντέλα που βασίζονται στο goal programming και η παραλλαγή του με βαρύτητες. Τέλος, παρατίθενται σχόλια και συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των διάφορων μεθοδολογιών βελτιστοποίησης.

## Abstract

---

In recent years the energy issue concerns the whole world both in the living and economic level for humans and in the environmental level due to the increasing pollutants released into the environment. This leads to drastic decisions even to the energy consumption in buildings. To overturn the current situation there is a transition to Renewable Energy Systems (RES) and optimization of existing conventional systems to meet the energy requirements of building facilities.

This thesis deals with the optimization of energy systems to meet the needs of domestic hot water for a building of 200 square meters. The adopted building is located to areas of two different climatic zones as defined by the Greek version of Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), so that comparative conclusions may be drawn. For optimization, certain systems are selected, conventional and RES, and energy and environmental models are developed to minimize costs. These models are based on different methods of solving linear programming problems, as a result of which the results are compared with each other. The results relate to the optimal participation of systems, economic and environmental costs and energy consumption in terms of models, simple models of linear objective functions, models of multiple objective functions with or without gravity factors and models based on goal programming and its variation with gravities are structured. Finally, comments and conclusions from the results of the various optimization methodologies are presented.

# Περιεχόμενα

---

<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>iii</b>
<b>Περίληψη</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Περιεχόμενα</b> .....	<b>vi</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Καταναλώσεις ενέργειας στα κτήρια και περιβαλλοντικές συνθήκες. ....	1
1.2 Ενεργειακά συστήματα και ανάγκη βελτιστοποίησης. ....	3
1.3 Σκοπός και δομή εργασίας. ....	4
<b>Κεφάλαιο 2: Ενεργειακά συστήματα</b> .....	<b>6</b>
2.1 Αντλίες θερμότητας .....	6
2.1.1 Εισαγωγικά χαρακτηριστικά. ....	6
2.1.2 Ορισμός αντλίας θερμότητας και συντελεστές λειτουργίας. ....	8
2.2 Λέβητες. ....	12
2.2.1 Ορισμός και ταξινόμηση λεβήτων .....	12
2.2.2 Αποδοτικότητα λεβήτων .....	18
2.3 Ηλιακά συστήματα. ....	19
2.3.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα. ....	20
2.3.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης υγρού .....	21
<b>Κεφάλαιο 3: Ζεστό νερό χρήσης σε κτηριακή εγκατάσταση</b> .....	<b>23</b>
3.1 Εισαγωγικές έννοιες ZNX. ....	23
3.1.1 Θέρμανση νερού οικιακής χρήσης. ....	23
3.1.2 Μέθοδοι θέρμανσης νερού. ....	25
3.2 Υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων ZNX. ....	27
3.3 Υπολογισμός καταναλώσεων και κόστους ενέργειας και περιβάλλοντος για τα συστήματα ZNX. ....	31

3.3.1 Λέβητας πετρελαίου.....	31
3.3.2 Λέβητας βιομάζας.....	32
3.3.3 Θερμοσίφωνα ηλεκτρικής αντίστασης .....	34
3.3.4 Ηλεκτρική αντλία θερμότητας .....	35
3.3.5 Ηλιακός θερμοσίφωνα.....	39
3.3.6 Συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των συστημάτων.....	42
<b>Κεφάλαιο 4: Οικονομική βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων .....</b>	<b>47</b>
4.1 Βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων.....	47
4.2 Κόμβος ενεργειακών συστημάτων .....	49
<b>Κεφάλαιο 5: Μοντέλα βελτιστοποίησης ενεργειακών συστημάτων.....</b>	<b>53</b>
5.1 Περιγραφή και διατύπωση μοντέλου.....	53
5.2 Ενεργειακό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους.....	56
5.3 Περιβαλλοντικό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους.....	71
5.4 Μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους πολλαπλών κριτηρίων.....	73
5.4.1 Γενική περιγραφή.....	73
5.4.2 Μοντέλο χωρίς βαρύτητες.....	74
5.4.3 Μοντέλο με βαρύτητες.....	77
<b>Κεφάλαιο 6: Βελτιστοποίηση Goal programming.....</b>	<b>83</b>
6.1 Εισαγωγικές έννοιες του προγραμματισμού στόχου.....	83
6.1.1 Κλασικό Goal Programming .....	84
6.1.2 Weighted Goal Programming.....	89
6.2 Μοντέλα προγραμματισμού στόχου (Goal programming).....	91
6.2.1 Μοντέλο Goal Programming .....	91
6.2.2 Μοντέλο Weighted Goal Programming .....	98
<b>Κεφάλαιο 7: Επίλογος.....</b>	<b>101</b>
7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα .....	101
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	102
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>103</b>

Παράρτημα Π.1 .....	103
Παράρτημα Π.2 .....	108
Παράρτημα Π.3 .....	118
Παράρτημα Π.4 .....	119
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>123</b>



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

---

### 1.1 Καταναλώσεις ενέργειας στα κτήρια και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα για την παγκόσμια κοινότητα, ειδικά τα τελευταία 20 χρόνια, είναι η αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας λόγω του μεγάλου πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ-28), σύμφωνα με τα ετήσια ενεργειακά στοιχεία του 2018, τα κτήρια αντιπροσωπεύουν περίπου το 41% της συνολικής τελικής ενέργειας κατανάλωσης (Eurostat 2020). Επίσης, με βάση τα στοιχεία του 2017, η κύρια κατανάλωση ενέργειας στα νοικοκυριά ήταν για τη θέρμανση των χώρων και του ζεστού νερού οικιακής χρήσης, και πιο συγκεκριμένα πρόκειται για το 64,1% και το 14,8% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας αντίστοιχα (Eurostat 2020). Η γήρανση του πληθυσμού και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες πιθανότατα θα αυξήσουν τη ζήτηση για άνεση που σχετίζεται με τη θέρμανση και την ψύξη, ενώ λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη αναμένεται μεγάλη αύξηση της ζήτησης ψύξης, ακόμη και στις βόρειες χώρες, με συνέπειες τόσο την αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας όσο και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Heat Emissions, GHG).

Η ενσωμάτωση αποδοτικής θέρμανσης και ψύξης στις ενεργειακές πολιτικές της ΕΕ αποτελεί πρωταρχική προτεραιότητα και πρέπει να επιταχυνθούν γρήγορα οι προσπάθειες για την επίτευξη σημαντικών μειώσεων στις εκπομπές CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με την ενέργεια. Μέχρι το 2050, η ΕΕ έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας που βασίζεται στην ορυκτή καύσιμη ύλη και κατ' επέκταση των συνεπακόλουθων εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Έτσι, όλα τα νέα κτήρια πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικών ενεργειακών προδιαγραφών (near Zero energy Building, nZEB) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020. Οι στόχοι για το 2030 είναι αρχικά μια μείωση τουλάχιστον κατά 40% των αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990, η παραχώρηση μεριδίου τουλάχιστον 32% για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τουλάχιστον 32,5% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των χρησιμοποιούμενων συστημάτων (European Commission 2014). Ομοίως, οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2030 πρέπει να είναι περίπου 25% με 55% χαμηλότερα από τα επίπεδα του 2017, έτσι ώστε η υπερθέρμανση του πλανήτη να περιοριστεί στους 2°C ή 1, 5°C αντίστοιχα. Επιπλέον, η ΕΕ έχει θέσει μακροπρόθεσμο στόχο την μείωση των εκπομπών αερίων του

θερμοκηπίου κατά 80-95%, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, έως το 2050. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, πρέπει να γίνουν σημαντικές επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα αλλά και αντίστοιχες υποδομές του δικτύου, ώστε το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να αυξηθεί και η ενέργεια να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά.

Στον κτηριακό τομέα έχει μεγάλη σημασία η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της θέρμανσης, των συστημάτων εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) καθώς και η εκμετάλλευση των συστημάτων ΑΠΕ, τα οποία μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις ενεργειακές δαπάνες και να μειώσουν ταυτόχρονα τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Για την επίτευξη των στόχων της ΕΕ για ένα ισορροπημένο κλίμα και την ικανοποιητικότερη διαχείριση της ενέργειας, είναι εξαιρετικά σημαντική η απανθρακοποίηση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης τόσο στα κτήρια όσο και στη βιομηχανία, που αντιπροσωπεύει περίπου το ήμισυ της συνολικής τελικής ενεργειακής ζήτησης στην Ευρώπη. Προβλέπεται ότι περίπου το 40% του στόχου για το 32% των ΑΠΕ μέχρι το 2030 θα προέλθει από τους τομείς της θέρμανσης και της ψύξης (Renewable heating and cooling, RHC 2019).

Συμπερασματικά, η αλόγιστη χρήση συμβατικών καυσίμων αφενός οδηγεί στην εξάντληση των ενεργειακών πόρων και αφετέρου στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εντείνεται το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, έχοντας αρνητικές συνέπειες στη δημόσια υγεία και στη βιοποικιλότητα του φυσικού περιβάλλοντος. Επομένως, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η παροχή καθαρής ενέργειας αποτελούν βασικές προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU, 2018a; EC, 2016). Μία τέτοια πολιτική στοχεύει κυρίως στη μείωση της πρωτογενούς ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και στην άντληση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (EC, 2018; EU, 2018b; EC, 2014). Ο κτηριακός τομέας αποτελεί τον μεγαλύτερο ενεργειακό καταναλωτή στην ΕΕ με ποσοστό που ξεπερνά το 40%, όπου τα 2/3 αυτής της ενέργειας χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αναγκών σε θέρμανση και ψύξη. Από την άλλη πλευρά όμως, τα κτήρια διαθέτουν υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας και διείσδυσης ΑΠΕ.

Στο πλαίσιο αυτό, είναι σημαντική η ανάπτυξη δράσεων βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτηρίων και κατ' επέκταση μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση τους. Η παραπάνω ανάγκη, σε συνδυασμό

με την ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος τα τελευταία χρόνια, η οποία έχει οδηγήσει σε διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία σχεδιασμού και ανάλυσης της ενεργειακής συμπεριφοράς, και 'έξυπνες' τεχνικές αυτομάτου ελέγχου, καθώς και ευρεία γκάμα αναδυόμενων υλικών και ενεργειακών τεχνολογιών, διαμορφώνει ένα σύνθετο και με ιδιαίτερες προοπτικές, πεδίο για τον μηχανικό, όσον αφορά τόσο τις μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού, όσο και τις διαθέσιμες τεχνολογίες.

## 1.2 Ενεργειακά συστήματα και ανάγκη βελτιστοποίησης.

Τα κλιματικά δεδομένα που επικρατούν στην περιοχή όπου εδράζεται ένα κτήριο, καθώς και το είδος της αξιοποίησής του, αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες για την επιλογή των κατάλληλων ενεργειακών συστημάτων. Έτσι, τα συστήματα αυτά είναι απαραίτητα να διαστασιολογούνται ορθά, ώστε στο κτήριο να καλύπτονται οι απαιτήσεις στις βασικές ενεργειακές ανάγκες, όπως είναι η θέρμανση, η ψύξη, το ζεστό νερό χρήσης, ο φωτισμός και ο αερισμός.

Είναι προφανές πως τα συστήματα που αφορούν την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και ψύξη είναι αυτά που ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας ενός κτηρίου, όμως σημαντικά είναι και τα φορτία της θέρμανσης του οικιακού νερού χρήσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αναγκαιότητα που προκύπτει για την διερεύνηση της αποδοτικότητάς τους, της επάρκειάς τους να καλύψουν τις απαιτήσεις του κτηρίου, αλλά και την φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Ένα κτήριο μπορεί να χαρακτηριστεί ενεργειακά αποδοτικό και περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον, στην περίπτωση που η χρήση των συμβατικών συστημάτων είναι περιορισμένη – περιορισμός στη χρήση συμβατικών καυσίμων όπως πετρέλαιο – και κατά συνέπεια υπάρχει και περιορισμός στην πρωτογενή ενέργεια και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), που αποτελεί ένα από τα κυριότερα στοιχεία ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου, μέσα από το οποίο είναι αποδεδειγμένη η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης. Σημαντική παράμετρος για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι και το οικονομικό κόστος, το οποίο επιβαρύνει τον χρήστη. Το κόστος αυτό επιμερίζεται σε ενεργειακό κόστος ανάλογα με τις καταναλώσεις και σε κόστος εγκατάστασης, για το οποίο ο χρήστης επιθυμεί την ελαχιστοποίησή του, ώστε να επιβαρύνεται το ελάχιστο δυνατό, καλύπτοντας παράλληλα τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Στο πλαίσιο αυτό είναι σημαντικό να διαμορφωθούν ενεργειακά μοντέλα που θα ελαχιστοποιούν το κόστος τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται η έννοια της βελτιστοποίησης των ενεργειακών συστημάτων. Ένα σύστημα σχεδιασμένο για να επιτρέπει στο χειριστή να επιλέξει μεταξύ πολλαπλών πηγών ενέργειας αναφέρεται ως ένα multi-energy σύστημα (ή υβριδικό ενεργειακό σύστημα). Τα συστήματα αυτά λαμβάνουν επί του παρόντος αυξημένο ενδιαφέρον καθώς αντιπροσωπεύουν ένα πολύτιμο μέσο εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και των επιλογών των εγκαταστάσεων για τους ιδιοκτήτες. Υπάρχουν τέσσερα βασικά σύνολα παραμέτρων στο πιο γενικό διατύπωση του αλγόριθμου σύζευξης των multi-energy συστημάτων, τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

- Παράμετροι που σχετίζονται με την απαιτούμενη ενέργεια.
- Παράμετροι που σχετίζονται με το ποσοστό συμμετοχής των συστημάτων.
- Παράμετροι που σχετίζονται με την απόδοση των συστημάτων.
- Παράμετροι που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας.

### 1.3 Σκοπός και δομή εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί ενεργειακά ένα κτήριο 200 τ.μ. για την κάλυψη των απαιτήσεων που έχουν 8 ένοικοι για ζεστό νερό χρήσης και να αναπτυχθούν ενεργειακά μοντέλα που να επιλέγουν το ποσοστό συμμετοχής των χρησιμοποιούμενων συστημάτων ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος. Στο σημείο αυτό περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο του κάθε κεφαλαίου που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή.

Αρχικά, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικότερων ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και ψύξη κτηριακών εγκαταστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν τις αντλίες θερμότητας, τις διατάξεις των λεβήτων και τους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες.

Στο κεφάλαιο 3 δίδονται πρωτίστως ορισμένα στοιχεία για τα βασικότερα ενεργειακά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση του νερού και πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των ενεργειακών φορτίων για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ZNX. Επίσης, παρατίθενται δεδομένα όπως βαθμοί απόδοσης, θερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας και κόστη ώστε να καθοριστούν τόσο οι

ενεργειακές καταναλώσεις, όσο και τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη σε ωριαία κλίμακα.

Ακολούθως, στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια σύντομη αναφορά στις διατάξεις πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων και του τρόπου με τον οποίο μπορεί να βελτιστοποιηθεί η χρήση τους στις κτηριακές ενεργειακές απαιτήσεις.

Το κεφάλαιο 5 περιγράφει το τρόπο δόμησης ενός ενεργειακού μοντέλου που να ελαχιστοποιεί τα ενεργειακά κόστη μαζί με τα κόστη εγκατάστασης. Επιπλέον, επιλύονται τέσσερα μοντέλα, δύο ενεργειακά και δύο περιβαλλοντικά, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καθώς και χρήσιμα ενεργειακά και οικονομικά συμπεράσματα, συγκρίνοντας συνάμα δύο ίδια κτήρια που βρίσκονται στις δύο ακραίες κλιματικές ζώνες Α και Δ. Τέλος, διαμορφώνονται και επιλύονται μοντέλα που συνδυάζουν το ενεργειακό και περιβαλλοντικό πρόβλημα για κτήριο στην κλιματική ζώνη Δ.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μια διαφορετική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, το goal programming, αλλά και μια παραλλαγή αυτού που ονομάζεται weighted goal programming. Έτσι, αναπτύσσονται δύο νέα μοντέλα, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μοντέλα του κεφαλαίου 5.

Τελικά, στο κεφάλαιο 7 αναπτύσσονται τα βασικότερα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και υποδεικνύονται επεκτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές μελέτες.

## Κεφάλαιο 2: Ενεργειακά συστήματα

---

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση ορισμένων ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται ως εγκαταστάσεις θέρμανσης του νερού οικιακής χρήσης. Βέβαια, τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την θέρμανση ή ψύξη χώρων στις κτηριακές εγκαταστάσεις.

### 2.1 Αντλίες θερμότητας

#### 2.1.1 Εισαγωγικά χαρακτηριστικά

Υπάρχει μια ευρεία ποικιλία των εμπορικά ανταγωνιστικών και αποδοτικών τεχνολογιών για θέρμανση και ψύξη με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που μπορούν να υλοποιηθούν είτε σε υφιστάμενα είτε σε νέα κτήρια. Οι σόμπες και οι λέβητες βιομάζας, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, αλλά και αυτές που χρησιμοποιούν τη θερμότητα του εξωτερικού αέρα, καθώς επίσης και οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες είναι από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες λύσεις μικρής κλίμακας στον οικοδομικό τομέα. Οι αντλίες θερμότητας (HPs) είναι αρκετά αποδοτικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση και την ψύξη, χωρίς να εκλύονται μεγάλες ποσότητες επιβλαβών εκπομπών, και να χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές στον οικιστικό, εμπορικό και βιομηχανικό τομέα. Ενδέχεται να χρησιμοποιούν ανανεώσιμους πόρους, όπως για παράδειγμα αέρα, νερό και έδαφος, ή την θερμότητα των αποβλήτων, παρέχοντας έτσι τη θέρμανση, την ψύξη και το οικιακό ζεστό νερό χρήσης (DHW). Επιπλέον, οι αντλίες θερμότητας είναι σε θέση να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών θερμοκρασιών και η τεχνολογία τους είναι ώριμη και αξιόπιστη.

Η αγορά των αντλιών θερμότητας αναμένεται να αναπτυχθεί με ταχείς ρυθμούς και η χρήση τους αναμένεται να γίνει ευρέως διαδεδομένη. Με την εφαρμογή από την ΕΕ των τεχνικών οδηγιών ErP (EC, 2009) και EPBD (EC, 2009) διαπιστώνεται ότι τα συμβατικά υδραυλικά συστήματα θέρμανσης υψηλής θερμοκρασίας αναμένεται σταδιακά να αντικατασταθούν από συστήματα νερού χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτά έχουν το πλεονέκτημα των χαμηλότερων απωλειών θερμότητας ανάλογα με την κατανομή θερμότητας και τη δυνατότητα χρήσης αντλιών θερμότητας με υψηλή απόδοση. Ως εκ τούτου, οι αντλίες θερμότητας ως αποτελεσματικά συστήματα παραγωγής θερμότητας αναμένεται να εγκατασταθούν ευρέως και να αντικαταστήσουν

τις τεχνολογίες θέρμανσης χαμηλών αποδόσεων, που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Σε διαμερίσματα, κτήρια γραφείων ή μονοκατοικίες, οι αντλίες θερμότητας αέρα – νερού (AWHPs) είναι μια καλή λύση για την αυτόνομη θέρμανση, ψύξη – αφύγρανση ακόμη και ως σύστημα παραγωγής οικιακού ζεστού νερού χρήσης DHW, λόγω της καλής προσβασιμότητας του αέρα ως πηγή θερμότητας. Είναι οικονομικά ανταγωνιστικές, έχουν απλό σχεδιασμό, εγκαθίστανται εύκολα, ακόμη και σε ανακαινίσεις κτηρίων, και μπορούν να καλύψουν μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία ο αριθμός των μονάδων αντλιών θερμότητας αέρα-νερού (AWHP) που πωλήθηκαν το 2018 στην Ευρώπη (EE-28) ήταν 21,5% υψηλότερες σε σύγκριση με τις πωλήσεις του έτους 2017 (EurObserv'ER 2019). Από την άλλη πλευρά, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας GSHPs προσφέρουν μεγάλα πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, καθώς μπορούν να συμβάλουν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας (Allaerts et al 2017). Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας GSHPs παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση από τις αντίστοιχες του αέρα ASHPs, επειδή το υπόγειο περιβάλλον του εδάφους παρέχει τις χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης και υψηλότερες κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας GSHPs λειτουργούν σε χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος όπου λειτουργούν οι αντλίες αέρα και ειδικότερα σε ακραίες καιρικές συνθήκες (Yan, Cui, and Fang 2010; Michopoulos et al. 2007). Οι GSHPs εγκαθίστανται ευκολότερα σε μονοκατοικίες ή κτήρια γραφείων στα προάστια των πόλεων ή σε κτήρια του τριτογενούς τομέα με διαθέσιμη γη. Σε μια συγκριτική ανασκόπηση των διαφόρων συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στις χώρες της ΕΕ, με βάση την εποχιακή απόδοση και το κόστος των καυσίμων, GSHPs φαίνεται να έχουν το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (Martinopoulos, Papakostas and Papadopoulos, 2018). Η ετήσια χρήση της θερμικής ενέργειας που παράγεται από GSHPs αυξήθηκε από 14617 TJ (~4.06 TWh) σε 326848 TJ (~90.79 TWh) κατά την περίοδο 1995 έως 2015 (Lund και Boyd, 2016), δηλαδή η αύξηση ήταν υψηλότερη από 2100%. Το 2015 ο ισοδύναμος αριθμός εγκατεστημένων μονάδων 12 kW (χαρακτηριστικές των σπιτιών των ΗΠΑ και της Δυτικής Ευρώπης) ήταν περίπου 4, 19 εκατομμύρια, πράγμα το οποίο αποτελεί μια αύξηση της τάξεως του 52% σε σχέση με τον αριθμό των εγκατεστημένων μονάδων που καταγράφηκαν το 2010, και πάνω από

τρεις φορές τον αριθμό των μονάδων που καταγράφηκαν το 2005 (Lund και Boyd 2016). Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία ο αριθμός των μονάδων αντλιών θερμότητας εδάφους (GSHP) που πωλήθηκαν το 2018 στην Ευρώπη (EE-28) ήταν 4,9% υψηλότερη σε σύγκριση με εκείνες του έτους 2017 (EurObserv'ER 2019).

### 2.1.2 Ορισμός αντλίας θερμότητας και συντελεστές λειτουργίας

Οι αντλίες θερμότητας είναι μηχανές, συσκευές ή εγκαταστάσεις που αντλούν θερμότητα από το φυσικό περιβάλλον, όπως ο αέρας, το νερό ή το έδαφος, και το μεταφέρουν στα κτήρια ή τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις με την αντιστροφή της φυσικής ροής της θερμότητας, τέτοια ώστε να ρέει από χαμηλότερη σε υψηλότερη θερμοκρασία (λειτουργία θέρμανσης). Για αντιστρέψιμες αντλίες θερμότητας, μπορούν επίσης να μεταφέρουν θερμότητα (λειτουργία ψύξης) από το κτήριο στο φυσικό περιβάλλον. Αυτή η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση μηχανικού έργου. Οι περισσότερες αντλίες θερμότητας είναι ηλεκτρικά κινούμενες και λειτουργούν σύμφωνα με έναν κύκλο συμπίεσης ενός ρευστού. Ένα ψυκτικό στοιχείο είναι συνήθως το εργαζόμενο υγρό μέσο που διέρχεται διαδοχικά μέσω των κύριων συνιστωσών της HP, τα οποία είναι ο εξατμιστής, ο συμπιεστής, ο συμπυκνωτής και μια συσκευή εκτόνωσης. Η λειτουργία της HP βασίζεται στο γεγονός ότι το ψυκτικό μέσο σε υγρή κατάσταση ψύχεται και απορροφά θερμότητα όταν εξατμίζεται, ενώ όταν βρίσκεται στην κατάσταση ατμών, τότε απελευθερώνει λανθάνουσα θερμότητα καθώς συμπυκνώνεται. Εκτός από τις συσκευές κύκλου συμπίεσης, υπάρχουν HPs οι οποίες κινούνται θερμικά και η λειτουργία τους βασίζεται στον κύκλο θερμικής ρόφησης και τροφοδοτούνται με θερμότητα που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή απόβλητα θερμότητας ή ακόμη και με καύσιμα.

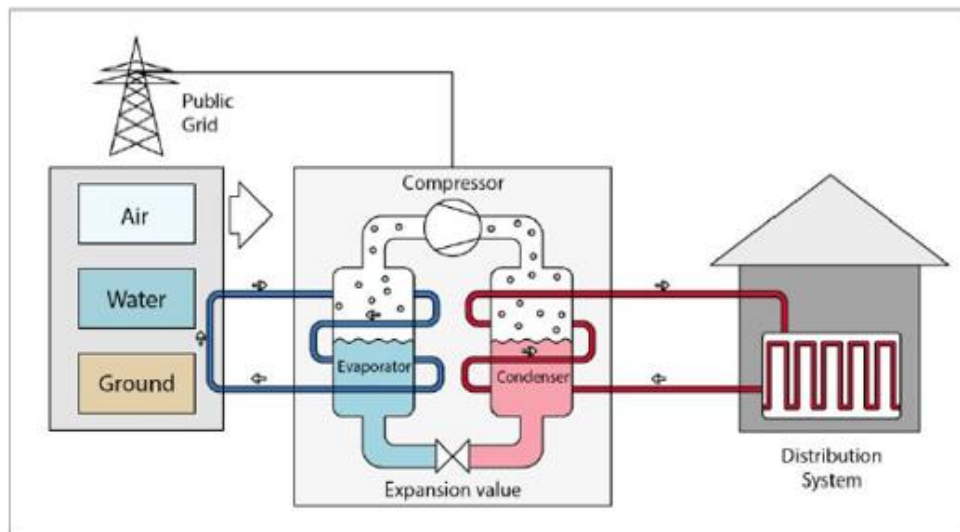
Ένα σύστημα HP αποτελείται από μια πηγή θερμότητας, τη μονάδα HP και ένα σύστημα διανομής που παραδίδει θερμότητα ή κρύο σε μια θερμική ζώνη (π.χ. διαμέρισμα, γραφείο), σε ένα κτίριο ή σε μια βιομηχανική διαδικασία. Σύμφωνα με την πηγή θερμότητας και το δοχείο ψύξης, οι HPs ταξινομούνται με βάση την πηγή, από όπου αντλούν την ενέργεια, σε:

1. Αντλίες θερμότητας πηγών αέρα (air – source HPs), όπως για παράδειγμα αντλίες θερμότητας αέρα – αέρα (air to air) ή αέρα – νερού (air to water) ανάλογα με εάν το σύστημα διανομής θερμότητας στο κτήριο χρησιμοποιεί το νερό ή τον αέρα.

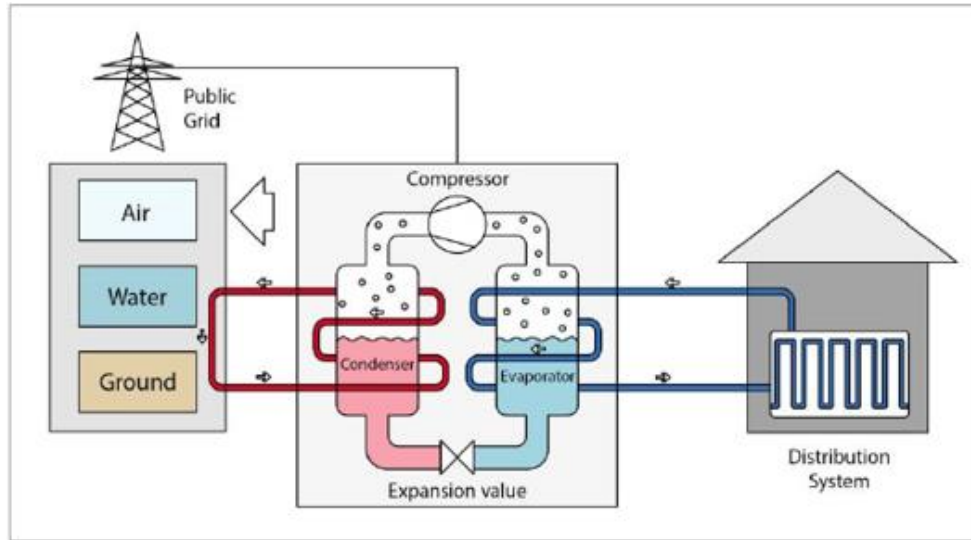


2. Αντλίες θερμότητας πηγών νερού (water – source HPs), όπως για παράδειγμα αντλίες θερμότητας νερού – αέρα (water to air) ή νερού – νερού (water to water).
3. Αντλίες θερμότητας πηγών εδάφους (ground or brine – source HPs) ή αλλιώς γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, όπως για παράδειγμα αντλίες θερμότητας εδάφους – αέρα (ground to air) ή εδάφους – νερού (ground to water).

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται ένα σχηματικό διάγραμμα μιας αντλίας θερμότητας νερού κατά τη λειτουργία της για θέρμανση και κατά τη λειτουργία της για ψύξη. Όσον αφορά την τεχνολογία συμπιεστών, ο βασικός τύπος HPs χαρακτηρίζεται ως σταθερής χωρητικότητας που μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε πλήρη ισχύ και έτσι πρέπει να ενεργοποιείται και να διακόπτεται η λειτουργία του, για να διατηρηθεί μια δεδομένη εσωτερική θερμοκρασία. Αυτή η τεχνολογία αντικαθίσταται σταδιακά από έναν πλήρως διαμορφωμένο μετατροπέα, ο οποίος αποτελεί μια οδηγημένη τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα να μειωθεί η παραγωγή ισχύος σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχει ακριβώς τις θερμοκρασίες εξόδου που παράγονται, με συνέπεια τη σημαντική αποταμίευση ενέργειας συγκριτικά με τα πρότυπα σταθερής δυναμικότητας.



(α)



(β)

**Σχήμα 1:** Σχηματικό διάγραμμα αντλίας θερμότητας νερού σε λειτουργία (α) θέρμανσης και (β) ψύξης [πηγή: Mouzeviris and Papakostas, 2020.].

Η αποτελεσματικότητα μιας ΗΡ είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τον προσδιορισμό της εξοικονόμησης ενέργειας που είναι σε θέση να προσφέρει και μπορεί να παρασταθεί από ένα σύνολο παραμέτρων. Τα πιο συνηθισμένα είναι ο συντελεστής της απόδοσης (COP) στη λειτουργία θέρμανσης και η αναλογία ενεργειακής απόδοσης (EER) στη λειτουργία ψύξης, οι οποίοι ορίζονται από την θερμότητα εξόδου διαιρούμενη με την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου. Οι τιμές των συντελεστών COP και EER είναι στιγμιαίες και μετριοούνται υπό συνθήκες λειτουργίας σε σταθερή κατάσταση σε εργαστηριακό περιβάλλον, σύμφωνα με το EN 14511-3 (European Committee for Standardization), και αντιπροσωπεύουν τις επιδόσεις της ΗΡ σε ένα δεδομένο σύνολο θερμοκρασιακών συνθηκών. Αυτοί οι δείκτες είναι συγκρίσιμοι με την απόδοση σταθερής κατάστασης του πετρελαίου και του αερίου και καθορίζονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$\text{COP} = \frac{\text{Ισχύς θέρμανσης}}{\text{Ηλεκτρική ισχύς εισόδου}} \quad (2.1)$$

$$\text{EER} = \frac{\text{Ισχύς ψύξης}}{\text{Ηλεκτρική ισχύς εισόδου}} \quad (2.2)$$

Ένας διαφορετικός τύπος ορισμού της απόδοσης είναι ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης (SCOP) και ο εποχιακός λόγος ενεργειακής απόδοσης (SEER) για τη λειτουργία θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα, που αντιπροσωπεύουν την ετήσια μέση απόδοση σε εποχιακή βάση. Το SCOP είναι ο λόγος της παραγωγής ενέργειας θέρμανσης (εκφρασμένη σε θερμικό Wh) προς την εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εκφρασμένη σε Wh ηλεκτρικής ενέργειας), ενώ ο SEER είναι ο λόγος της ενέργειας ψύξης εξόδου προς την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου. Οι εποχιακοί συντελεστές υπολογίζονται εξαρτώμενοι από τις κλιματολογικές συνθήκες της τοποθεσίας, το φορτίο θέρμανσης ή ψύξης του κτηρίου, το σύστημα ελέγχου από την HP σε συνδυασμό με το σύστημα θέρμανσης και ψύξης και την τεχνολογία συμπιεστή HP. Οι SCOP και SEER υπολογίζονται σύμφωνα με το EN14825 και καθορίζονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$SCOP = \frac{\text{Ετήσια ενέργεια θέρμανσης [kWh}_{th}]}{\text{Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωση [kWh}_{el}]} \quad (2.3)$$

$$SEER = \frac{\text{Ετήσια ενέργεια ψύξης [kWh}_{th}]}{\text{Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης [kWh}_{el}]} \quad (2.4)$$

Έχουν διεξαχθεί μόνο μερικές μελέτες που δίνουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της αποτελεσματικότητας των αντλιών θερμότητας αέρα – νερού AWHPs και των αντίστοιχων γεωθερμικών GSHPs σε σχέση με το ευρύ φάσμα των ικανοτήτων θέρμανσης και ψύξης, και σε σχέση με την άνοδο της θερμοκρασίας. Οι Staffell et al (2012) παρουσίασαν μια επισκόπηση των υπερσύγχρονων τεχνολογιών αντλιών θερμότητας και υπολόγισαν το μέσο όρο του COP 100 εμπορικών μοντέλων των ASHPs και GSHPs κατά την αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη την HP, με βάση τα δεδομένα των κατασκευαστών και τις δοκιμές πεδίου. Οι Terzić, Šušteršič, και Donović (2018) παρουσίασαν μια ανάλυση διάφορων τύπων γεωθερμικών αντλιών σύμφωνα με το συντελεστή απόδοσής τους (COP) και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από 309 διαφορετικά μοντέλα που προέρχονται από 32 διαφορετικούς κατασκευαστές. Σε μερικές μελέτες τα δεδομένα COP παρουσιάζονται ως ένα μέρος της τεχνοοικονομικής ανάλυσης των συστημάτων αντλίας θερμότητας πηγής αέρα

(ASHP) σε σύγκριση με άλλα συμβατικά συστήματα ή μεταξύ των διάφορων συστημάτων HPs κάτω από μεταβλητές συνθήκες εργασίας.

Πολλές μελέτες διερευνούν τη συμπεριφορά των εποχιακών αποδόσεων των αντλιών θερμότητας αέρα – νερού. Οι Madonna και Bazzocchi (2013) και Naldi, Dongellini και Morini (2015) έχουν δείξει την επίδραση του κλίματος στην απόδοση της αντλίας θερμότητας. Ο Junghans (2015) διερεύνησε τις επιπτώσεις του τοπικού κλίματος και του επιπέδου της μόνωσης των κτηρίων στην εποχιακή απόδοση για τη θέρμανση ενός γεωθερμικού συστήματος αντλίας θερμότητας νερού-αέρα και ενός εξωτερικού συστήματος αντλίας θερμότητας αέρα – αέρα, σε αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες των Ηνωμένων Πολιτειών. Οι Huchtemann και Müller (2013) εξέτασαν την επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στην εποχιακή απόδοση για τη θέρμανση μέσω αντλίας θερμότητας αέρα – νερού. Οι Renaldi, Kiprakis και Friedrich (2017) κατέδειξαν ότι η αντιστοίχιση μιας αντλίας θερμότητας με μια αποθήκευση της θερμικής ενέργειας μειώνει το λειτουργικό κόστος ενός συστήματος. Οι Madonna και Bazzocchi (2013) προσομοίωσαν τη λειτουργία των αντιστρεπτών αντλιών θερμότητας με συμπιεστή μεταβλητής ταχύτητας και κατέδειξαν ότι η εποχιακές αποδόσεις για θέρμανση και ψύξη αυξάνονται εφαρμόζοντας μια στρατηγική αντιστάθμισης του καιρού (ASHRAE, 2020).

## 2.2 Λέβητες

### 2.2.1 Ορισμός και ταξινόμηση λεβήτων

Οι λέβητες είναι δοχεία πίεσης σχεδιασμένα να μεταφέρουν θερμότητα, η οποία παράγεται από την καύση, σε ένα ρευστό. Ο ορισμός επεκτάθηκε για να περιλάβει τη μεταφορά της θερμότητας από την ηλεκτρική αντίσταση των στοιχείων του ρευστού ή με άμεση δράση ηλεκτροδίων στο ρευστό. Στους περισσότερους λέβητες, το υγρό είναι συνήθως νερό με τη μορφή υγρού ή ατμού. Εάν το ρευστό που θερμαίνεται είναι αέρας, η συσκευή ανταλλαγής θερμότητας ονομάζεται φούρνος και όχι λέβητας. Η εστία, ή ο θάλαμος καύσης, σε μερικούς λέβητες ονομάζεται επίσης φούρνος.

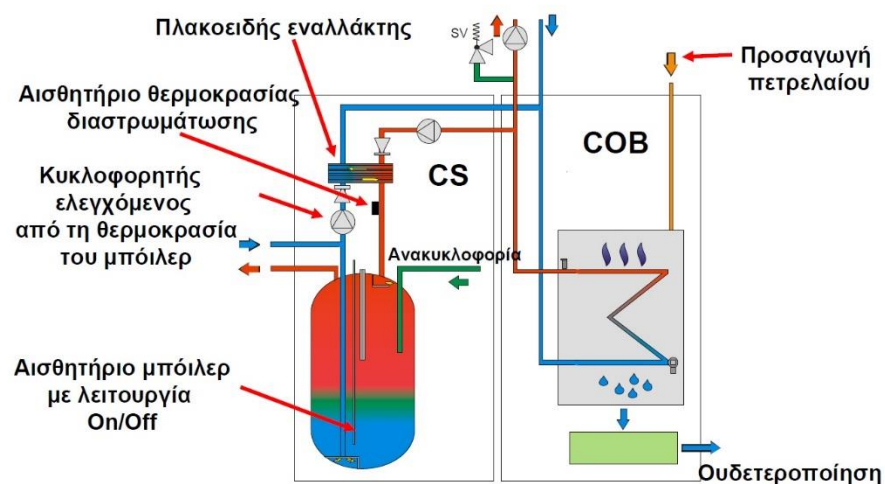
Αποκλείοντας τα ειδικά και ασυνήθιστα ρευστά, υλικά, και μεθόδους, ένας λέβητας μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας εναλλάκτης θερμότητας με δοχείο πίεσης από χαλκό, χυτοσίδηρο ή αλουμίνιο, που είναι σχεδιασμένος για:

1. Καύση ορυκτών καυσίμων (ή χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό ρεύμα).

2. Να μεταφέρει την απελευθερωμένη θερμότητα στο νερό (σε λέβητες νερού) ή σε νερό και ατμό (σε ατμολέβητες).

Διάφοροι κατασκευαστές ορίζουν τα επιτρεπόμενα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας από την άποψη της επιφάνειας θέρμανσης βασιζόμενοι στο συγκεκριμένο σχεδιασμό του λέβητα και τους υλικούς περιορισμούς κάθε φορά. Η κατασκευή ενός λέβητα πρέπει να προβλέπει τις συνδέσεις σε ένα σύστημα σωληνώσεων, το οποίο παραδίδει θερμό ρευστό στο σημείο της χρήσης και επιστρέφει το ψυχρό ρευστό στον λέβητα.

Οι λέβητες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε κατηγορίες με βάση την πίεση και τη θερμοκρασία λειτουργίας, το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, το υλικό κατασκευής, τον τύπο βυθίσματος (φυσικό ή μηχανικό), και αν υπάρχει συμπύκνωση ή όχι. Μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος, την εφαρμογή (π.χ. θέρμανση, διαδικασία), και την κατάσταση του μέσου παραγωγής (ατμός ή νερό). Οι ταξινομήσεις του λέβητα είναι σημαντικές να προσδιορίζονται από τον μηχανικό, επειδή επηρεάζουν την απόδοση, το κόστος και τις απαιτήσεις του χώρου θέρμανσης. Εκτός από λέβητες σχεδιασμένους για παραγγελία, σημαντικές περιγραφές δίνονται στους καταλόγους λεβήτων ή είναι διαθέσιμες από τον κατασκευαστή. Στην συνέχεια περιγράφονται ορισμένες από τις παραμέτρους, σύμφωνα με τις οποίες γίνεται η ταξινόμηση των λεβήτων.



**Σχήμα 2:** Διάταξη Λέβητα πετρελαίου συμπύκνωσης 15 kW [πηγή: chaskos.gr].

## **Πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας**

Ανάλογα με την πίεση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του δοχείου, οι λέβητες μπορούν να χαρακτηριστούν ως χαμηλής και υψηλής πίεσης. Οι λέβητες χαμηλής πίεσης κατασκευάζονται για να δουλεύουν με μέγιστη πίεση ατμού 103 kPa και έως 1100 kPa για λέβητες ζεστού νερού. Οι λέβητες ζεστού νερού περιορίζονται σε θερμοκρασία λειτουργίας 120°C. Τα συστήματα ελέγχου λειτουργίας και ασφάλειας, όπως και οι βαλβίδες χαλάρωσης, οι οποίες περιορίζουν την θερμοκρασία και την πίεση, είναι βοηθητικές συσκευές που απαιτούνται για την προστασία του λέβητα και αποτρέπουν τη λειτουργία πέρα από τα όρια σχεδίου. Οι λέβητες υψηλής πίεσης έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν πάνω από 103 kPa ατμού, ή πάνω από 1100 kPa ή / και 120°C για λέβητες νερού. Ομοίως, απαιτούνται τα συστήματα ελέγχου λειτουργίας και ασφάλειας, όπως και οι βαλβίδες χαλάρωσης. Επιπλέον, η ταξινόμηση μπορεί να εξαρτάται τόσο από την πίεση όσο και από τη θερμοκρασία λειτουργίας, συνεπώς τότε οι λέβητες διακρίνονται σε λέβητες ατμού και νερού. Οι ατμολέβητες είναι γενικά διαθέσιμοι σε τυποποιημένα μεγέθη από 17 kW έως 30 MW, πολλοί από τους οποίους χρησιμοποιούνται για εφαρμογές θέρμανσης χώρου τόσο σε νέα όσο και σε υπάρχοντα συστήματα. Σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, μπορούν επίσης να παρέχουν ατμό για βοηθητικές χρήσεις, όπως για παράδειγμα σε εναλλάκτες θερμότητας ζεστού νερού ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες για ζεστό νερό οικιακής χρήσης. Επιπλέον, πολλοί ατμολέβητες παρέχουν ατμό σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις για μια ευρεία ποικιλία των βιομηχανικών διαδικασιών. Οι λέβητες νερού είναι γενικά διαθέσιμοι σε τυποποιημένα μεγέθη από 10 kW έως και πάνω από 30 MW, πολλοί από τους οποίους ανήκουν στην κατηγορία χαμηλής πίεσης και χρησιμοποιούνται πρωτίστως για τις εφαρμογές θέρμανσης χώρου τόσο σε νέα όσο και σε υπάρχοντα συστήματα. Ορισμένοι λέβητες νερού μπορεί να είναι εξοπλισμένοι με εσωτερικούς ή εξωτερικούς εναλλάκτες θερμότητας για νερό οικιακής χρήσης. Κάθε λέβητας ατμού ή νερού έχει βαθμονομηθεί για μέγιστη πίεση λειτουργίας, η οποία καθορίζεται από τον τρόπο που κατασκευάζεται και τις συνθήκες όπου ελέγχεται η λειτουργία του εκάστοτε λέβητα. Όταν εγκαθίσταται, πρέπει επίσης να εξοπλιστεί ένα ελάχιστο με χειριστήρια λειτουργίας και ασφάλειας και πίεσης / θερμοκρασίας συσκευές ανακούφισης.

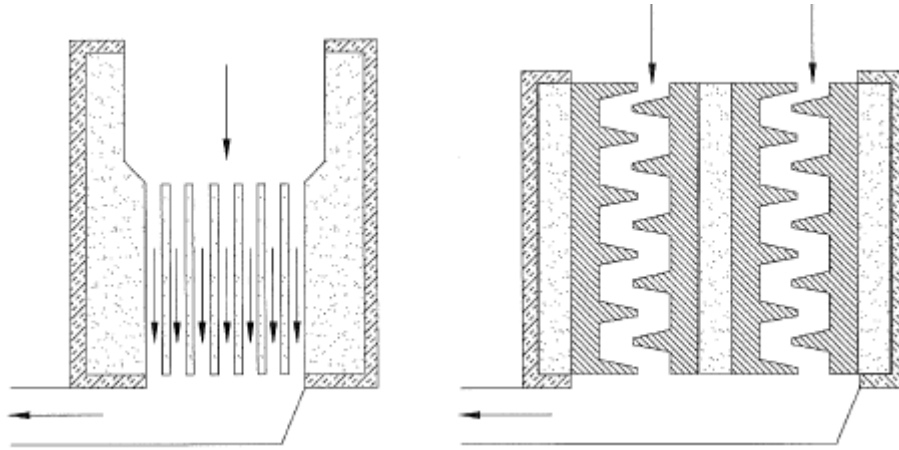
## **Χρησιμοποιούμενο Καύσιμο**

Λέβητες σχεδιάστηκαν για να καίνε κυρίως άνθρακα, ξύλο, διάφορες ποιότητες καύσιμου πετρελαίου ή διάφορους τύπους αέριων καυσίμων, ή για να λειτουργούν ως

ηλεκτρικοί λέβητες. Ένας λέβητας σχεδιασμένος για έναν συγκεκριμένο τύπο καυσίμου μπορεί να μην είναι ικανός να χρησιμοποιήσει άλλο τύπο καυσίμου. Βέβαια, ορισμένοι λέβητες μπορούν να προσαρμοστούν για να καίνε άνθρακα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Διάφοροι τύποι λεβήτων μπορούν να χρησιμοποιήσουν το πετρέλαιο ή το αέριο, και άλλοι επιτρέπουν την πυροδότηση εξοπλισμού καύσης διπλού καυσίμου. Η συνδυαστική καύση διαφορετικών καυσίμων από τον ίδιο λέβητα αποτελεί έναν σημαντικό στόχο των κατασκευαστών. Ένας κατασκευαστής είναι υπεύθυνος για τον σχεδιασμό και την λειτουργία του λέβητα σύμφωνα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται.

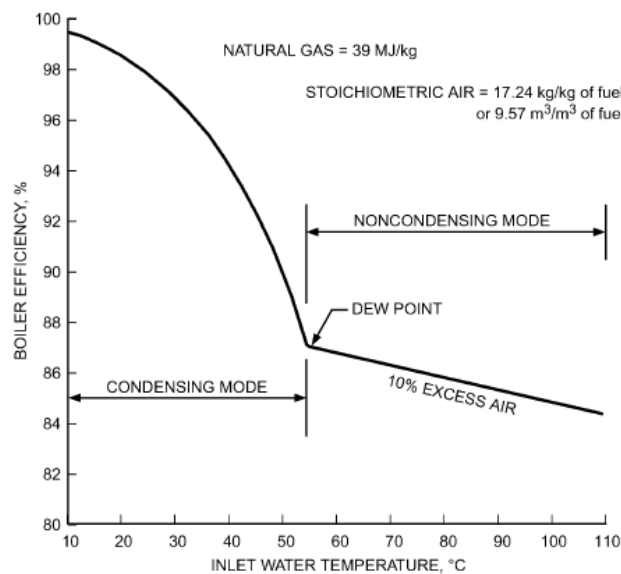
### **Συμπύκνωση ή μη**

Οι παραδοσιακά σχεδιασμένοι λέβητες πρέπει να λειτουργούν χωρίς συμπύκνωση του καυσαερίου στον λέβητα. Αυτή η προφύλαξη ήταν απαραίτητη για την αποτροπή διάβρωσης εξαρτημάτων από χυτοσίδηρο, χάλυβα ή χαλκό. Οι μονάδες ζεστού νερού είναι λειτουργικές στην ελάχιστη θερμοκρασία ύδατος 60°C για να αποτρέπεται η διάβρωση και να μειώνεται η πιθανότητα θερμικού σοκ. Επειδή μια υψηλότερη αποδοτικότητα λεβήτων μπορεί να επιτευχθεί με μια χαμηλότερη θερμοκρασία νερού, ο λέβητας συμπύκνωσης επιτρέπει τη συμπύκνωση του ατμού που προκύπτει. Οι λέβητες πλήρους συμπύκνωσης είναι τώρα διαθέσιμοι από μεγάλο αριθμό κατασκευαστών. Αυτοί οι λέβητες είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να λειτουργούν με τις χαμηλές θερμοκρασίες επιστροφής του νερού που αναπτύσσονται στην επαναφορά ζεστού νερού, στην αντλία θερμότητας νερού, στους δύο-σωλήνες ανεμιστήρα-πηνίου, και στα συστήματα αναθέρμανσης. Δύο τύποι εμπορικών λεβητών συμπύκνωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Το σχήμα 4 δείχνει μια τυπική σχέση της συνολικής απόδοσης του λέβητα συμπύκνωσης για την επιστροφή της θερμοκρασίας του νερού. Το σημείο δρόσου των 55 °C που φαίνεται στο σχήμα ποικίλλει ανάλογα με το ποσοστό υδρογόνου στο καύσιμο και την αναλογία οξυγόνου προς διοξείδιο του άνθρακα, ή την περίσσεια αέρα στα καυσαέρια. Ένας λέβητας συμπύκνωσης φαίνεται στο σχήμα 2. Οι λέβητες συμπύκνωσης μπορεί να είναι τμηματικά σχεδιασμένοι με σωλήνα πυρκαγιάς, σωλήνα νερού, χυτοσίδηρο και χυτό-αργιλίου.



**Σχήμα 3:** Τύποι λεβήτων συμπύκνωσης [πηγή: ASHRAE, 2020].

Οι λέβητες συμπύκνωσης παρέχονται γενικά με υψηλή απόδοση στη διαμόρφωση στους καυστήρες και είναι αποδοτικότεροι από μη συμπυκνωμένους λέβητες σε οποιαδήποτε θερμοκρασία επιστροφής νερού, συμπεριλαμβάνοντας εφαρμογές μη συμπυκνωμένης θερμοκρασίας. Οι αποδοτικότητες των μη συμπυκνωμένων λεβήτων πρέπει να περιορίζονται για να αποφευχθεί πιθανή συμπύκνωση και διάβρωση. Περαιτέρω αποδοτικότητες μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση χαμηλότερης θερμοκρασίας επιστροφής ή υψηλότερου χρόνου παραμονής. Για παράδειγμα, ένας λέβητας συμπύκνωσης φυσικού αερίου που λειτουργεί με 15°C σε εφαρμογή αντλίας θερμότητας νερού έχει δυνητική απόδοση λέβητα άνω του 98%, όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 4.



**Σχήμα 4:** Διαγραμματική απεικόνιση της επίδρασης της θερμοκρασίας εισαγωγής του νερού στην απόδοση των λεβήτων συμπύκνωσης [πηγή: ASHRAE, 2020].

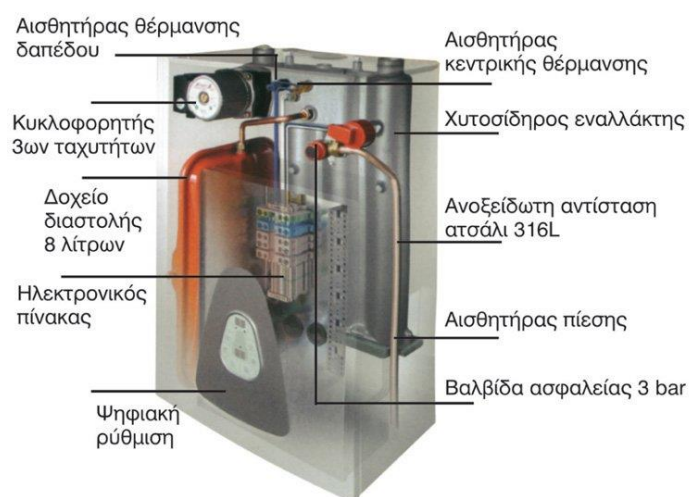


Για μέγιστη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής της κατασκευής, οι λέβητες συμπύκνωσης πρέπει να κατασκευάζονται με αντοχή στη διάβρωση σε όλο τον χώρο καύσης και τον εναλλάκτη θερμότητας.

Η μη συμπυκνωμένη αποδοτικότητα εγκαταστάσεων θερμότητας μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να βελτιωθεί με τη χρήση εξωτερικών οικονομητήρων αέριο – νερό σωλήνων. Το συμπυκνωμένο μέσο μπορεί να περιλαμβάνει το προ θερμασμένο οικιακό ζεστό νερό (DHW), συμπύκνωμα ατμού ή επιστροφή ζεστού νερού, ή άλλες ρευστές πηγές θερμοκρασίας από 20 έως 55°C.

### Ηλεκτρικοί Λέβητες

Οι ηλεκτρικοί λέβητες αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία λέβητα. Καθώς δεν εμφανίζεται καύση, είναι απαραίτητα να υπάρχουν μια επιφάνεια θέρμανσης και σωλήνες εξαερισμού αερίου. Η επιφάνεια θέρμανσης είναι η επιφάνεια με ηλεκτρικά στοιχεία ή ηλεκτρόδια βυθισμένα στο νερό του λέβητα. Ο σχεδιασμός ηλεκτρικού λέβητα καθορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από το σχήμα και το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας των ηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Βιβλιογραφία κατασκευαστών ηλεκτρικών λέβητων περιγράφει το διαθέσιμο μέγεθος, τις μορφές, τις τάσεις, τις εκτιμήσεις, και τις μεθόδους ελέγχου. Στο σχήμα 5 που ακολουθεί φαίνεται ένας πρότυπος ηλεκτρικός λέβητας (ASHRAE, 2020).



**Σχήμα 5:** Διάταξη Μονοφασικού ηλεκτρικού λέβητας 12 kW [πηγή: agelopoulos.gr].

### 2.2.2 Αποδοτικότητα λεβήτων

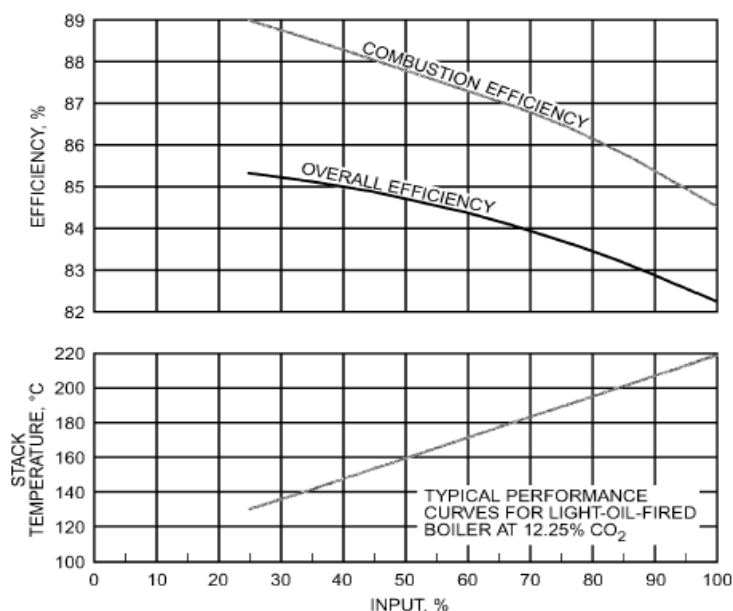
Η απόδοση καύσης καυσίμου των λεβήτων ορίζεται με τρεις τρόπους, την καύση, συνολικά, και εποχιακά. Ωστόσο, οι κατασκευαστές δεν υποχρεούνται να δοκιμάζουν ή να δημοσιεύουν αποδοτικότητες που συμπίπτουν με τους βιομηχανικούς ορισμούς.

Η αποδοτικότητα της καύσης είναι η ενέργεια εισόδου μειωμένη κατά τις απώλειες και διαιρεμένη με την είσοδο, και γενικά κυμαίνεται από 75% έως 86% για τους περισσότερους λέβητες μη συμπύκνωσης. Οι λέβητες συμπύκνωσης λειτουργούν γενικά στο εύρος απόδοσης καύσης 88% έως 95%.

Η συνολική (ή θερμική) απόδοση είναι η ακαθάριστη παραγωγή ενέργειας που διαιρείται με την ενέργεια εισόδου. Η ακαθάριστη παραγωγή μετριέται από την έξοδο ατμού ή νερού από το λέβητα και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Η συνολική απόδοση των ηλεκτρικών λεβήτων είναι γενικά 92% έως 96%. Η συνολική απόδοση είναι χαμηλότερη από την απόδοση καύσης κατά το ποσοστό της θερμότητας να χάνεται από την εξωτερική επιφάνεια του λέβητα (απώλεια ακτινοβολίας). Η συνολική απόδοση μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια μόνο υπό ελεγχόμενη εργαστηριακή δοκιμή, απευθείας μέτρηση της εισόδου καυσίμου και της απορροφούμενης θερμότητας από το νερό ή τον ατμό του λέβητα. Ακριβή δεδομένα αποδοτικότητας γενικά δεν εκτελούνται υπό συνθήκες πεδίου εξαιτίας της αδυναμίας ελέγχου των απαιτούμενων παραμέτρων και το υψηλό κόστος μιας τέτοιας ανάλυσης. Μια κατά προσέγγιση αποδοτικότητα καύσης για τους μη συμπυκνωμένους λέβητες μπορεί να καθοριστεί κάτω από οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων και των ποσοστών CO<sub>2</sub> ή O<sub>2</sub> στο καυσαέριο και με τη διαμόρφωση και ανάγνωση ενός διαγράμματος ή ενός πίνακα για το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Η κατά προσέγγιση αποδοτικότητα της καύσης ενός λέβητα συμπύκνωσης πρέπει να περιλαμβάνει την ενέργεια που μεταφέρεται με συμπύκνωση στο καυσαέριο.

Εποχιακή αποδοτικότητα είναι η πραγματική λειτουργική αποδοτικότητα την οποία ο λέβητας θα επιτύχει κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης σε διάφορα φορτία. Επειδή οι περισσότεροι λέβητες θέρμανσης λειτουργούν με μερικό φορτίο, η αποτελεσματικότητα του μερικού φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών θερμότητας όταν ο λέβητας είναι απενεργοποιημένος, έχει μεγάλη επίδραση στην εποχιακή απόδοση. Η διαφορά στην εποχιακή απόδοση μεταξύ ενός λέβητα με ρυθμό ενεργοποίησης / απενεργοποίησης και ενός με διαμόρφωση του ρυθμού πυροδότησης

μπορεί να είναι αισθητή εάν η ροή αέρα μέσω του λέβητα είναι διαμορφωμένη μαζί με την είσοδο καυσίμου. Το σχήμα 6 δείχνει πώς η απόδοση αυξάνεται με το μερικό φορτίο για έναν τυπικό λέβητα που εξοπλίζεται με έναν καυστήρα που μπορεί να ανάψει με μειωμένες εισαγωγές διαμορφώνοντας ταυτόχρονα και τα καύσιμα και τον αέρα (ASHRAE, 2020).



**Σχήμα 6:** Απόδοση λέβητα ως συνάρτηση των καυσαερίων και του εισαγόμενου αέρα [πηγή: ASHRAE, 2020].

### 2.3 Ηλιακά συστήματα

Ο σχεδιασμός του συστήματος ηλιακής ενέργειας απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη λεπτομέρεια επειδή η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας χαμηλής έντασης, και ο εξοπλισμός για τη συλλογή και τη χρήση της μπορεί να είναι δαπανηρός. Βέβαια, είναι χαρακτηριστικό πως ο εξοπλισμός αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι πανομοιότυπος για πολλές εφαρμογές.

Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν συχνά τα ίδια εξαρτήματα και εξοπλισμό με τα ακόλουθα να είναι τα πιο σημαντικά:

- Συλλέκτες και συστοιχίες συλλεκτών.
- Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.
- Εναλλάκτης θερμότητας.
- Μηχανισμοί ελέγχου.

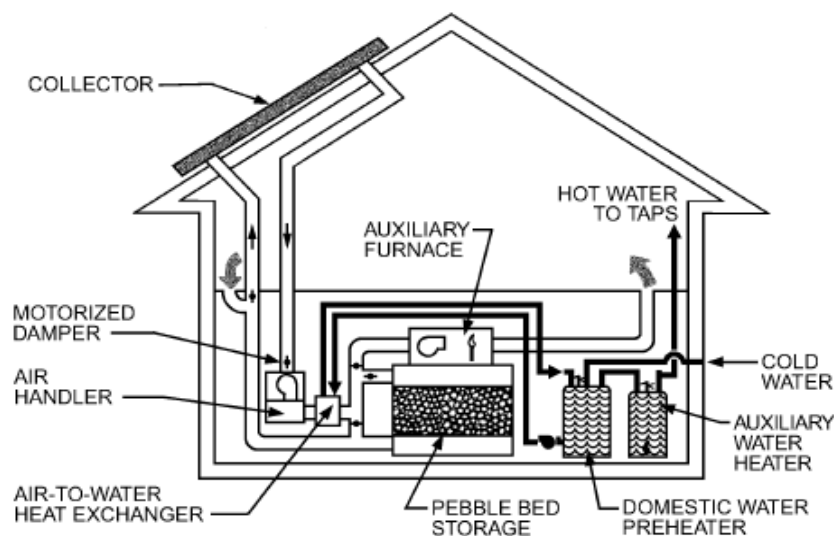
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των δύο βασικότερων τύπων συστημάτων θέρμανσης, που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια. Ο ένας τύπος αφορά την θέρμανση του αέρα, ενώ ο άλλος την θέρμανση του νερού (ASHRAE, 2020).

### 2.3.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα

Τα συστήματα θέρμανσης αέρα κυκλοφορούν αέρα μέσω αγωγών από και προς έναν συλλέκτη θέρμανσης αέρα, όπως παριστάνεται στο σχήμα 7. Τα συστήματα αέρα είναι αποτελεσματικά για τη θερμότητα του χώρου επειδή δεν απαιτείται εναλλάκτης θερμότητας, και θερμοκρασία εισόδου από τον συλλέκτη είναι χαμηλή καθόλη τη διάρκεια της ημέρας (περίπου ίδια με τη θερμοκρασία δωματίου). Τα συστήματα αέρα δεν χρειάζονται προστασία από την ψύξη, την υπερβολική θερμότητα, ή τη διάβρωση. Επιπλέον, η αξιοποίηση του αέρα δεν κοστίζει τίποτα και δεν προκαλεί προβλήματα διαθεσιμότητας ή δομικές καταστροφές. Ωστόσο, οι αεραγωγοί και ο εξοπλισμός διαχείρισης του αέρα απαιτούν περισσότερο χώρο από τους σωλήνες και τις αντλίες, καθώς επίσης οι αγωγοί είναι δύσκολο να σφραγιστούν και οι διαρροές είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Οι ανεμιστήρες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από τις αντλίες ενός υγρού συστήματος, αλλά εάν η μονάδα εγκατασταθεί σε μια εγκατάσταση που χρησιμοποιεί τη διανομή αέρα, μόνο μια μικρή ισχύς επιβαρύνει το κόστος του ηλιακού συστήματος θέρμανσης του χώρου. Η θερμική αποθήκευση συστημάτων θερμού αέρα ήταν επίσης προβληματική λόγω της δυσκολίας στον έλεγχο της υγρασίας και της ανάπτυξης αυξημένης υγρασίας στους χώρους, στους τοίχους και σε άλλες συσκευές, ιδιαίτερα σε υγρά κλίματα.

Τα περισσότερα συστήματα θέρμανσης χώρου με αέρα προθερμαίνουν επίσης το ζεστό νερό οικιακής χρήσης μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας αέρα προς υγρό. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτούνται σφικτά τοποθετημένοι αποσβεστήρες για την αποτροπή του αντίστροφου θερμοσιφωνισμού τη νύχτα, που θα μπορούσε να παγώσει το νερό στη σπείρα των εναλλακτών θερμότητας. Εάν αυτό το σύστημα θερμαίνει μόνο το νερό το καλοκαίρι, η παρασιτική κατανάλωση ενέργειας πρέπει να χρεωθεί ενάντια στο σύστημα ηλιακής ενέργειας επειδή δεν απαιτείται η θέρμανση των χώρων και έτσι τα ενεργειακά αυτά κόστη δεν μπορούν να συσχετιστούν με τα αντίστοιχα κόστη που προκύπτουν από τη συμβατική θέρμανση του νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού θα μπορούσαν να είναι ακριβότερα από τους συμβατικούς θερμοσίφωνες, ιδιαίτερα εάν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι

υψηλό. Για τη μείωση της παρασιτικής κατανάλωσης ισχύος, μερικά συστήματα χρησιμοποιούν την χαμηλότερη ταχύτητα από τις δύο ταχύτητες του ανεμιστήρα (ASHRAE, 2020).



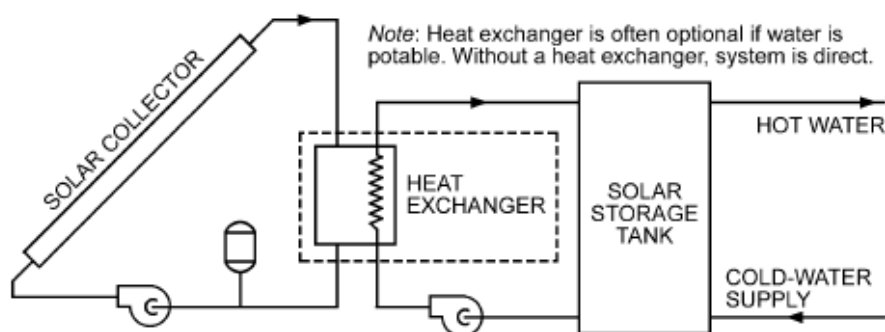
**Σχήμα 7:** Ηλιακό σύστημα θέρμανσης των χώρων και του νερού χρήσης μιας κτηριακής εγκατάστασης [πηγή: ASHRAE, 2020].

### 2.3.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης υγρού

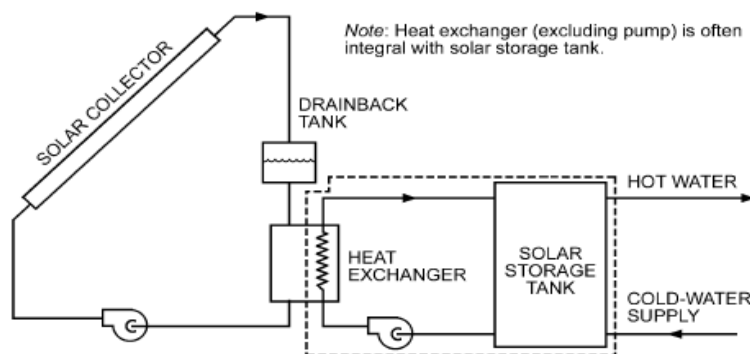
Τα συστήματα θέρμανσης υγρών κυκλοφορούν ένα υγρό, συνήθως το νερό, μέσω ηλιακού συλλέκτη, όπως φαίνεται στα σχήματα 8 και 9. Το υγρό στους ηλιακούς συλλέκτες πρέπει να προστατεύεται από την ψύξη, η οποία θα μπορούσε να καταστρέψει το σύστημα.

Η ψύξη είναι η κύρια αιτία της βλάβης του συστήματος θέρμανσης υγρού, για αυτό το λόγο, η ανοχή παγώματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του υγρού ως εργαζόμενο μέσο που μεταφέρει την θερμότητα, αλλά και του εξοπλισμού στο βρόχο των συλλεκτών. Στις περιπτώσεις όπου οι συνθήκες ψύξης εμφανίζονται σπάνια, τα μικρά ηλιακά συστήματα θέρμανσης συνήθως εξοπλίζονται με συσκευές προστασίας χαμηλού κόστους, οι οποίες λειτουργούν με τη χρήση χειρωνακτικών, ηλεκτρικών, ή / και μηχανικών στοιχείων (π.χ. ηλεκτρονικοί ελεγκτές και αυτόματες βαλβίδες) για την προστασία παγώματος. Λόγω της μεγάλης επένδυσης που συνδέεται με τις περισσότερες εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όσοι σχεδιάζουν και εγκαθιστούν ηλιακά συστήματα πρέπει να μεριμνούν για την παροχή προστασίας παγώματος, ακόμη και στα θερμότερα κλίματα.

Τα θερμοσιφωνικά ηλιακά συστήματα οικιακού ζεστού νερού χρήσης λειτουργούν σε χαμηλές, αυτορυθμιζόμενες ταχύτητες ροής του ρευστού μέσα στον συλλέκτη. Η απόδοσή τους είναι γενικά καλύτερη σε εύκρατα κλίματα σε σχέση με την εγκατάσταση ενεργών συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν μια αντλία για να κυκλοφορήσει το υγρό. Τα θερμοσιφωνικά ηλιακά συστήματα λειτουργούν με συμβατικούς ρυθμούς ροής του ρευστού και είναι παρόμοια με τα συστήματα αντλιών που λειτουργούν, όμως, με χαμηλότερες ροές. Τα θερμοσιφωνικά ηλιακά συστήματα κυριαρχούν στα επαρχιακά κτήρια και στις χαμηλές οικοδομές της Νότιας Ευρώπης, της Κίνας και της Αυστραλίας. Το υγρό εργαζόμενο μέσο στον συλλέκτη ρέει σύμφωνα με την φυσική κυκλοφορία, εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης αντλίας και του ελεγκτή ενός ενεργού συστήματος. Η δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού τοποθετείται πάνω από τον συλλέκτη. Ο ρυθμός ροής ποικίλλει ανάλογα με την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, τις θερμοκρασίες ρευστού, την γεωμετρία συστημάτων και πολλούς ακόμη παράγοντες (ASHRAE, 2020).



**Σχήμα 8:** Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος έμμεσης θέρμανσης του νερού [πηγή: ASHRAE, 2020].



**Σχήμα 9:** Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος έμμεσης θέρμανσης του νερού με δεξαμενή αποστράγγισης [πηγή: ASHRAE, 2020].

## Κεφάλαιο 3: Ζεστό νερό χρήσης σε κτηριακή εγκατάσταση

---

### 3.1 Εισαγωγικές έννοιες ZNX

#### 3.1.1 Θέρμανση νερού οικιακής χρήσης

Η οικιακή θέρμανση νερού είναι η διαδικασία θέρμανσης νερού για προσωπική χρήση και μπορεί να καταναλώσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Στα καναδικά σπίτια, η θέρμανση νερού μπορεί να καταναλώσει το 15-25% της ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ένα σπίτι ανάλογα με τον τύπο του σπιτιού, τον αριθμό των κατοίκων και τον τρόπο ζωής τους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 10 η θέρμανση του νερού έχει αρκετά μεγάλες απαιτήσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες ηλεκτρικές ανάγκες του νοικοκυριού (NRCAN, 2015). Στο ίδιο μοτίβο τοποθετούνται και τα κτήρια στην Ελλάδα, όπως φαίνεται στο σχήμα 11. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι Καναδοί χρησιμοποιούν κατά μέσο όρο 75 λίτρα ζεστού νερού κάθε μέρα για πλύσιμο πιάτων, πλύσιμο ρούχων, καθαρισμό και προσωπική υγιεινή. Αυτός ο όγκος νερού είναι αρκετά υψηλός και η θέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλούς λογαριασμούς ενέργειας (NRCAN, 2015).

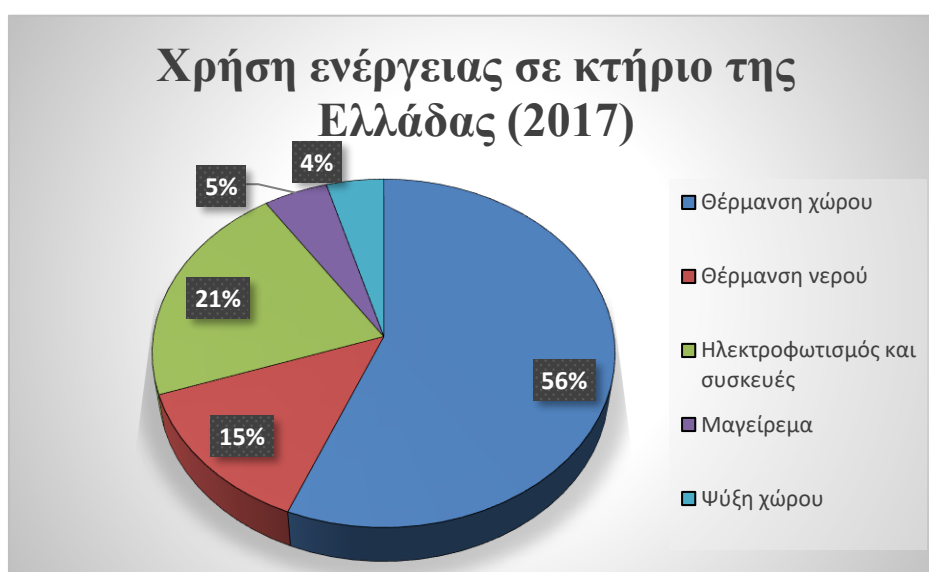
Η πηγή ενέργειας για τους θερμοσίφωνες τείνει να είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι για τη θέρμανση χώρου, αν και αυτό δεν ισχύει πάντα. Πιθανές πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο, το προπάνιο και φυσικά το πετρέλαιο (NRCAN, 2015), με την κάθε πηγή να έχει τα δικά της οφέλη και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες δεν απαιτούν εξαερισμό αλλά δεν μπορούν να λειτουργήσουν κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος και χρησιμοποιούν πολύ περισσότερη πρωτογενή ενέργεια από ότι το φυσικό αέριο. Οι θερμαντήρες που τροφοδοτούνται με φυσικό αέριο απαιτούν επαρκή ροή αέρα και εξαερισμό, αλλά θερμαίνονται πιο γρήγορα και χρησιμοποιούν λιγότερη πρωτογενή ενέργεια. Το προπάνιο έχει παρόμοια οφέλη με το φυσικό αέριο, αλλά το καύσιμο είναι ακριβότερο και απαιτεί προγραμματισμένη αναπλήρωση.

Το κόστος μπορεί να μειωθεί με την επιλογή ενός πιο ενεργειακά αποδοτικού θερμοσίφωνα, τη μείωση της χρησιμοποιούμενης ποσότητας ζεστού νερού ή την εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης θερμότητας νερού αποστράγγισης για τη μείωση του φορτίου θέρμανσης. Αυτές οι συσκευές είναι ουσιαστικά σωλήνες που παίρνουν τη θερμότητα από το χρησιμοποιημένο ζεστό νερό που ρέει κάτω από τις

αποχετεύσεις και το μεταφέρουν για να προθερμάνει το νερό του δικτύου που εισέρχεται στη δεξαμενή του θερμοσίφωνα (NRCAN, 2015). Επίσης, κατά την αγορά ενός θερμοσίφωνα είναι σημαντικό να εξεταστεί η "δεύτερη τιμή" ή το κόστος λειτουργίας του προϊόντος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Μερικές φορές είναι οικονομικώς αποδοτικότερο να αγοραστεί μια ακριβότερη, αλλά ταυτόχρονα και πιο ενεργειακά αποδοτική συσκευή δεδομένου ότι θα αποσβέσει τα χρήματα των χρηστών μακροπρόθεσμα (NRCAN, 2015).



**Σχήμα 10:** Ενεργειακή κατανομή των χρήσεων για την θέρμανση [πηγή: NRCAN, 2015].



**Σχήμα 11:** Ενεργειακή κατανομή των χρήσεων για την θέρμανση [πηγή: Eurostat, 2020].



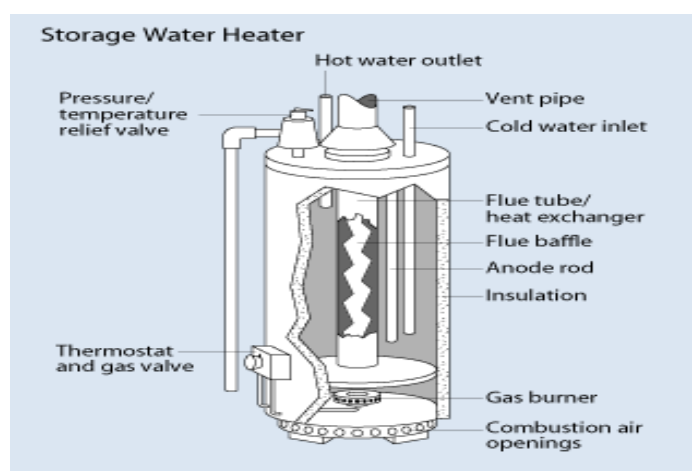
### 3.1.2 Μέθοδοι θέρμανσης νερού

Γενικά, όλοι οι θερμοσίφωνες χρησιμοποιούν κάποιο είδος καυσίμου για ενέργεια. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την αύξηση της θερμοκρασίας του κρύου νερού από το δίκτυο νερού πριν από τη χρήση. Μια μεγάλη ποικιλία από θερμοσίφωνες είναι διαθέσιμη στην αγορά, και μερικά από τα πιο κοινά αναφέρονται παρακάτω. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα, αλλά μερικές φορές συνδυάζονται σε συστήματα (NRCAN, 2015).

#### Θερμοσιφωνική δεξαμενή

Οι θερμοσιφωνικές δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού, όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 12, είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος τύπος θερμοσίφωνα για σπίτια. Σε αυτά τα συστήματα, το θερμαινόμενο νερό συγκρατείται σε μια δεξαμενή έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη μια ορισμένη ποσότητα ζεστού νερού ανά πάσα στιγμή. Όταν ανοίγει μια βρύση για ζεστό νερό, το νερό ρέει από τη δεξαμενή προς τη βρύση. Στη συνέχεια το μη θερμαινόμενο νερό του δικτύου ρέει μέσα στη δεξαμενή για να αντικαταστήσει το χρησιμοποιημένο νερό (NRCAN, 2015). Θερμοστάτες χρησιμοποιούνται στον καυστήρα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού. Αυτοί οι θερμοσίφωνες είναι εξοπλισμένοι με μια βαλβίδα εκτόνωσης θερμοκρασίας και πίεσης για να εξασφαλίσουν ασφάλεια.

Αυτοί οι θερμαντήρες μπορεί να μην είναι και τόσο αποδοτικοί, αλλά μπορούν να γίνουν ενεργειακά αποδοτικότεροι εάν ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας τόσο της δεξαμενής όσο και των ενδιάμεσων σωληνώσεων, καθώς και οι απώλειες εξαιτίας της αναμονής να θερμανθεί το νερό του δικτύου.



**Σχήμα 12:** Δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού σε τομή [πηγή: Wikimedia Commons, 2015].

## **Θερμαντήρες νερού χωρίς δεξαμενή**

Οι θερμαντήρες νερού χωρίς δεξαμενή, όπως υποδηλώνει το όνομά τους, είναι θερμαντήρες που θερμαίνουν το ρέον νερό απευθείας και συνεπώς δεν απαιτούν δεξαμενή αποθήκευσης. Το νερό θερμαίνεται μόνο όταν χρειάζεται, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης εξαλείφοντας τις απώλειες αναμονής. Οι περισσότεροι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες αυτού του τύπου, που λειτουργούν ουσιαστικά κατά παραγγελία, δεν μπορούν να παρέχουν όλο το νερό που απαιτείται για ένα σπίτι, καθιστώντας σπάνια τη χρησιμοποίησή τους. Ωστόσο, αρκετοί θερμαντήρες αερίου χωρίς δεξαμενή μπορούν να παρέχουν αρκετό νερό για να τροφοδοτήσουν τα περισσότερα σπίτια (NRCAN, 2015) και είναι γενικά τοποθετημένοι σε εξωτερικό τοίχο έτσι ώστε να γίνεται καλύτερος εξαερισμός.

## **Θερμοσιφωνικές αντλίες θερμότητας**

Οι θερμοσίφωνες αντλιών θερμότητας (Heat Pump Water Heaters, HPWHs) χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια, παίρνουν θερμότητα από τον αέρα και την μεταδίδουν στο νερό αντί να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια απευθείας σε θερμότητα. Ο αέρας από το δωμάτιο που περιέχει τον θερμαντήρα έχει τη θερμότητα που αφαιρείται από αυτό και μεταφέρεται σε μια δεξαμενή νερού. Ένα πρόβλημα με αυτές τις θερμάστρες είναι ότι εκτός από την αφαίρεση της θερμότητας από τον αέρα, αφαιρούν επίσης την υγρασία του πράγμα το οποίο δυσχεραίνει τις συνθήκες άνεσης. Ωστόσο, αυτή η απομάκρυνση της θερμότητας από το σπίτι το καλοκαίρι μέσω αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι επωφελής. Βέβαια, η θέρμανση του νερού, εκτός από τη θέρμανση και την ψύξη των χώρων, μπορεί να επιτευχθεί και με αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούν την ενέργεια του εδάφους (Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας). Οι αντλίες αυτές αξιοποιούν την θερμοκρασία του εδάφους ή και των υπόγειων υδάτων ως πηγή αξιοποιήσιμης ενέργειας.

## **Ηλιακοί θερμοσίφωνες**

Η ενέργεια του ήλιου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του νερού σε ηλιακά οικιακά συστήματα ζεστού νερού χρήσης. Γενικά αυτά δεν χρησιμοποιούνται από μόνα τους, και αντ' αυτού επιλέγονται για να παρέχουν περίπου το 60% των απαιτήσεων ζεστού νερού του σπιτιού (NRCAN, 2015). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ηλιακούς συλλέκτες, κυκλοφορητική αντλία, καθώς και δεξαμενές

αποθήκευσης του νερού. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως για την προθέρμανση του νερού, χρησιμοποιώντας ένα συμβατικό θερμαντήρα μετά.

### 3.2 Υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων ZNX

Το φορτίο του ζεστού νερού χρήσης αποτελεί ένα μηνιαίο ενεργειακό φορτίο, ανεξαρτήτως θέρμανσης ή ψύξης, και εκφράζει το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των σχετικών αναγκών σε ζεστό νερό. Το φορτίο αυτό εξαρτάται από το πλήθος των ατόμων που σε καθημερινή βάση χρησιμοποιούν νερό, για το οποίο απαιτούν να βρίσκεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ανάλογα με τις ανάγκες τους. Επίσης, το φορτίο του ZNX εξαρτάται και από την θερμοκρασία του νερού δικτύου. Έτσι, για τον υπολογισμό του φορτίου ζεστού νερού χρήσης, γίνεται χρήση της παρακάτω σχέσης που προέρχεται από την τεχνική οδηγία του TOTEE 20701-1 (TEE, 2010):

$$Q_{ZNX} = V_W \cdot N_{day} \cdot \frac{\rho \cdot c}{3600} \cdot (\theta_{w,t} - \theta_{w,i}) \quad (3.1)$$

Όπου

- $Q_{ZNX}$  [kWh]: Το μηνιαίο απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX.
- $V_W$   $\left[ \frac{Lt}{\mu\epsilon\rho\alpha} \right]$ : Η ημερήσια ογκομετρική παροχή του νερού.
- $N_{day,i}$ : Ο αριθμός των ημερών του κάθε μήνα.
- $\rho = 1 \frac{kg}{Lt}$ : Η πυκνότητα του νερού.
- $c = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.
- $\theta_{ZNX,i} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ : Η απαιτούμενη θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης.
- $\theta_{w,i}$ : Η θερμοκρασία του νερού δικτύου της περιοχής για τον κάθε μήνα.

Για την ογκομετρική παροχή του νερού θεωρείται ότι για το κάθε άτομο απαιτούνται 50 Lit νερού ημερησίως. Στην προκειμένη περίπτωση επειδή το κτήριο έχει συνολικό εμβαδό 200τμ, λαμβάνεται υπόψη ότι διαμένουν συνολικά 8 άτομα. Συνεπώς, προκύπτει ότι  $V_W = 400 \left[ \frac{Lt}{\mu\epsilon\rho\alpha} \right]$ .

Η θερμοκρασία του νερού του δικτύου λαμβάνεται τόσο για την κλιματική ζώνη Α όσο και για την ζώνη Δ από τον ΤΟΤΕΕ, όπως ακριβώς αποτυπώνονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί. Λαμβάνονται οι δύο αυτές ακραίες ζώνες για να αποτυπωθούν εμφανέστερα οι ενεργειακές διαφορές εξαιτίας της διαφοροποίησης των κλιματικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, ως πόλη αναφοράς για την ζώνη Α θεωρήθηκε το Ηράκλειο Κρήτης, ενώ για την ζώνη Δ η πόλη της Κοζάνης της Δυτικής Μακεδονίας.

**Πίνακας 3.1:** Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες σε °C του νερού του δικτύου ανά κλιματική ζώνη [πηγή: ΤΕΕ, 2010].

Μήνες	Κλιματική ζώνη			
	Α	Β	Γ	Δ
Ιανουάριος	13.0	10.4	6.5	4.2
Φεβρουάριος	12.8	10.4	7.3	5.0
Μάρτιος	13.8	11.7	9.4	7.5
Απρίλιος	16.3	14.8	13.2	11.5
Μάιος	19.9	18.9	17.6	15.7
Ιούνιος	23.8	23.1	21.9	19.8
Ιούλιος	26.2	25.6	24.3	22.2
Αύγουστος	26.6	25.8	24,6	22.7
Σεπτέμβριος	24.9	23.5	22.0	20.2
Οκτώβριος	21.7	19.7	17.7	15.9
Νοέμβριος	18.1	15.5	12.7	10.8
Δεκέμβριος	14.8	12.2	8.6	6.6

Στη συνέχεια, φαίνεται ο πίνακας (Πίνακας 3.2) όπου παρουσιάζονται οι τιμές των μηνιαίων απαιτούμενων φορτίων για ZNX, ανάλογα με τις μέσες θερμοκρασίες του νερού του δικτύου για κάθε μήνα, αλλά και τον αριθμό των ημερών του κάθε μήνα για τις δύο κλιματικές ζώνες Α και Δ. Να σημειωθεί πως η επιθυμητή θερμοκρασία του ZNX είναι σταθερή για ολόκληρο το έτος και θεωρείται ικανοποιητική στους 45 °C, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

**Πίνακας 3.2:** Υπολογισμός μηνιαίων ενεργειακών φορτίων ζήτησης ZNX για κάθε μήνα.

Μήνες	Μέρες	Κλιματική ζώνη Α		Κλιματική ζώνη Δ	
		$\theta_{w,i}$ °C	$Q_{dem,ZNX}$ (kWh)	$\theta_{w,i}$ °C	$Q_{dem,ZNX}$ (kWh)
Ιανουάριος	31	13.0	459.35	4.2	585.67
Φεβρουάριος	28	12.8	417.49	5	518.62
Μάρτιος	31	13.8	447.86	7.5	538.29
Απρίλιος	30	16.3	398.69	11.5	465.37
Μάιος	31	19.9	360.3	15.7	420.59
Ιούνιος	30	23.8	294.5	19.8	350.07
Ιούλιος	31	26.2	269.87	22.2	327.28
Αύγουστος	31	26.6	264.12	22.7	320.11
Σεπτέμβριος	30	24.9	279.22	20.2	344.51
Οκτώβριος	31	21.7	334.46	15.9	417.72
Νοέμβριος	30	18.1	373.68	10.8	475.09
Δεκέμβριος	31	14.8	433.51	6.6	551.22

Οι παραπάνω τιμές των απαιτούμενων μηνιαίων ενεργειακών φορτίων για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX μπορούν να αναχθούν τόσο σε ημερήσιες όσο και σε ωριαίες τιμές, διαιρώντας τις παραπάνω τιμές με τον αριθμό των ημερών του κάθε μήνα

αλλά και των ωρών τις κάθε ημέρας. Έτσι, στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι ημερήσιες και ωριαίες ενεργειακές απαιτήσεις, με σημαντική παρατήρηση ότι οι τιμές αυτές είναι κοινές για κάθε μέρα του μήνα αλλά και για κάθε ώρα της ημέρας, και ως εκ τούτου αναγράφεται μια τιμή στον εκάστοτε μήνα.

**Πίνακας 3.3:** Απαιτούμενα ενεργειακά φορτία ZNX σε ημερήσιο και ωριαίο επίπεδο για κάθε μήνα.

$Q_{dem}(kWh)$	Κλιματική ζώνη Α		Κλιματική ζώνη Δ	
	Ημερήσιο	Ωριαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο
Μήνες				
Ιανουάριος	14.82	0.62	18.89	0.79
Φεβρουάριος	14.91	0.62	18.52	0.77
Μάρτιος	14.45	0.6	17.36	0.72
Απρίλιος	13.29	0.55	15.51	0.65
Μάιος	11.62	0.48	13.57	0.57
Ιούνιος	9.82	0.41	11.69	0.49
Ιούλιος	8.71	0.36	10.56	0.44
Αύγουστος	8.52	0.36	10.33	0.43
Σεπτέμβριος	9.31	0.39	11.48	0.48
Οκτώβριος	10.79	0.45	13.473	0.56
Νοέμβριος	12.46	0.52	15.84	0.66
Δεκέμβριος	13.98	0.58	17.78	0.74

### 3.3 Υπολογισμός καταναλώσεων και κόστους ενέργειας και περιβάλλοντος για τα συστήματα ZNX

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά σε ορισμένα ενεργειακά συστήματα που θα χρησιμοποιηθούν στην μελέτη της εργασίας αυτής, για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες για ZNX σε κτηριακή εγκατάσταση 200τ.μ. Για κάθε σύστημα αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους όπως για παράδειγμα ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των καταναλώσεων, και τα χρηματικά κόστη που απαιτούνται να καταβληθούν. Τα κόστη αυτά μπορούν να κατανεμηθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Τα ενεργειακά κόστη, τα οποία αφορούν τα χρηματικά ποσά που πρέπει να καταβάλλονται από τον χρήστη ώστε να αγοράζονται οι απαραίτητες πρώτες ύλες που απαιτούνται για κάθε σύστημα και να θερμαίνεται το νερό χρήσης. Συνεπώς, οι τιμές τους δίδονται ως τιμές χρηματικών μονάδων ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας, δηλαδή  $/kWh$ .
2. Τα κόστη εγκατάστασης, τα οποία αφορούν τα χρηματικά ποσά που πρέπει να καταβάλλονται για την αγορά και την εγκατάσταση των ενεργειακών συστημάτων. Τα κόστη αυτά καταχωρούνται ως χρηματικές μονάδες ανά μονάδα ισχύος για το κάθε σύστημα, δηλαδή σε ευρώ/kW.
3. Τα περιβαλλοντικά κόστη αποτελούν έναν σημαντικό παράγοντα για την χρησιμοποίηση των ενεργειακών συστημάτων στα κτήρια τα τελευταία χρόνια. Τα κόστη αυτά ποσοτικοποιούν τις επιβαρύνσεις που δέχεται το περιβάλλον εξαιτίας της έκλυσης ποσοτήτων CO<sub>2</sub>, έτσι χρησιμοποιούνται τιμές ευρώ ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας, όπου συνυπολογίζονται οι εκλυόμενες ποσότητες CO<sub>2</sub> σύμφωνα με στοιχεία από διάφορες μελέτες.

#### 3.3.1 Λέβητας πετρελαίου

Ο λέβητας πετρελαίου αποτελεί ένα ενεργειακό σύστημα που χρησιμοποιείται κυρίως για την θέρμανση εσωτερικών χώρων κατά την χειμερινή περίοδο. Βέβαια, πολλές είναι και οι περιπτώσεις που χρησιμοποιείται για την θέρμανση και του ζεστού νερού, γι' αυτό συμπεριλήφθηκε στην μελέτη της εργασίας αυτής. Σνηθέστερη περίπτωση αποτελεί η χρήση του λέβητα πετρελαίου για τη θέρμανση τόσο των χώρων όσο και του νερού, και αυτό επιτυγχάνεται με την καύση του καύσιμου πετρελαίου θερμαίνοντας, μέσω εναλλάκτη θερμότητας το νερό χρήσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο βαθμός απόδοσης του λέβητα πετρελαίου μπορεί να θεωρηθεί

σταθερός καθόλη τη διάρκεια του έτους. Στην προκειμένη περίπτωση η τιμή του λήφθηκε ως  $n_{bl} = 0.8$ , ο οποίος περιλαμβάνει μόνο τις απώλειες της εγκατάστασης. Με βάση τον βαθμό απόδοσης μπορούν να υπολογιστούν και οι ενεργειακές καταναλώσεις του συστήματος, ώστε να καλυφθούν πλήρως οι απαιτήσεις σε ZNX και αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας τα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία με τον βαθμό απόδοσης. Έτσι, προκύπτουν οι μηνιαίες, οι ημερήσιες και οι ωριαίες καταναλώσεις για τις δύο κλιματικές ζώνες και αποτυπώνονται στον πίνακα Π.1.1 του παραρτήματος.

Επιπρόσθετα, είναι χρήσιμο να αποτυπωθούν η διάρκεια ζωής του συστήματος, η οποία μπορεί να θεωρηθεί στα 20 έτη, αλλά και τα χρηματικά κόστη που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου σε ZNX, ανάλογα με τις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι τιμές του κόστους βασίστηκαν σε έρευνα αγοράς για τυπικά συστήματα, καθώς και σε τρέχουσες τιμές ενέργειας των παρόχων ή προμηθευτών. Συνεπώς, για το πετρέλαιο λήφθηκαν οι τιμές:

**Πίνακας 3.4:** Κόστη λέβητα πετρελαίου.

Κόστος	Ενεργειακό	Εγκατάστασης	Περιβαλλοντικό
	$cost_{bl} = 0,1 \text{ €/kWh}$  $cost_{bl}^* = 0,025 \text{ €}$ $\text{/kWh}$	$inct_{bl} = 100 \text{ €/kW}$	$env_{bl} = 0,04 \text{ €/kWh}$

Η τιμή του ενεργειακού κόστους με το \* αφορά σε μια μείωση της τιμής του πετρελαίου θέρμανσης κατά τους μήνες Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο του έτους.

Με βάση τις μοναδιαίες τιμές ενεργειακού και περιβαλλοντικού κόστους που ορίστηκαν παραπάνω, μπορούν να υπολογιστούν τα ωριαία κόστη για τις δύο κλιματικές ζώνες, με τον πολλαπλασιασμό των τιμών αυτών με τα φορτία των ενεργειακών καταναλώσεων. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα Π.2.1 του παραρτήματος.

### 3.3.2 Λέβητας βιομάζας

Οι λέβητες βιομάζας, αποτελούν μία ελκυστική εναλλακτική λύση έναντι των λεβήτων ορυκτών καυσίμων. Η βιομάζα παρέχει άνεση και οικονομία ενώ ταυτόχρονα



είναι και φιλική προς το περιβάλλον. Είναι απόλυτα φυσικό προϊόν καθώς παράγεται από φυτικά υπολείμματα και δεν χρειάζεται να προστίθενται άλλες χημικές ουσίες. Είναι ουδέτερη ως προς την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα καθώς όσο προστίθεται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση της, δεσμεύεται κατά την ανάπτυξη των φυτών. Το ενεργειακό αυτό σύστημα χρησιμοποιείται πολλά χρόνια από πολλές κτηριακές εγκαταστάσεις κυρίως για τη θέρμανση των χώρων αλλά και σε αρκετές περιπτώσεις συνδυάζεται και η θέρμανση του νερού χρήσης. Η λειτουργία του είναι όμοια με αυτή του λέβητα πετρελαίου, με τη διαφορά στην καύσιμη πρώτη ύλη, όπου στην περίπτωση της βιομάζας μπορεί να είναι ξύλο, πριονίδι (pellet), βιοαιθανόλη ή διάφορα ενεργειακά φυτά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο βαθμός απόδοσης του λέβητα βιομάζας μπορεί να θεωρηθεί σταθερός καθόλη τη διάρκεια του έτους. Στην προκειμένη περίπτωση η τιμή του λήφθηκε ως  $n_{wd} = 0,9$ , ο οποίος περιλαμβάνει μόνο τις απώλειες της εγκατάστασης. Όπως έγινε και στην περίπτωση του πετρελαίου με βάση τον βαθμό απόδοσης μπορούν να υπολογιστούν και οι ενεργειακές καταναλώσεις του συστήματος. Έτσι, προκύπτουν οι μηνιαίες, οι ημερήσιες και οι ωριαίες καταναλώσεις για τις δύο κλιματικές ζώνες και αποτυπώνονται στον πίνακα Π.1.2 του παραρτήματος.

Επιπρόσθετα, όμοια με την περίπτωση του πετρελαίου, ορίζονται και εδώ η διάρκεια ζωής του συστήματος στα 15 έτη, αλλά και τα χρηματικά κόστη που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου σε ZNX. Συνεπώς, για την βιομάζα λήφθηκαν οι τιμές του πίνακα που ακολουθεί, σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζονται και τα ωριαία κόστη μιας μέρας για τον κάθε μήνα, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα Π.2.2 του παραρτήματος.

**Πίνακας 3.5:** Κόστη λέβητα βιομάζας.

Κόστος	Ενεργειακό	Εγκατάστασης	Περιβαλλοντικό
	$cost_{bl} = 0,04 \text{ €}$ /kWh	$inct_{bl} = 250 \text{ €/kW}$	$env_{bl} = 0,0367 \text{ €}$ /kWh

### 3.3.3 Θερμοσίφωνα ηλεκτρικής αντίστασης

Ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνα είναι η συσκευή που παρέχει ζεστό νερό χρησιμοποιώντας την ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος με αντιστάσεις. Πιο αναλυτικά ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνα είναι ένα δοχείο σε κυλινδρικό σχήμα, αποτελούμενο από διπλά θερμομονωμένα τοιχώματα και θερμομαντικό σώμα που βρίσκεται στο μέσο του δοχείου. Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας θερμαίνει αυτό το θερμομαντικό σώμα, το οποίο με τη σειρά του θερμαίνει το νερό, μέσα στον κύλινδρο. Ο θερμοσίφωνα είναι συνδεδεμένος με την παροχή νερού και για κάθε ποσότητα θερμού νερού που αντλείται για χρήση, υπάρχει αυτόματη αναπλήρωση με ψυχρό νερό. Πολλοί είναι οι παράγοντες που συντελούν στη φθορά ενός ηλεκτρικού θερμοσίφωνα. Η ποιότητα του νερού είναι ένας απ' αυτούς, καθώς και η ύπαρξη αλάτων μπορεί να επιταχύνει τις φθορές. Επιπλέον η συχνότητα χρήσης και οι χάλκινες σωληνώσεις που φθείρουν το μέταλλο του θερμοσίφωνα, μειώνουν τη διάρκεια ζωής του. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος που καταστρέφονται οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνα μετά από μερικά χρόνια χρήσης, είναι να τρυπήσουν εσωτερικά, οπότε και δεν μπορούν να επιδιορθωθούν. Συχνά παρουσιάζονται βλάβες στην αντίσταση ή στο θερμοστάτη του θερμοσίφωνα. Άλλες φορές πάλι η κακή λειτουργία στο μπόιλερ του θερμοσίφωνα δημιουργεί προβλήματα στη θέρμανση νερού. Δεδομένων όλων αυτών των τεχνικών χαρακτηριστικών στα ευπαθή τους μέρη, οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνα κυμαίνονται σε πολύ διαφορετικές τιμές. Πρέπει να γίνεται προσεκτική χρήση του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα με τη βοήθεια χρονοδιακόπτη, που μπορεί να περιορίσει εξαιρετικά την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά και να προφυλάξει το θερμοσίφωνα από επιπλέον φθορές. Παρόλα αυτά, πολλές κτηριακές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν αυτά τα συστήματα για να καλύψουν τις ανάγκες σε ZNX, και αυτός είναι ο λόγος που εισήχθη στην μελέτη αυτή, ώστε να διαπιστωθεί εάν συμφέρει η χρήση του. Για την εύρεση των ενεργειακών καταναλώσεων αυτού του συστήματος, θεωρήθηκε ότι ο βαθμός απόδοσής του είναι  $n_{el} = 0,95$ . Στον πίνακα Π.1.3 του παραρτήματος αποτυπώνονται οι καταναλώσεις αυτές σε μηνιαία, ημερήσια και ωριαία βάση.

Για το σύστημα αυτό θεωρήθηκε μια διάρκεια ζωής στα 15 έτη και στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα μοναδιαία ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη, οι τιμές των οποίων προέρχονται από έρευνα αγοράς τυπικών συστημάτων.

**Πίνακας 3.6:** Κόστη ηλεκτρικού θερμοσίφωνα.

Κόστος	Ενεργειακό	Εγκατάστασης	Περιβαλλοντικό
	$cost_{el} = 0,1 \text{ €/kWh}$ $cost_{el}^* = 0,05 \text{ €}$ $\text{/kWh}$	$inct_{el} = 100 \text{ €/kW}$	$env_{el} = 0,065 \text{ €/kWh}$

Η τιμή του ενεργειακού κόστους με το \* αφορά σε μια μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στην έκπτωση που δίδεται κατά το νυκτερινό τιμολόγιο. Πιο συγκεκριμένα, η έκπτωση αυτή εφαρμόζεται σε διαφορετικές ώρες ανάλογα με το εάν ο μήνας εμπίπτει στην θερινή ή χειμερινή περίοδο του έτους. Έτσι, η τιμή 0,05 €/kWh αφορά την χειμερινή περίοδο (1/11 έως 30/4) τις ώρες 02:00-08:00, αλλά και την καλοκαιρινή περίοδο (1/5 έως 31/10) τις ώρες 23:00-07:00.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη για κάθε ώρα του κάθε μήνα, όπως αυτά υπολογίστηκαν με το γινόμενο των καταναλώσεων επί των μοναδιαίων ενεργειακών κοστών. Στο παράρτημα ο πίνακας Π.2.3 αφορά τα κόστη χωρίς την έκπτωση του νυκτερινού τιμολογίου, ενώ στον πίνακα Π.2.4 απεικονίζονται οι τιμές του ενεργειακού κόστους με βάση την τιμή του νυκτερινού ωραρίου, κατά τις ώρες και μήνες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

### 3.3.4 Ηλεκτρική αντλία θερμότητας

Η αντλία θερμότητας αποτελεί ένα σύστημα που χρησιμοποιείται κυρίως για την θέρμανση και την ψύξη των χώρων. Λειτουργούν ως θερμικές μηχανές με αντίστροφο τρόπο καθώς χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια για να θερμάνουν ή να ψύξουν τον αέρα ή το νερό. Πιο αναλυτικά, ο εξωτερικός αέρας ωθείται μέσω ενός ανεμιστήρα στην αντλία θερμότητας όπου συναντά τον εξατμιστή. Αυτός είναι συνδεδεμένος σε ένα κλειστό σύστημα που περιέχει ένα ψυκτικό μέσο που μπορεί να μετατραπεί σε αέριο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Όταν ο εξωτερικός αέρας χτυπά το εξατμιστή το ψυκτικό μέσο μετατρέπεται σε αέριο. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ένα συμπιεστή, το αέριο φτάνει σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία στην οποία μπορεί να μεταφερθεί στο συμπυκνωτή του συστήματος θέρμανσης του σπιτιού. Ταυτόχρονα, το ψυκτικό μέσο με τη βοήθεια του συμπυκνωτή επανέρχεται στην υγρή μορφή, έτοιμο να μετατραπεί σε αέριο για άλλη μια φορά και να συλλέξει νέα θερμότητα. Έχουν εισβάλει στην καθημερινότητα του ανθρώπου τις τελευταίες δεκαετίες και γι' αυτό το

λόγο έχουν μελετηθεί στην εργασία αυτή. Ωστόσο, ο βαθμός απόδοσής τους δεν παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια του έτους αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα. Για τον λόγο αυτό ελήφθησαν θερμοκρασιακά δεδομένα για τις πόλεις Ηράκλειο και Κοζάνη, που είναι αντιπροσωπευτικές για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ αντίστοιχα.

Αρχικά, λαμβάνονται από την τεχνική οδηγία TOTEE 20701-3 (2017) του Κ.Εν.Α.Κ. η μέγιστη και η ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου για το Ηράκλειο και την Κοζάνη, οι οποίες ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης. Οι τιμές αυτές αποτελούν τον μέσο όρο των ημερήσιων μέγιστων ή ελάχιστων θερμοκρασιών του κάθε μήνα που έχουν ληφθεί από μια πλειάδα ετών. Οι μέσες τιμές της τεχνικής αυτής οδηγίας υπολογίζονται σύμφωνα με τα πρότυπα του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (W.M.O), τα οποία αναφέρονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 15927-5:2005 (ΕΛΟΤ, 2005). Επιπλέον, υπολογίζεται και η αντίστοιχη διακύμανση των θερμοκρασιών (DR), ως η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας 24ώρου του κάθε μήνα. Στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι θερμοκρασίες αυτές.

**Πίνακας 3.7:** Μέσες ανά μήνα ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες και μηνιαίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις [πηγή: TOTEE 20701-3, 2010].

Μήνες	Θερμοκρασίες Ηράκλειου			Θερμοκρασίες Κοζάνης		
	$T_{min}$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	DR	$T_{min}$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	DR
Ιανουάριος	9.1	15.2	6.1	-1.2	6.1	7.3
Φεβρουάριος	9	15.5	6.5	-0,5	8	8.5
Μάρτιος	9.7	16.8	7.1	1.8	11.4	9.6

Απρίλιος	11.9	20.1	8.2	5.2	16.3	11.1
Μάιος	15.1	23.5	8.4	9.5	21.7	12.2
Ιούνιος	19.1	27.3	8.2	13.2	26.5	13.3
Ιούλιος	21.7	28.8	7.1	15.7	29.3	13.6
Αύγουστος	21.9	28.6	6.7	15.7	29.2	13.5
Σεπτέμβριος	19.4	26.6	7.1	12.5	25	12.5
Οκτώβριος	16.6	23.4	6.8	8.1	18.8	10.7
Νοέμβριος	13.5	20.1	6.6	3.9	12.7	8.8
Δεκέμβριος	10.8	17	6.2	0.4	8	7.6

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται ότι οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στην πόλη της Κοζάνης είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του Ηρακλείου, εξαιτίας των χαμηλότερων ελάχιστων θερμοκρασιών της Κοζάνης, αλλά και των υψηλότερων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών του Ηράκλειου.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ωριαίες τιμές των θερμοκρασιών σύμφωνα με την σχέση 3.2, που ακολουθεί. Στην σχέση αυτή οι τιμές υπολογίζονται ως μια μεταβολή σε σχέση με την μέγιστη θερμοκρασία όπου τα ποσοστά μεταβολής της θερμοκρασίας ανά ώρα, όπως αυτά αναγράφονται στον πίνακα 3.8 που παρουσιάζεται παρακάτω, και με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν.

$$T_{o,t} = T_{o,max} - (P\%) \cdot DR \quad (3.2)$$

Όπου

- $T_{o,t}$ : Οι ωριαίες θερμοκρασίες.
- $T_{o,max}$ : Η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου για τον κάθε μήνα (Πίνακας 3.7).
- $P\%$ : Το ποσοστό μεταβολής της θερμοκρασίας ανά ώρα (Πίνακας 3.8).
- $DR$ : Η μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας 24ώρου (Πίνακας 3.7).

**Πίνακας 3.8:** Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας ανά ώρα μέσα στην ημέρα [πηγή: Μπούρης].

Ωρα	P%	Ωρα	P%	Ωρα	P%	Ωρα	P%
1	87	7	93	13	11	19	34
2	92	8	84	14	3	20	47
3	96	9	71	15	0	21	58
4	99	10	56	16	3	22	68
5	100	11	39	17	10	23	76
6	98	12	23	18	21	24	82

Εφαρμόζοντας την εξίσωση 3.2 προκύπτουν τελικά οι ωριαίες θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα για τις δύο πόλεις των ζωνών Α και Δ.

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι βαθμοί απόδοσης COP για μια αντλία θερμότητας αέρα νερού για κάθε ώρα και για όλους τους μήνες του έτους. Αυτό γίνεται σύμφωνα με τη σχέση 3.3 που ακολουθεί, όπου υπολογίζει τον μέσο COP ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος με την θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου δηλαδή του νερού. Στην προκειμένη περίπτωση θερμοκρασία του νερού θεωρείται στους 50°C. Η συνάρτηση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη προέκυψε μέσω αριθμητικής παλινδρόμησης των μέσων όρων των COP 308 αντλιών θερμότητας, οι οποίες λειτουργούσαν σε διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη (Mouzeviris and Papakostas, 2020).

$$COP = 0,001 \cdot \Delta T^2 - 0,1534 \cdot \Delta T + 7,3775 \quad (3.3)$$

Στους πίνακες Π.4.1 και Π.4.2 του παραρτήματος παριστάνονται οι τιμές του COP, όπως υπολογίζονται σύμφωνα με την παραπάνω σχέση και με τις τιμές των ωριαίων θερμοκρασιών.

Ακολουθως υπολογίζονται, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι ενεργειακές καταναλώσεις, σύμφωνα με τις τιμές του κόστους ανά μονάδα ενέργειας, οι οποίες είναι ακριβώς ίδιες με τις τιμές του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα, αφού καταναλώνουν ηλεκτρικό ρεύμα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους πίνακες Π.1.4 και Π.1.5 του παραρτήματος. Τέλος, παρουσιάζονται τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη στους πίνακες Π.2.5 και Π.2.6 στο αντίστοιχο μέρος του παραρτήματος, σύμφωνα με τα κόστη του παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.9:** Κόστη ηλεκτρικής αντλίας θερμότητας.

Κόστος	Ενεργειακό	Εγκατάστασης	Περιβαλλοντικό
	$cost_{el} = 0,1 \text{ €/kWh}$ $cost_{el}^*$ $= 0,05 \text{ €/kWh}$	$inct_{el} = 100 \text{ €/kW}$	$env_{el} = 0,065 \text{ €/kWh}$

### 3.3.5 Ηλιακός θερμοσίφοντας

Ο ηλιακός θερμοσίφοντας είναι μια συσκευή που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια, η οποία παρέχεται αέναα και αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, σε θερμική μέσω ηλιακών συλλεκτών. Έτσι, αξιοποιείται η ηλιακή ακτινοβολία και μπορεί να παρέχεται στο κτήριο ζεστό νερό. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες είναι απλές και αρκετά αποδοτικές συσκευές που εξασφαλίζουν την μείωση των καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλοντας συνάμα στην μείωση των ρύπων που εκλύονται στο περιβάλλον. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλιακών θερμοσιφώνων, οι ανοιχτού και κλειστού κυκλώματος. Οι πρώτοι θερμαίνουν το νερό απευθείας, είναι οικονομικότεροι και παρουσιάζουν λειτουργικά προβλήματα διότι δεν χρησιμοποιούν αντιψυκτικά, ενώ οι δεύτεροι χρησιμοποιούν εναλλάκτη θερμότητας. Η διαστασιολόγηση του συστήματος αυτού γίνεται με βάση την επιφάνεια των συλλεκτών που είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν για να καλύπτονται οι ανάγκες σε ZNX. Έτσι, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$A_{sol} = \frac{E_{solHW}}{CF_{sol} \cdot H_{sol}} = \frac{Q_{dem,sol}}{CF_{sol} \cdot H_{sol}} \quad (3.4)$$

Όπου

- $E_{solHW}$  [kWh]: Ωφέλιμη ενέργεια από τον συλλέκτη, που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που καταναλώνει ο συλλέκτης για ΖΝΧ.
- $CF_{sol} = 0,4$ : Ο συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη.
- $A_{sol}$  [ $m^2$ ]: Η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη.
- $H_{sol}$  [ $\frac{kWh}{m^2}$ ]: Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μηνιαία βάση.

Ο συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας από θερμικό συλλέκτη ορίζεται από το πηλίκο της ωφέλιμης ενέργειας από τον συλλέκτη ( $Q_{sol,sys}$ ) προς την διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια πάνω στον συλλέκτη ( $Q_{av,sys}$ ).

$$CF_{sol} = \frac{Q_{sol,sys}}{Q_{av,sys}} = \frac{Q_{sol,sys}}{A_{sol} \cdot H_{sol}} \quad (3.5)$$

Στην προκειμένη περίπτωση, λαμβάνονται τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα και για τις δύο κλιματικές ζώνες από τον TOTEE 20701-3 (2017) και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 3.10:** Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο ( $kWh/m^2$ ) [πηγή: TOTEE 20701-3, 2010].

Μήνες	Κλιματική ζώνη Α	Κλιματική ζώνη Δ
Ιανουάριος	65.6	57.6
Φεβρουάριος	81.6	71.3
Μάρτιος	125	111.2
Απρίλιος	166.5	141.1
Μάιος	207.3	173.6
Ιούνιος	222.4	201.8
Ιούλιος	227.1	206.3
Αύγουστος	207	185.5



Σεπτέμβριος	163	138.5
Οκτώβριος	117.3	97
Νοέμβριος	78.6	60
Δεκέμβριος	61.2	47.7

Ακολουθώς, και σύμφωνα με την σχέση 3.4 υπολογίζονται οι επιφάνειες των συλλεκτών ανά μήνα, έπειτα οι τιμές αυτές ανάγονται σε χρηματικά κόστη με βάση τις τιμές του πίνακα 3.11 όπου αναγράφονται οι τιμές των κοστών ανά μονάδα επιφάνειας και διαιρούνται με την 15ετή διάρκεια ζωής και τις συνολικές ώρες του έτους. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα ωριαία κόστη και απεικονίζονται στον πίνακα Π.3.1.

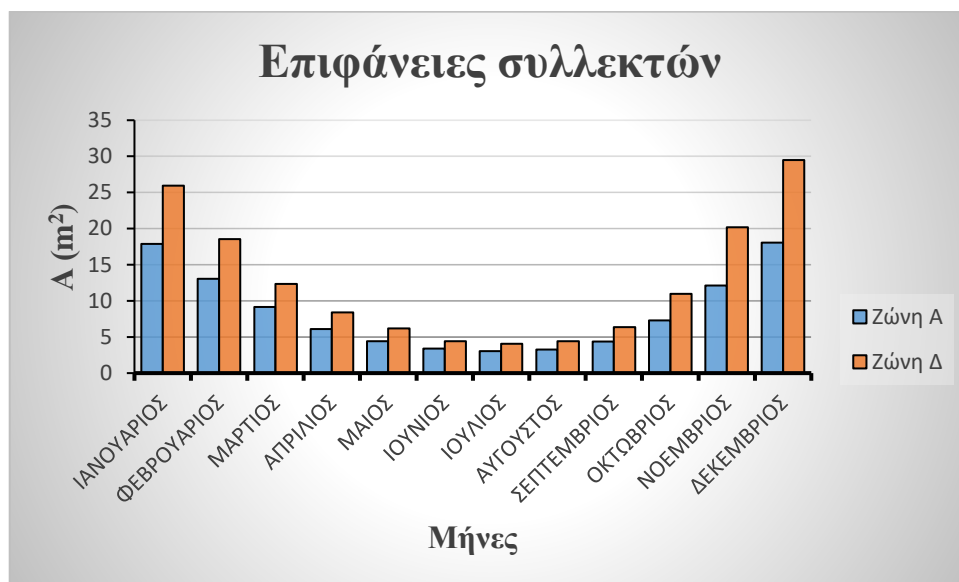
Για τα κόστη είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το ενεργειακό κόστος θεωρείται ότι είναι μηδενικό καθώς οι θερμικοί συλλέκτες αποτελούν συστήματα ΑΠΕ, αυτό οδηγεί επίσης σε αρκετά χαμηλές τιμές περιβαλλοντικού κόστους. Ωστόσο, το κόστος εγκατάστασης λαμβάνει δύο τιμές ανάλογα με τους μήνες, και πιο συγκεκριμένα τους μήνες από τον Απρίλιο έως και τον Αύγουστο τα κόστη λαμβάνουν την τιμή των 500 €/m<sup>2</sup>, ενώ τους υπόλοιπους μήνες στα 400 €/m<sup>2</sup>.

**Πίνακας 3.11:** Κόστη ηλιακού θερμοσίφωνα.

Κόστος	Ενεργειακό	Εγκατάστασης	Περιβαλλοντικό
	$cost_{sol} = 0 \text{ €/kWh}$	$inct_{sol} = 500 \text{ €/m}^2$ $inct_{sol} = 400 \text{ €/m}^2$	$env_{sol} = 0,004 \text{ €}$ $/kWh$

Επιπρόσθετα, για την εύρεση του περιβαλλοντικού κόστους είναι απαραίτητο να υπολογιστούν οι ενεργειακές καταναλώσεις για κάθε ώρα του κάθε μήνα. Αυτό γίνεται με την χρήση του τύπου 3.4, όπου υπολογίζονται για τα δεδομένα πλέον τετραγωνικά, οι καταναλώσεις για κάθε μήνα και έπειτα γίνεται αναγωγή στις ωριαίες τιμές, διαιρώντας με τις ώρες του κάθε μήνα. Στη συνέχεια, οι τιμές αυτές πολλαπλασιάζονται με το περιβαλλοντικό κόστος του πίνακα 3.11 για να προκύψουν τα ωριαία κόστη. Στον πίνακα Π.3.2 παρουσιάζονται αφενός οι καταναλώσεις και αφετέρου τα περιβαλλοντικά κόστη σε ωριαίο επίπεδο για κάθε μήνα.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα (Διάγραμμα 3.1) που συνοψίζονται τα απαιτούμενα τετραγωνικά των επιφανειών των συλλεκτών για την πλήρη κάλυψη των αναγκών σε ZNX για κάθε μήνα και για τις δύο κλιματικές ζώνες.



**Διάγραμμα 3.1:** Οι επιφάνειες των ηλιακών θερμικών συλλεκτών που απαιτούνται για την κάλυψη των μηνιαίων αναγκών σε ZNX.

### 3.3.6 Συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των συστημάτων

Στην υποενότητα αυτή γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των τιμών των κυριότερων παραμέτρων που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες αυτού του κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι βαθμοί απόδοσης και τα κόστη (ενεργειακά, περιβαλλοντικά, εγκατάστασης) όλων των συστημάτων για την εξασφάλιση του ZNX που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία.

**Πίνακας 3.12:** Βαθμοί απόδοσης, κόστη και διάρκεια ζωής για κάθε ενεργειακό σύστημα του ZNX.

Ενεργειακά συστήματα	Βαθμοί απόδοσης	Ενεργειακό κόστος (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€/kW)	Περιβαλλοντικό κόστος (€/kWh)	Διάρκεια ζωής (έτη)
Λέβητας πετρελαίου (bl)	$n_{bl} = 0,8$	$cost_{bl} = 0,1$ $cost_{bl}^* = 0,025$	$inct_{bl} = 100$	$env_{oil} = 0,04$	$y_{bl} = 20$
Λέβητας βιομάζας (wd)	$n_{wd} = 0,9$	$cost_{wd} = 0,04$	$inct_{wd} = 250$	$env_{wd} = 0,003673$	$y_{wd} = 15$
Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας (el)	$n_{el} = 0,95$	$cost_{el} = 0,15$ $cost_{el}^* = 0,05$	$inct_{el} = 100$	$env_{el} = 0,065$	$y_{el} = 15$
Μονάδα Αντλίας Θερμότητας (HP)	$COP_{HP}$ μεταβάλλεται	$cost_{HP} = 0,15$ $cost_{HP}^* = 0,05$	$inct_{HP} = 250$	$env_{HP} = 0,065$	$y_{HP} = 15$
Ηλιακός θερμοσίφωνας (sol)	$n_{sol} = 0,95$	$cost_{sol} = 0$	$inct_{sol} = 400$ $inct_{sol}^* = 500$ (€/m <sup>2</sup> )	$env_{sol} = 0,004$	$y_{sol} = 15$

### 3.4 Υπολογισμός κόστους εγκατάστασης για κάθε σύστημα ZNX

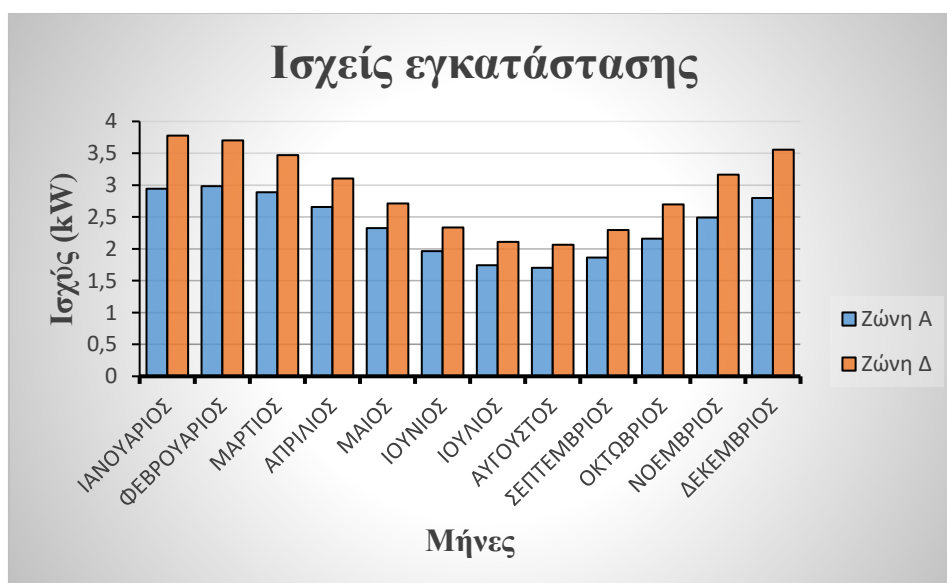
Τα κόστη εγκατάστασης διαφοροποιούνται ανά μήνα διότι η ωριαία ισχύς υπολογίζεται για το κάθε ωριαίο φορτίο απαιτούμενης ενέργειας. Συνεπώς, η διαστασιολόγηση των συστημάτων είναι μεταβαλλόμενη για κάθε ώρα και έτσι μπορεί να δώσει συγκεκριμένα αποτελέσματα για το κάθε σύστημα. Ο υπολογισμός των ισχύων αυτών γίνεται πολλαπλασιάζοντας τα ωριαία ενεργειακά φορτία με το  $24/5=4,8$  το οποίο δείχνει ότι το ημερήσιο φορτίο πρέπει να καλύπτεται μέσα σε αυτές τις 5 ώρες λειτουργίας του συστήματος μέσα στη μέρα. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τόσο οι ισχείς όσο και τα εκάστοτε κόστη εγκατάστασης σύμφωνα με τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα 3.12 της προηγούμενης ενότητας, και είναι διαιρεμένα ανάλογα με την διάρκεια ζωής του κάθε συστήματος ώστε να είναι αντιπροσωπευτικές οι τιμές. Βέβαια, τα κόστη εγκατάστασης των ηλιακών συλλεκτών καθώς και η διαστασιολόγησή τους υπολογίστηκαν στην ενότητα 3.3.5 και φαίνονται στον πίνακα Π.3.1.

**Πίνακας 3.13:** Ισχείς εγκατάστασης για κάθε ώρα του κάθε μήνα σε kW και ωριαία κόστη εγκατάστασης για κάθε σύστημα σε € .

Μήνες	$Q_{dem}$ (kWh)	$P$ (kW)	Ωριαία κόστη εγκατάστασης (€)			
			bl	wd	el	HP
<b>Κλιματική ζώνη Α</b>						
Ιανουάριος	0.617	2.964	0.001692	0.005638	0.002255	0.005638
Φεβρουάριος	0.621	2.982	0.001702	0.005674	0.002269	0.005674
Μάρτιος	0.602	2.889	0.001649	0.005497	0.002199	0.005497
Απρίλιος	0.554	2.658	0.001517	0.005057	0.002023	0.005057
Μάιος	0.484	2.325	0.001327	0.004423	0.001769	0.004423
Ιούνιος	0.409	1.963	0.001121	0.003735	0.001494	0.003735
Ιούλιος	0.363	1.741	0.000994	0.003313	0.001325	0.003313
Αύγουστος	0.355	1.704	0.000973	0.003242	0.001297	0.003242
Σεπτέμβριος	0.388	1.861	0.001062	0.003542	0.001417	0.003542
Οκτώβριος	0.449	2.158	0.001232	0.004105	0.001642	0.004105

Νοέμβριος	0.519	2.491	0.001422	0.00474	0.001896	0.00474
Δεκέμβριος	0.583	2.797	0.001596	0.005321	0.002128	0.005321
<b>Κλιματική ζώνη Δ</b>						
Ιανουάριος	0.787	3.778	0.002157	0.007189	0.002876	0.007189
Φεβρουάριος	0.772	3.704	0.002114	0.007048	0.002819	0.007048
Μάρτιος	0.724	3.473	0.001982	0.006607	0.002643	0.006607
Απρίλιος	0.646	3.102	0.001771	0.005903	0.002361	0.005903
Μάιος	0.565	2.713	0.001549	0.005163	0.002065	0.005163
Ιούνιος	0.486	2.334	0.001332	0.00444	0.001776	0.00444
Ιούλιος	0.440	2.112	0.001205	0.004017	0.001607	0.004017
Αύγουστος	0.430	2.065	0.001179	0.003929	0.001572	0.003929
Σεπτέμβριος	0.478	2.297	0.001311	0.00437	0.001748	0.00437
Οκτώβριος	0.561	2.695	0.001538	0.005127	0.002051	0.005127
Νοέμβριος	0.660	3.167	0.001808	0.006026	0.00241	0.006026
Δεκέμβριος	0.741	3.556	0.00203	0.006766	0.002706	0.006766

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα, όπου το ένα αφορά τις τιμές των ισχύων και το άλλο τις μέσες τιμές των κοστών εγκατάστασης για κάθε ώρα της μέρας.



**Διάγραμμα 3.2:** Μηνιαίες τιμές εγκατεστημένης ισχύος ενεργειακών συστημάτων για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.



**Διάγραμμα 1.3:** Μέσες τιμές του ωριαίου κόστους εγκατάστασης του κάθε συστήματος για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.

## Κεφάλαιο 4: Οικονομική βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων

---

### 4.1 Βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων

Οι διατάξεις πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων (multi – energy συστήματα) εμφανίζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Τα συστήματα αυτά μπορούν να ενσωματώνουν διαφορετικές πηγές ενέργειας, τουλάχιστον μία από τις οποίες είναι ανανεώσιμη, προκειμένου να καλυφθούν τα θερμικά και τα ηλεκτρικά φορτία ενός κτηρίου. Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός και η λειτουργία τέτοιων συστημάτων είναι πολύ περίπλοκοι για πολλούς λόγους, είναι πρωτίστης σημασίας να παρασχεθούν τα κατάλληλα εργαλεία για να γίνει η επιλογή της καλύτερης διαμόρφωσης των συστημάτων αυτών, αλλά και της ανάμιξης των διαφορετικών ενεργειακών πηγών.

Συνεπώς, είναι χρήσιμη η δημιουργία ενός προσεγγιστικού μοντέλου των multi – energy συστημάτων στα κτήρια σύμφωνα με την έννοια του ενεργειακού κόμβου (energy hub) (Favre-Perrod P, 2005). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη σύζευξη μεταξύ της απαιτούμενης ενέργειας και της αποθεματικής ενέργειας σε ένα κτήριο που θα διαμορφωθεί με έναν τρόπο σύνθεσης. Το μοντέλο προσαρμόστηκε για να χρησιμοποιηθεί στο στάδιο σχεδιασμού του κτηρίου, είτε ως εργαλείο προσομοίωσης του συστήματος, είτε ως εργαλείο επιλογής του συστήματος που είναι καταλληλότερο να χρησιμοποιηθεί. Εάν οι τιμές και τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων ενέργειας και των ενεργειακών προϊόντων είναι γνωστά, είναι δυνατόν, με ένα ορισμένο σύνολο περιορισμών, να καθοριστεί μια διαμόρφωση που ελαχιστοποιεί τα αρχικά κόστη επένδυσης, τη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και το κόστος του κύκλου ζωής. Αυτή η προσέγγιση καθιστά δυνατή την αποφυγή της προσομοίωσης και της κατάταξης ενός συνόλου διαφορετικών διαμορφώσεων των συστημάτων, και επιτρέπει επίσης τη μελέτη της συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων σε ανοικτή διαμόρφωση και όχι ως μεμονωμένα συστήματα (Enrico Fabrizio et al., 2009).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι multi-energy συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικούς συνδυασμούς θερμικών και ηλεκτρικών εξοπλισμών όπως συμπαραγωγοί, ηλεκτρικές συσκευές ψύξης, μηχανές ψύξης, ψύκτες απορρόφησης αερίου ή ατμού, κυψέλες καυσίμου, παραδοσιακοί λέβητες, λέβητες ξύλου, θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες, φωτοβολταϊκοί συλλέκτες, θερμικοί συλλέκτες κ.α. Επομένως, ένα

multi-energy σύστημα τροφοδοτείται από ένα συνδυασμό διαφόρων πηγών ενέργειας, τόσο ανανεώσιμων όσο και μη ανανεώσιμων, για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων ενός κτηρίου με τη μέγιστη απόδοση. Το σκεπτικό πίσω από την ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών ενέργειας ή / και συστημάτων ενέργειας είναι να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που μπορεί να υπάρχουν σε κάθε ένα από αυτά, ώστε να βελτιστοποιείται η χρήση του καθενός (Manwell,2004)

Ο σχεδιασμός multi-energy συστημάτων περιλαμβάνει την επίλυση ορισμένων προβλημάτων όπως για παράδειγμα το σωστό μέγεθος (σωστή διαστασιολόγηση), την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών συστημάτων και το κόστος αλλά και τη διαθεσιμότητα των διαφορετικών ενεργειακών πηγών. Αυτό γίνεται, στη σχετική διαθέσιμη βιβλιογραφία, κυρίως με μελέτες και βελτιστοποιήσεις σε μεμονωμένα ενεργειακά συστήματα των κτηρίων. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν την εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτηρίου, τα χαρακτηριστικά των ενεργειακών πηγών και την τεχνολογία των συστημάτων ενέργειας σε ένα λεπτομερές επίπεδο που συνήθως δεν διατίθεται κατά τα πρώτα στάδια σχεδιασμού μιας κατασκευής κτηρίου.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα σχεδιασμού και λειτουργίας αφορά την αναντιστοιχία μεταξύ της απαιτούμενης ενέργειας (το φορτίο) και της τροφοδοτούμενης ενέργειας από τις πηγές (supply energy), της ενέργειας δηλαδή που καταναλώνουν τα συστήματα είτε εκείνη αναφέρεται σε ανανεώσιμες ή σε συμβατικές πηγές ενέργειας. Αυτό το πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται μέσω της ενσωμάτωσης συσκευών αποθήκευσης της ενέργειας ή / και με τη χρήση εφεδρικής πηγής ενέργειας και τελικά σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές δυνατές διαμορφώσεις, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί μια μελέτη βελτιστοποίησης μεταξύ της ενέργειας ζήτησης, της ενέργειας κατανάλωσης από τις πηγές, των συστημάτων ενέργειας και των χαρακτηριστικών της αποθήκευσής της και των εφεδρικών πηγών κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία σε ένα multi-energy σύστημα.

Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να λυθεί με τον προσδιορισμό όλων των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων ποσοτήτων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και στη συνέχεια με την εύρεση των τιμών των βέλτιστων σχεδιαστικών παραμέτρων. Μπορεί τότε να δημιουργηθεί μια αντικειμενική συνάρτηση (Ooka και Komamura, 2009) χρησιμοποιώντας ένα βελτιστοποιημένο σχέδιο που βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους και το λογισμικό HOGA, ή με την προσομοίωση μεγάλου



αριθμού διαφορετικών περιπτώσεων και κατατάσσοντάς τα ως συνάρτηση ενός συνδυασμού διαφόρων αποδοτικών παραμέτρων. Αυτή η δεύτερη επιλογή υιοθετείται συχνά στην περίπτωση προσομοίωσης και επιλογής των συστημάτων ενός κτηρίου, όχι μόνο σε μελέτες αλλά και σε λογισμικά όπως το καταναμημένο μοντέλο βελτιστοποίησης HOMER που προσομοιώνει διάφορα σχεδιαστικά σενάρια και τα κατατάσσει ως συνάρτηση του κόστους του κύκλου ζωής. Άλλες μελέτες λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο το κόστος και τις εκπομπές που σχετίζονται με τη λειτουργία του οικοδομικού συστήματος αλλά και την κατανάλωση των υλικών ενός οικοδομικού συστήματος από την άποψη των οικολογικών επιβαρύνσεων. Για αυτούς τους λόγους, είναι απαραίτητο να υπάρχει μέριμνα, από το αρχικό στάδιο της έννοιας του σχεδιασμού, που ονομάζεται επίσης σχηματικός σχεδιασμός ή εννοιολογικός σχεδιασμός μιας ενεργειακής – οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης της διαδικασίας αυτών των συστημάτων.

Η ανάγκη αυτή είναι σύμφωνη με πρόσφατες θεωρίες που αφορούν την ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού, οι οποίες βασίζονται σε ολόκληρο το κτήριο, όπου όλες οι σχεδιαστικές μεταβλητές που επηρεάζουν η μία την άλλη θεωρούνται ότι λειτουργούν ταυτόχρονα και επιλύονται κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Είναι σημαντικό η διαδικασία μοντελοποίησης να παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την εφαρμογή μιας σημαντικής σχεδιαστικής ακολουθίας που βασίζεται στα εξής:

- Την ελαχιστοποίηση των φορτίων του κτηρίου.
- Την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος.
- Τη χρήση αποτελεσματικότερων συστημάτων.
- Τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ως εισαγόμενα συστήματα.

Βέβαια, το κόστος εφαρμογής των σεναρίων για τη βελτίωση της ενεργειακής κατασκευής ενός κτηρίου είναι επίσης χαμηλότερο στα πρώτα στάδια σε σχέση με την εκ των υστέρων μελέτη.

## 4.2 Κόμβος ενεργειακών συστημάτων

Ο ενεργειακός κόμβος ή υβριδικός ενεργειακός κόμβος εισήχθη ως έννοια από μια ερευνητική ομάδα στα εργαστήρια συστημάτων ισχύος και υψηλής τάσης στο ETH Zurich στο πλαίσιο ενός έργου που ονομάζεται «Vision of Future Energy Networks» (Favre-Perrod P, 2005). Η έρευνα αυτή στοχεύει στον καθορισμό της δομής των ενεργειακών δικτύων μακροπρόθεσμα και βασίζεται σε δύο σημαντικές βασικές

πτυχές. Πιο συγκεκριμένα, ο κόμβος υποτίθεται ότι προσαρμόζεται στις ανάγκες των καταναλωτών και των παραγωγών όχι μόνο αναφορικά με την ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και με άλλες ενεργειακές ανάγκες (θέρμανση, ψύξη, χημική ισχύς κ.α.). Επιπλέον, ο ενεργειακός κόμβος είναι ένα αφηρημένο μοντέλο διασύνδεσης μεταξύ παραγωγών ενέργειας, καταναλωτών ενέργειας και μεταφορικών υποδομών.

Η έννοια του ενεργειακού κόμβου έχει οριστεί ως ένα σύνολο εξισώσεων ανεπτυγμένες σε μητρώα που αφορούν στη ροή ισχύος στην είσοδο αλλά και στην έξοδο του κόμβου. Οι εξισώσεις αυτές λαμβάνουν κατάλληλες μορφές, ανάλογα με τα συστήματα που χρησιμοποιούνται και τίθενται προς επίλυση για την επίτευξη του βέλτιστου τρόπου χρησιμοποίησης του κάθε συστήματος.

Στη συνέχεια παρατίθεται και αναλύεται ένας ενεργειακός κόμβος. Το ενεργειακό σύστημα χωρίζεται σε τρία τμήματα, την παροχή ενέργειας, την απαιτούμενη ενέργεια και τη μετατροπή, την αποθήκευση και την ρύθμιση της ενέργειας. Η παροχή της ενέργειας αποτελεί το σύνολο των ενεργειακών πηγών που τροφοδοτούνται στους ενεργειακούς μετατροπείς των multi-energy συστημάτων. Κάθε ποσότητα (ισχύς  $P$ , ενέργεια  $E$ ) που αναφέρεται στην παροχή ενέργειας του συστήματος, καταδεικνύεται από το δείκτη «in». Με τη θεώρηση ότι το  $E$  είναι το σύνολο  $\{\alpha, \beta, \gamma, \dots\}$  των  $n$  μορφών ενέργειας, οι ισχύεις που παρέχονται στο ενεργειακό σύστημα από τα  $n$  ενεργειακές πηγές είναι:

$$P_{in}^{\alpha}, P_{in}^{\beta}, P_{in}^{\gamma}, \dots, P_{in}^n \quad (4.1)$$

όπου οι δείκτες  $(\alpha, \beta, \gamma, \dots, n)$  αναφέρονται στις ενεργειακές πηγές, όπως για παράδειγμα το φυσικό αέριο, το ξύλο, η ηλεκτρική ενέργεια, κ.α.). Το σύνολο των  $n$  ενεργειακών αυτών συστημάτων μπορεί να εκφραστεί σε ένα διάνυσμα  $n$  διαστάσεων ως:

$$P_{in} = [P_{in}^{\alpha}, P_{in}^{\beta}, P_{in}^{\gamma}, \dots, P_{in}^n]^T \quad (4.2)$$

Η απαιτούμενη ενέργεια αποτελεί το σύνολο των φορτίων του κτηρίου που πρέπει να καλύπτονται από τα συστήματα. Κάθε ποσότητα που αναφέρεται στην απαιτούμενη ενέργεια του συστήματος καταδεικνύεται από το δείκτη «out». Με τη θεώρηση ότι το  $L$  είναι το σύνολο  $\{a, b, c, \dots\}$  των  $m$  τύπων φορτίου του κτηρίου, οι ισχύεις των φορτίων αυτών μπορούν να γραφούν ως:

$$P_{out}^a, P_{out}^b, P_{out}^c, \dots, P_{out}^m \quad (4.3)$$

όπου οι δείκτες ( $a, b, c, \dots, m$ ) αναφέρονται στους διαφορετικούς τύπους των φορτίων, όπως για παράδειγμα τα φορτία που αφορούν την ενέργεια για θέρμανση, για ψύξη ή για το ZNX. Το σύνολο των  $m$  ενεργειακών αυτών φορτίων του κτηρίου μπορεί να εκφραστεί σε ένα διάνυσμα  $m$  διαστάσεων ως:

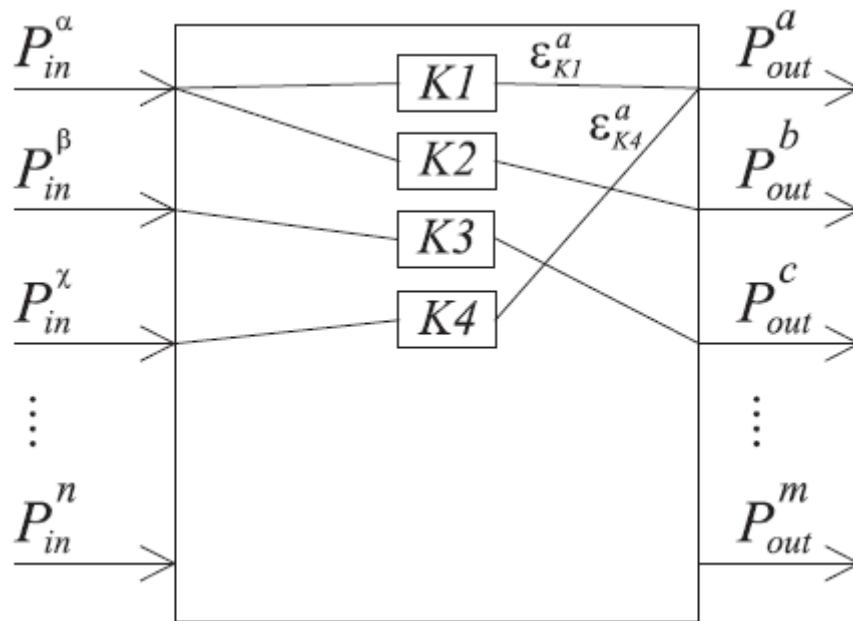
$$P_{out} = [P_{out}^a, P_{out}^b, P_{out}^c, \dots, P_{out}^m]^T \quad (4.4)$$

Μετά τον καθορισμό των δύο αυτών διανυσμάτων μπορεί να εξαχθεί και η σχέση σύνδεσης των δύο αυτών παραμέτρων, όπου συνδέονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου με την ενέργεια τροφοδοσίας που προσφέρεται από τις διάφορες πηγές ενέργειας. Η σχέση αυτή μπορεί να έχει την ακόλουθη μορφή υπό την προϋπόθεση ότι ορίζεται ένα κατάλληλο μητρώο σύζευξης  $D$ , διαστάσεων  $n \times m$ :

$$P_{in} = D \cdot P_{out} \quad (4.5)$$

Ο πίνακας  $D$  συνήθως συνδέει τα δύο διανύσματα μέσω του βαθμού απόδοσης του εκάστοτε συστήματος και ενός συντελεστής  $\epsilon$  που εκφράζει το ποσοστό συμμετοχής του κάθε συστήματος για μια ορισμένη λειτουργία κάθε φορά. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η ακόλουθη μητρική μορφή των παραμέτρων αυτών και στο σχήμα 12 απεικονίζεται ο αντίστοιχος ενεργειακός κόμβος.

$$\begin{bmatrix} p_{in}^a \\ p_{in}^b \\ p_{in}^x \\ \dots \\ p_{in}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\epsilon_{\kappa_1}^\alpha}{\eta_{\kappa_1}} & \frac{1}{\eta_{\kappa_2}} & 0 & & \\ 0 & 0 & \frac{1}{\eta_{\kappa_1}} & \dots & 0 \\ \frac{\epsilon_{\kappa_4}^\alpha}{\eta_{\kappa_4}} & 0 & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{out}^a \\ p_{out}^b \\ p_{out}^c \\ \dots \\ p_{out}^m \end{bmatrix} \quad (4.6)$$



**Σχήμα 13:** Σχηματική αναπαράσταση ενεργειακού κόμβου [πηγή: Enrico Fabrizio et al., 2009].

## Κεφάλαιο 5: Μοντέλα βελτιστοποίησης ενεργειακών συστημάτων

---

### 5.1 Περιγραφή και διατύπωση μοντέλου

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία διαμόρφωσης του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης σε περιγραφικό επίπεδο μέσω μεταβλητών και εξισώσεων. Το μοντέλο αυτό θα επιλέγει ποιο σύστημα είναι κατάλληλο να χρησιμοποιείται και σε τι βαθμό συμμετοχής ώστε να είναι οικονομικά βέλτιστο.

Αρχικά, είναι αναγκαίο να καθοριστούν τα φορτία κατανάλωσης από το κάθε σύστημα ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες σε ZNX. Αυτά είναι προφανές ότι προκύπτουν από την διαίρεση του απαιτούμενου φορτίου με την απόδοση του κάθε συστήματος, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{cons}} = \frac{Q_{\text{dem}}}{\eta \text{ ή COP}} \quad (5.1)$$

Τα φορτία αυτά έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 3 και οι τιμές τους παρουσιάζονται σε πίνακες στις κατάλληλες ενότητες για κάθε σύστημα.

Το συνολικό αυτό φορτίο κατανάλωσης επιμερίζεται σε 5 συστήματα, από τα οποία ορισμένα είναι συμβατικά, όπως για παράδειγμα ο λέβητας πετρελαίου, η αντλία θερμότητας, ο θερμοσίφωνας ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ άλλα είναι συστήματα ΑΠΕ, όπως ο λέβητας βιομάζας και ο ηλιακός θερμοσίφωνας. Σύμφωνα με το μοντέλο, το κάθε σύστημα αναλαμβάνει ένα συγκεκριμένο ποσοστό, το οποίο θα ελαχιστοποιεί το κόστος που προκύπτει από την κάθε πηγή ενέργειας. Άρα το άθροισμα των φορτίων που καταναλώνει η κάθε πηγή θα ισούται με το συνολικό φορτίο κατανάλωσης.

$$Q_{\text{cons,ZNX}} = Q_{\text{cons,bl}} + Q_{\text{cons,wd}} + Q_{\text{cons,el}} + Q_{\text{cons,HP}} + Q_{\text{cons,sol}} \quad (5.2)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (5.1) στην σχέση (5.2) για κάθε σύστημα και με την εισαγωγή ενός συντελεστή συμμετοχής  $\varepsilon$  προκύπτει η ακόλουθη σχέση, με την προϋπόθεση ότι η κάθε κατανάλωση να πολλαπλασιάζεται με το ενεργειακό κόστος του κάθε συστήματος:

$$Q_{\text{cons,ZNX}} = \frac{Q_{\text{dem,bl}} \cdot \text{cost}_{\text{bl}}}{\eta_{\text{bl}}} \cdot \varepsilon_{\text{bl}} + \frac{Q_{\text{dem,wd}} \cdot \text{cost}_{\text{wd}}}{\eta_{\text{wd}}} \cdot \varepsilon_{\text{wd}} + \frac{Q_{\text{dem,el}} \cdot \text{cost}_{\text{el}}}{\eta_{\text{el}}} \cdot \varepsilon_{\text{el}} \\ + \frac{Q_{\text{dem,HP}} \cdot \text{cost}_{\text{HP}}}{\eta_{\text{HP}}} \cdot \varepsilon_{\text{HP}} + \frac{Q_{\text{dem,sol}} \cdot \text{cost}_{\text{sol}}}{\eta_{\text{sol}}} \cdot \varepsilon_{\text{sol}} \quad (5.3)$$

Βέβαια, επειδή η απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται για να καλυφθούν οι ανάγκες του κτηρίου σε ZNX είναι καθορισμένη, θα είναι και ίδια για κάθε σύστημα, όμως διαφοροποιείται ωριαία ανάλογα με τον μήνα, οπότε ισχύει η σχέση:

$$Q_{\text{dem,ZNX}} = Q_{\text{dem,bl}} = Q_{\text{dem,el}} = Q_{\text{dem,wd}} = Q_{\text{dem,HP}} = Q_{\text{dem,sol}} \quad (5.4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση του ενεργειακού κόστους λειτουργίας είναι απαραίτητο να προστεθεί και το κόστος εγκατάστασης του κάθε συστήματος. Το κόστος αυτό σχετίζεται με την διαστασιολόγηση του κάθε συστήματος, και υπολογίζεται ωριαία για κάθε σύστημα ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες για κάθε σύστημα. Βέβαια, οι τιμές αυτές διαφοροποιούνται και ανάλογα με τη διάρκεια ζωής του κάθε συστήματος. Επιπλέον, το σταθερό κόστος εγκατάστασης του κάθε συστήματος θα πρέπει να συνυπολογίζεται στο συνολικό κόστος μόνο εφόσον είναι συμφέρουσα η χρήση ενός συστήματος, γι' αυτό εισάγονται περαιτέρω μεταβλητές σε κάθε όρο.

Έτσι, για τα συστήματα που εμπλέκονται στην θέρμανση του νερού του κτηρίου προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{\text{cost}} = \frac{P_{\text{bl}} \cdot \text{inct}_{\text{bl}}}{Y_{\text{bl}}} \cdot \alpha + \frac{P_{\text{wd}} \cdot \text{inct}_{\text{wd}}}{Y_{\text{wd}}} \cdot \beta + \frac{P_{\text{el}} \cdot \text{inct}_{\text{el}}}{Y_{\text{el}}} \cdot \gamma + \frac{P_{\text{HP}} \cdot \text{inct}_{\text{HP}}}{Y_{\text{HP}}} \cdot \delta \\ + \frac{A_{\text{sol}} \cdot \text{inct}_{\text{sol}}}{Y_{\text{sol}}} \cdot \varepsilon \quad (5.5)$$

Όπου οι μεταβλητές  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  αποτελούν δυαδικές μεταβλητές, δηλαδή θα λαμβάνουν την τιμή 0 όταν η αντίστοιχη κάλυψη ( $\varepsilon$ ) του εκάστου συστήματος είναι μηδενική, ενώ θα λαμβάνουν την τιμή 1 όταν η αντίστοιχη κάλυψη του συστήματος είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Για την πλήρωση της σύμβασης αυτής είναι απαραίτητο να εισαχθούν στο πρόβλημα οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$\varepsilon_{\text{bl}} \leq \alpha, \varepsilon_{\text{wd}} \leq \beta, \varepsilon_{\text{el}} \leq \gamma, \varepsilon_{\text{HP}} \leq \delta, \varepsilon_{\text{sol}} \leq \varepsilon \quad (5.6)$$

Από τους περιορισμούς αυτούς φαίνεται πως δεν καλύπτεται η περίπτωση κατά την οποία ο συντελεστής συμμετοχής να είναι μηδενικός, ενώ η δυαδική μεταβλητή να είναι μονάδα, πράγμα το οποίο είναι ανεπιθύμητο γιατί δεν πρέπει να χρεώνεται το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος εφόσον αυτό δεν θεωρείται βέλτιστο προς χρήση. Βέβαια, η περίπτωση αυτή εξαλείφεται από το ίδιο το μοντέλο, καθώς πρέπει να προκύψει το ελάχιστο συνολικό κόστος.

Συνοψίζοντας, η αντικειμενική συνάρτηση του συνολικού κόστους που θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί προκύπτει από το άθροισμα της εξίσωσης 5.3 που αποτελεί το ενεργειακό κόστος με την εξίσωση 5.4 του κόστους εγκατάστασης. Έτσι, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση με συνολικά 8 μεταβλητές απόφασης:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{encost}} = & \frac{Q_{\text{dem}} \cdot \text{cost}_{\text{bl}}}{n_{\text{bl}}} \cdot \varepsilon_{\text{bl}} + \frac{Q_{\text{dem}} \cdot \text{cost}_{\text{wd}}}{n_{\text{wd}}} \cdot \varepsilon_{\text{wd}} + \frac{Q_{\text{dem}} \cdot \text{cost}_{\text{el}}}{n_{\text{el}}} \cdot \varepsilon_{\text{el}} + \\
 & + \frac{Q_{\text{dem}} \cdot \text{cost}_{\text{HP}}}{n_{\text{HP}}} \cdot \varepsilon_{\text{HP}} + \frac{Q_{\text{dem}} \cdot \text{cost}_{\text{sol}}}{n_{\text{sol}}} \cdot \varepsilon_{\text{sol}} + \frac{P_{\text{bl}} \cdot \text{inct}_{\text{bl}}}{Y_{\text{bl}}} \cdot \alpha + \frac{P_{\text{wd}} \cdot \text{inct}_{\text{wd}}}{Y_{\text{wd}}} \cdot \beta + \\
 & + \frac{P_{\text{el}} \cdot \text{inct}_{\text{el}}}{Y_{\text{el}}} \cdot \gamma + \frac{P_{\text{HP}} \cdot \text{inct}_{\text{HP}}}{Y_{\text{HP}}} \cdot \delta + \frac{A_{\text{sol}} \cdot \text{inct}_{\text{sol}}}{Y_{\text{sol}}} \cdot \varepsilon \quad (5.7)
 \end{aligned}$$

Όπου

- $\varepsilon_{\text{bl}}, \varepsilon_{\text{wd}}, \varepsilon_{\text{el}}, \varepsilon_{\text{GHP}}, \varepsilon_{\text{HP}}, \varepsilon_{\text{sol}}$ : Τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε συστήματος (ποσοστιαίες μεταβλητές απόφασης).
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ : Οι δυαδικές μεταβλητές απόφασης του κάθε συστήματος που καθορίζουν το κόστος εγκατάστασης.

Ωστόσο, οι συντελεστές του ποσοστού κάλυψης θα πρέπει να πληρούν ορισμένους περιορισμούς στις τιμές που μπορούν να λαμβάνουν.

1. Επί της ουσίας οι μεταβλητές απόφασης θα αποτελούν το ποσοστό συμμετοχής του κάθε συστήματος στην κατανάλωση της ενέργειας, συνεπώς οι τιμές τους κυμαίνονται από 0 έως 1.

$$\begin{aligned}
 0 & \leq \varepsilon_{\text{bl}} \leq 1 \\
 0 & \leq \varepsilon_{\text{wd}} \leq 1 \\
 0 & \leq \varepsilon_{\text{el}} \leq 1 \\
 0 & \leq \varepsilon_{\text{HP}} \leq 1 \\
 0 & \leq \varepsilon_{\text{sol}} \leq 1
 \end{aligned} \quad (5.8)$$

2. Οι συντελεστές αυτοί θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως τις απαιτήσεις του κτηρίου και σίγουρα δεν θα πρέπει να ξεπερνούν αυτές τις τιμές, άρα το άθροισμά τους θα πρέπει να είναι 1, αφού ο καθένας θα καλύπτει κάποιο ορισμένο ποσοστό.

$$\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{wd} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1 \quad (5.9)$$

Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο μαθηματικό πρόγραμμα GAMS (General Algebraic Modeling System), το οποίο ειδικεύεται στην επίλυση γραμμικών ή μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρατίθενται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα οποία έχουν ως βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε παραπάνω, με ορισμένες διαφοροποιήσεις κάθε φορά. Για κάθε μοντέλο φαίνονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναφορικά με την βελτιστοποίηση, καθώς και διάφορα χρήσιμα διαγράμματα.

## 5.2 Ενεργειακό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους

Το ενεργειακό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει σκοπό την εύρεση του ποσοστού συμμετοχής πέντε ενεργειακών συστημάτων ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ενός κτηρίου 200 m<sup>2</sup> σε ZNX με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τόσο τα ενεργειακά κόστη, όσο και τα κόστη εγκατάστασης των συστημάτων. Οι τιμές που αναγράφονται στο μοντέλο αναφέρονται σε ωριαία δεδομένα ώστε να είναι περισσότερο λεπτομερής η μελέτη. Το ενεργειακό αυτό μοντέλο βασίζεται στην δομή του γενικότερου μοντέλου που αναπτύχθηκε στην ενότητα 5.1, με μικρές ωστόσο διαφοροποιήσεις ώστε να καταστεί ορθότερο.

Πιο συγκεκριμένα και αναφορικά με την ενεργειακή εξίσωση 5.7, απαλείφεται ο όρος του ηλιακού συλλέκτη καθώς το ενεργειακό του κόστος θεωρείται μηδενικό, δεδομένου ότι αποτελεί σύστημα ΑΠΕ. Έτσι, εξαλείφεται ο όρος  $\frac{Q_{dem,sol} \cdot cost_{sol}}{n_{sol}} \cdot \varepsilon_{sol}$ . Επιπλέον, σχετικά με τα κόστη εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη, γίνεται η παραδοχή να τεθούν αυτά υπό το αντίστοιχο ποσοστό συμμετοχής  $\varepsilon_{sol}$  εξαλείφοντας έτσι την δυαδική μεταβλητή από την εξίσωση κόστους εγκατάστασης. Συνεπώς, προκύπτει το μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω.



Αντικειμενική συνάρτηση:

$$E_{encost} = \frac{Q_{bl} \cdot cost_{bl}}{n_{bl}} \cdot \varepsilon_{bl} + \frac{Q_{wd} \cdot cost_{wd}}{n_{wd}} \cdot \varepsilon_{wd} + \frac{Q_{el} \cdot cost_{el}}{n_{el}} \cdot \varepsilon_{el} +$$

$$+ \frac{Q_{HP} \cdot cost_{HP}}{n_{HP}} \cdot \varepsilon_{HP} + \frac{A_{sol} \cdot inct_{sol}}{y_{sol}} \cdot \varepsilon_{sol} +$$

$$+ \frac{P_{bl} \cdot inct_{bl}}{y_{bl}} \cdot \alpha + \frac{P_{wd} \cdot inct_{wd}}{y_{wd}} \cdot \beta + \frac{P_{el} \cdot inct_{el}}{y_{el}} \cdot \gamma + \frac{P_{HP} \cdot inct_{HP}}{y_{HP}} \cdot \delta \quad (5.10)$$

Περιορισμοί:

- i.  $\varepsilon_{bl} \leq \alpha, \varepsilon_{wd} \leq \beta, \varepsilon_{el} \leq \gamma, \varepsilon_{HP} \leq \delta$
- ii.  $\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{wd} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1$
- iii.  $0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{wd} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1$
- iv.  $\alpha, \beta, \gamma, \delta = 0 \text{ ή } 1$  (δυαδικές μεταβλητές)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του γραμμικού αυτού μοντέλου προγραμματισμού, όπως προέκυψαν από το λογισμικό του Gams, και για τις δύο κλιματικές ζώνες.

**Πίνακας 5.1:** Αποτελέσματα ενεργειακού μοντέλου (ποσοστά συμμετοχής και κόστη για κάθε ώρα του κάθε μήνα) για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.

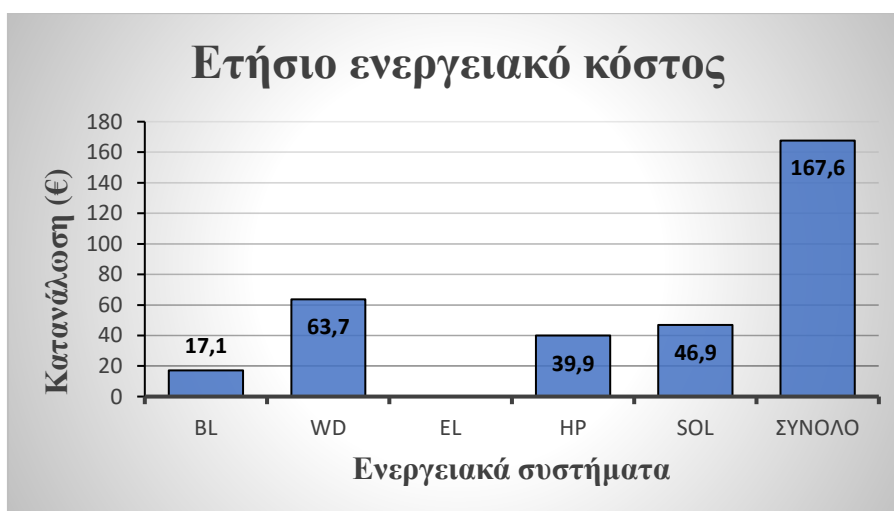
Μήνες	Τιμολόγιο	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)
		Ζώνη Α		Ζώνη Δ	
Ιανουάριος	Κανονικό	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.033	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.042
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.02	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0253
Φεβρουάριος	Κανονικό	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.033	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.041
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0198	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0249
Μάρτιος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.028	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.038

	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.018	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.022
Απρίλιος	Κανονικό	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.019	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.022
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.016	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0181
Μάιος	Κανονικό	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.016	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.019
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.013	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.015
Ιούνιος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.013	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.017
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.01	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.012
Ιούλιος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.012	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.015
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.009	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.01
Αύγουστος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.012	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.017
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.009	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.01
Σεπτέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.013	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.019
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.01	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.012
Οκτώβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.02	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.03
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.012	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.015
Νοέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.028	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.035
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.015	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0194
Δεκέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.031	$\varepsilon_{wd} = 1$	0.04
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.018	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.023

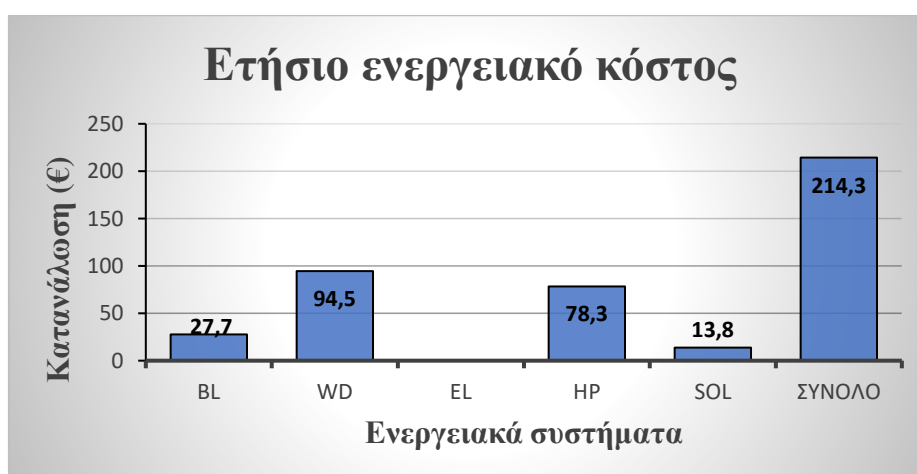
Για τα συνολικά κόστη ολόκληρου του έτους αθροίζονται τα επιμέρους ωριαία κόστη όλων των μηνών για κάθε σύστημα ξεχωριστά, και επιπλέον μπορούν να προκύψουν τα ποσοστά συμμετοχής των συστημάτων αυτών συνολικά στο έτος. Κατά

παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται και οι ενεργειακές καταναλώσεις των συστημάτων σε ετήσια βάση και τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής τους στο σύνολο του έτους.

Στην συνέχεια αποτυπώνονται διάφορα διαγράμματα που αφορούν αφενός τα κόστη και αφετέρου τις ενεργειακές καταναλώσεις. Τα διαγράμματα αυτά συνοψίζουν τις απαραίτητες πληροφορίες που προκύπτουν από την λύση του ενεργειακού προβλήματος ελαχιστοποίησης του κόστους. Πιο συγκεκριμένα, δείχνουν τα συνολικά κόστη (χρηματικά και ενεργειακά) και τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων στο σύνολο του έτους. Φυσικά, το ίδιο πρόβλημα έχει επιλυθεί και για την Α και για την Δ κλιματική ζώνη, συνεπώς τα διαγράμματα είναι συγκριτικά, ώστε να αποτυπωθούν οι διαφοροποιήσεις.

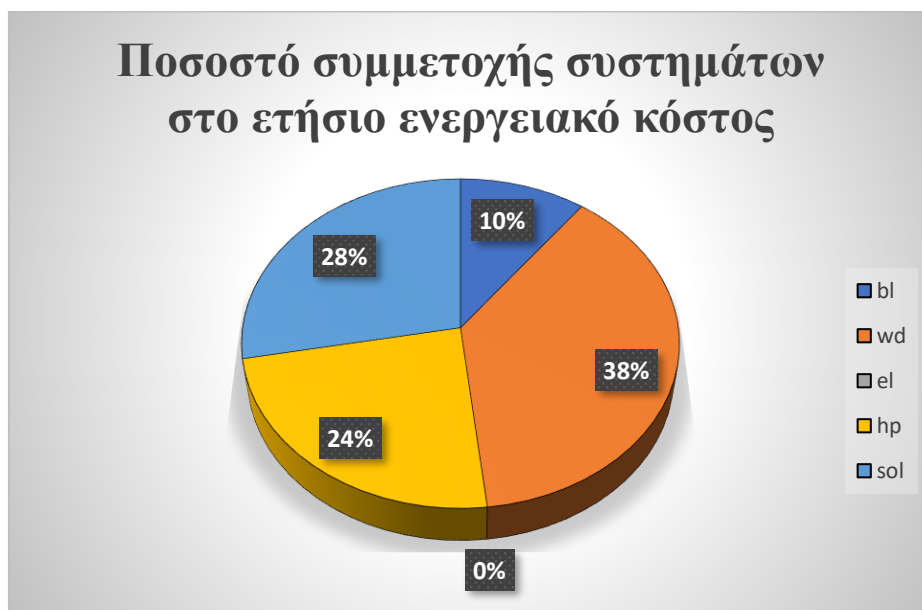


(α)

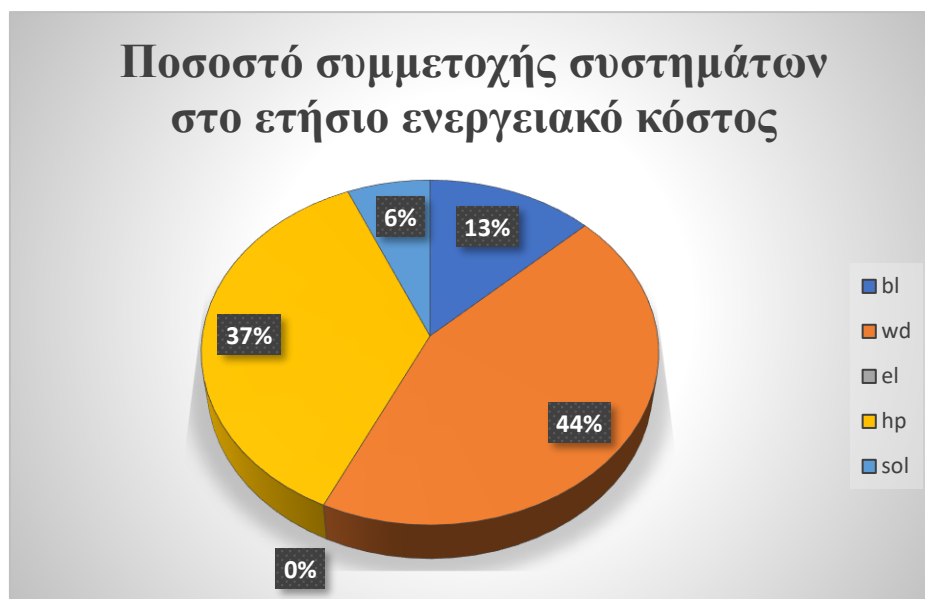


(β)

**Διάγραμμα 5.1:** Ετήσια ενεργειακά κόστη για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.

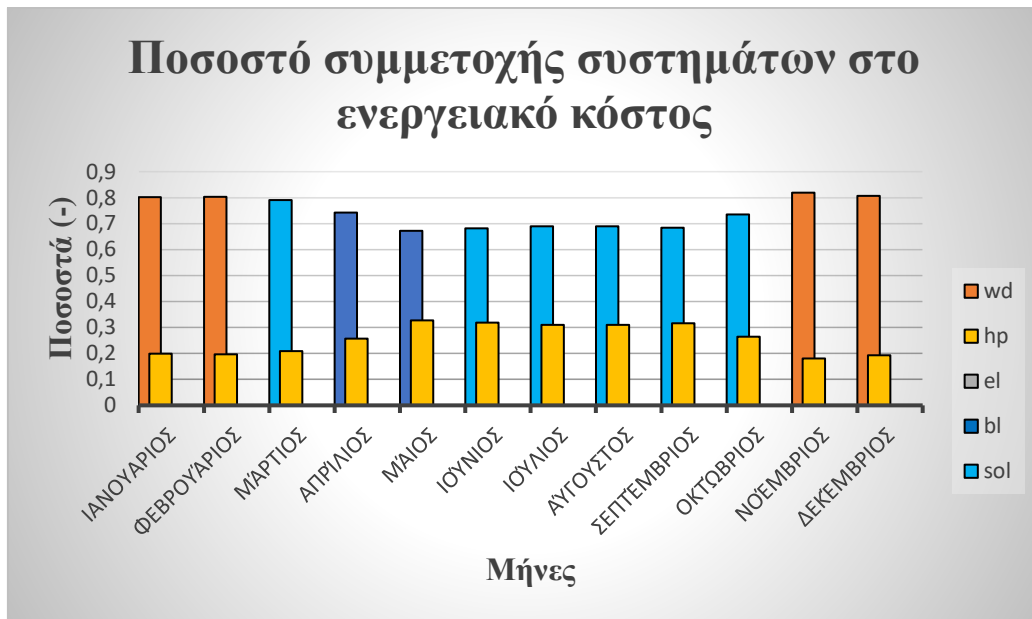


(α)

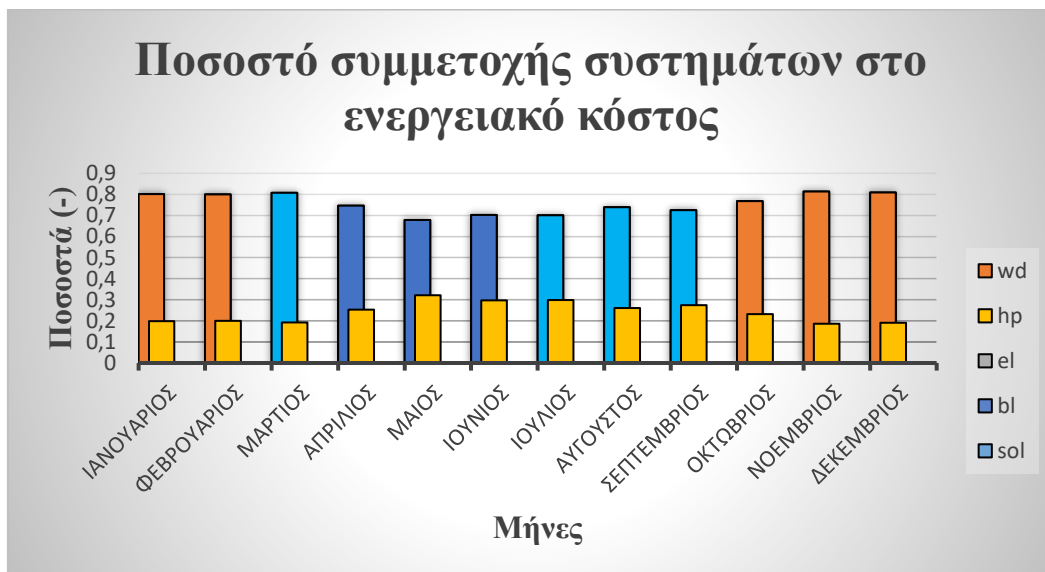


(β)

**Διάγραμμα 5.2:** Ποσοστό συμμετοχής συστημάτων στο ετήσιο ενεργειακό κόστος για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.

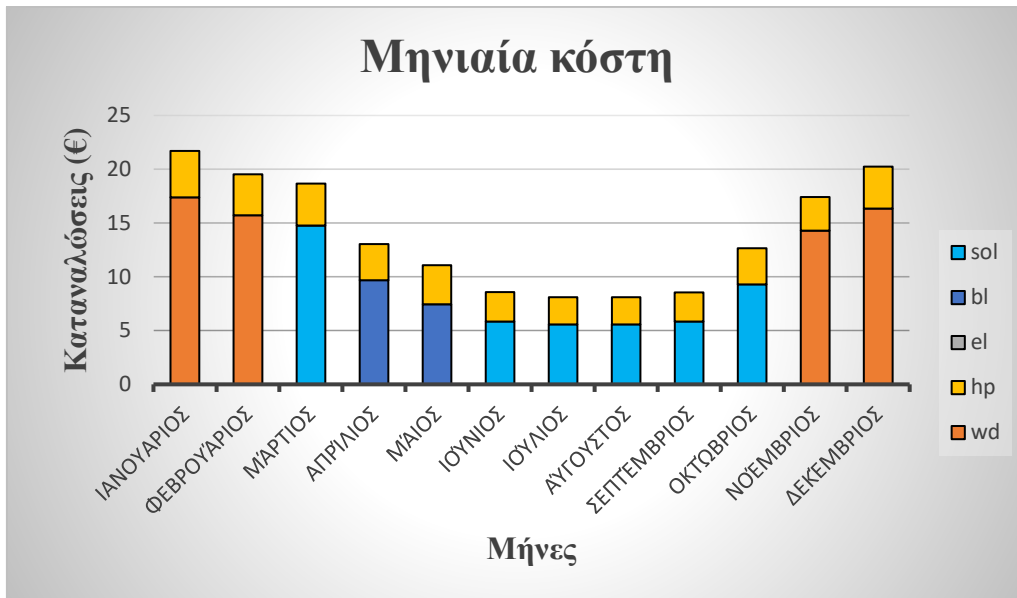


(α)

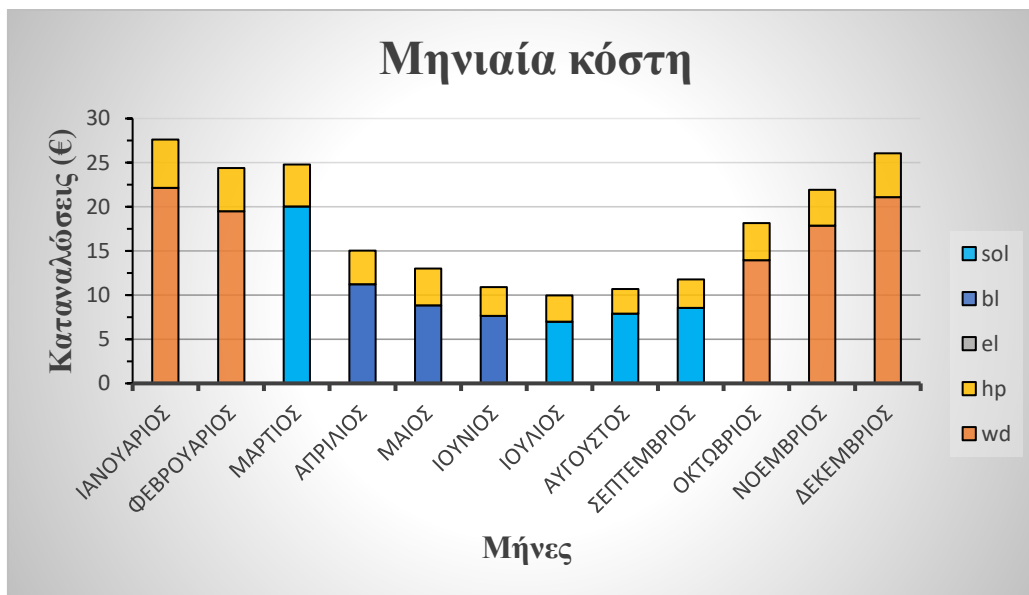


(β)

**Διάγραμμα 5.3:** Ποσοστό συμμετοχής συστημάτων στο ενεργειακό κόστος για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.



(α)



(β)

**Διάγραμμα 5.4:** Μηνιαία κόστη για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Β.



(α)



(β)

**Διάγραμμα 5.5:** Ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.



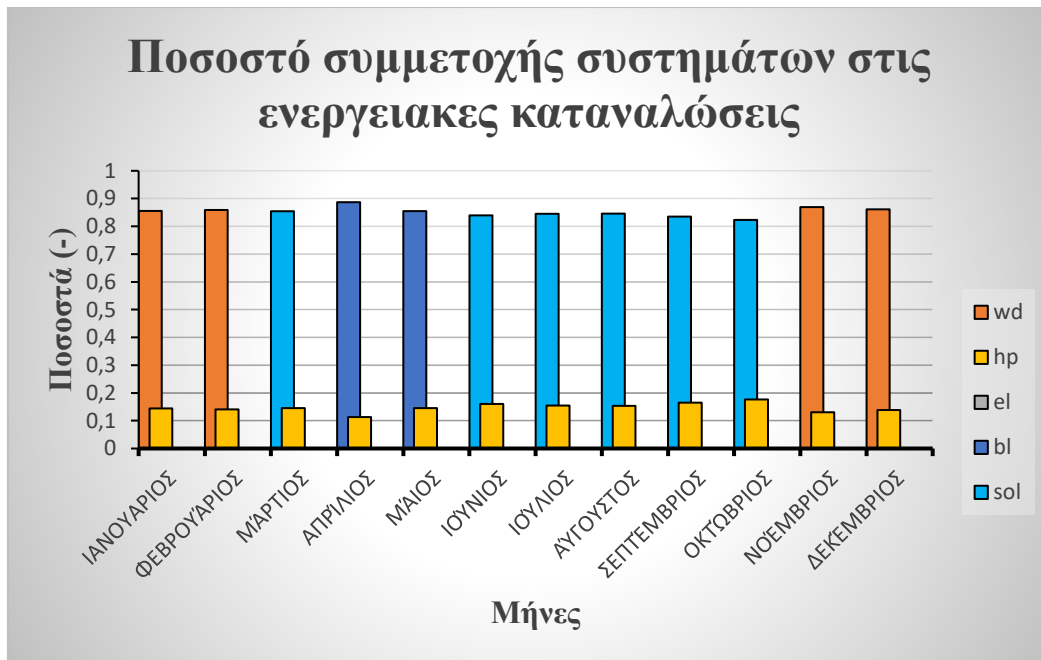
(α)



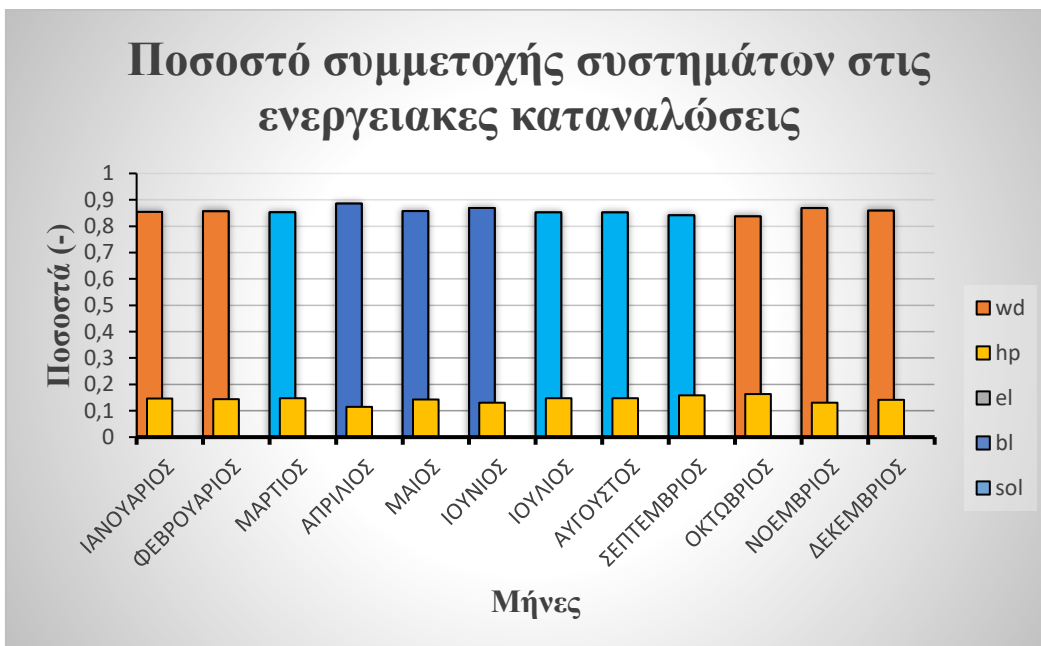
(β)

**Διάγραμμα 5.6:** Ποσοστό συμμετοχής συστημάτων στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.



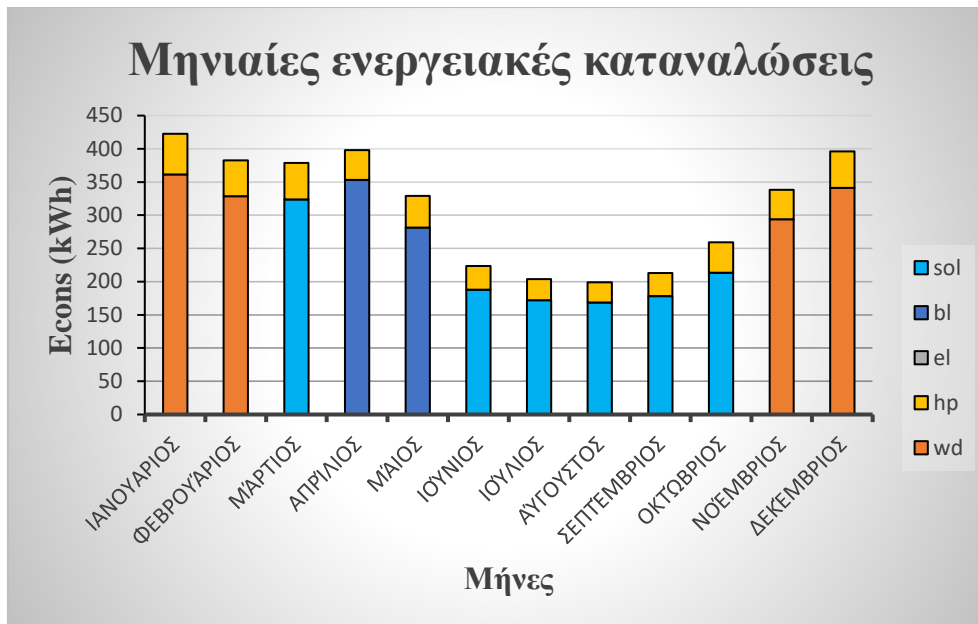


(α)



(β)

**Διάγραμμα 5.7:** Ποσοστό συμμετοχής συστημάτων στις ενεργειακές καταναλώσεις για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.



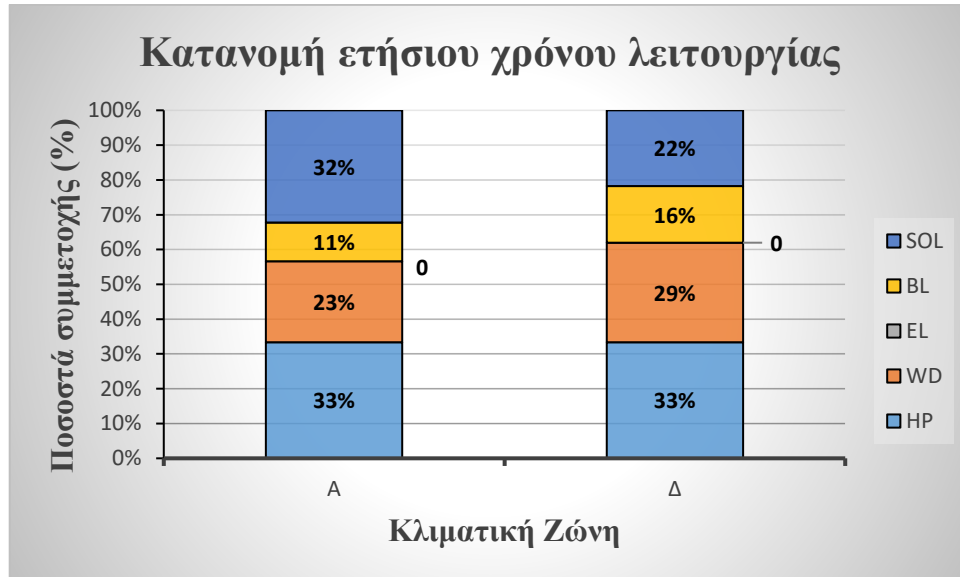
(α)



(β)

**Διάγραμμα 5.8:** Μηνιαίες ενεργειακές καταναλώσεις για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.

Επιπρόσθετα, μπορούν να προκύψουν συγκριτικά διαγράμματα που σχετίζονται με τις συνολικές ώρες λειτουργίας του κάθε συστήματος σε ετήσια βάση, μέσα από τα ποσοστά συμμετοχής του καθενός.



**Διάγραμμα 5.9:** Ποσοστά συμμετοχής ενεργειακών συστημάτων με βάση τις ώρες λειτουργίας τους για τις κλιματικές ζώνες A και Δ.

Κατά παρόμοιο τρόπο, είναι χρήσιμο να αποτυπωθεί και ένα αντίστοιχο μοντέλο, όπου θα απαλείφεται το σύστημα της βιομάζας από την μελέτη. Έτσι, προκύπτει η ακόλουθη μορφή μοντέλου.

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$E_{encost} = \frac{Q_{dem} \cdot cost_{bl}}{n_{bl}} \cdot \varepsilon_{bl} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{el}}{n_{el}} \cdot \varepsilon_{el} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{HP}}{n_{HP}} \cdot \varepsilon_{HP} + \frac{A_{sol} \cdot inct_{sol}}{Y_{sol}} \cdot \varepsilon_{sol} + \frac{P_{bl} \cdot inct_{bl}}{Y_{bl}} \cdot \alpha + \frac{P_{el} \cdot inct_{el}}{Y_{el}} \cdot \beta + \frac{P_{HP} \cdot inct_{HP}}{Y_{HP}} \cdot \gamma \quad (5.11)$$

Περιορισμοί:

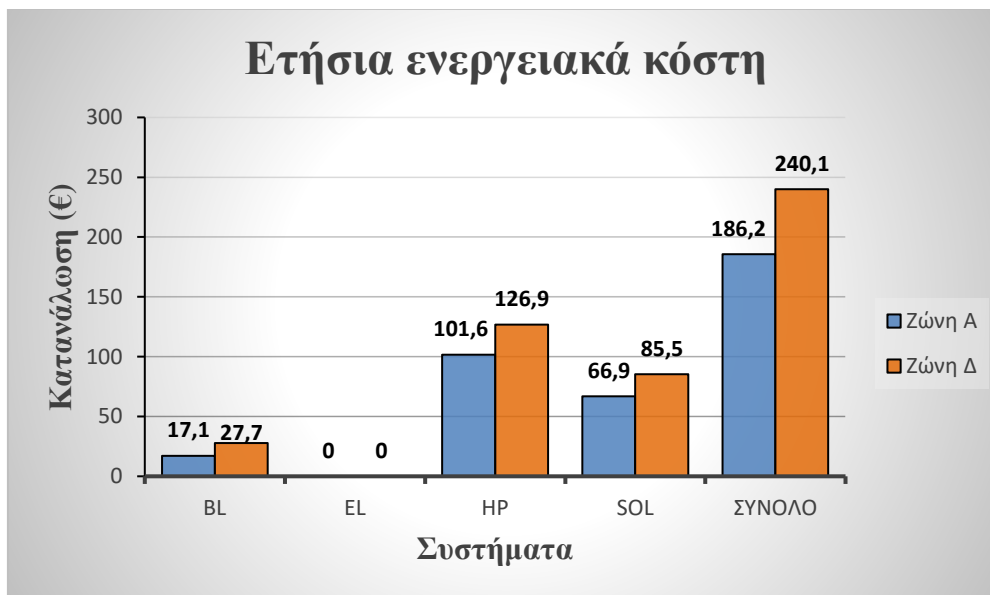
- i.  $\varepsilon_{bl} \leq \alpha, \varepsilon_{el} \leq \beta, \varepsilon_{HP} \leq \gamma$
- ii.  $\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1$
- iii.  $0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1$
- iv.  $\alpha, \beta, \gamma = 0 \text{ ή } 1$  (δυναδικές μεταβλητές)

**Πίνακας 5.2:** Αποτελέσματα ενεργειακού μοντέλου χωρίς λέβητα βιομάζας (ποσοστά συμμετοχής και κόστη για κάθε ώρα του κάθε μήνα) για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.

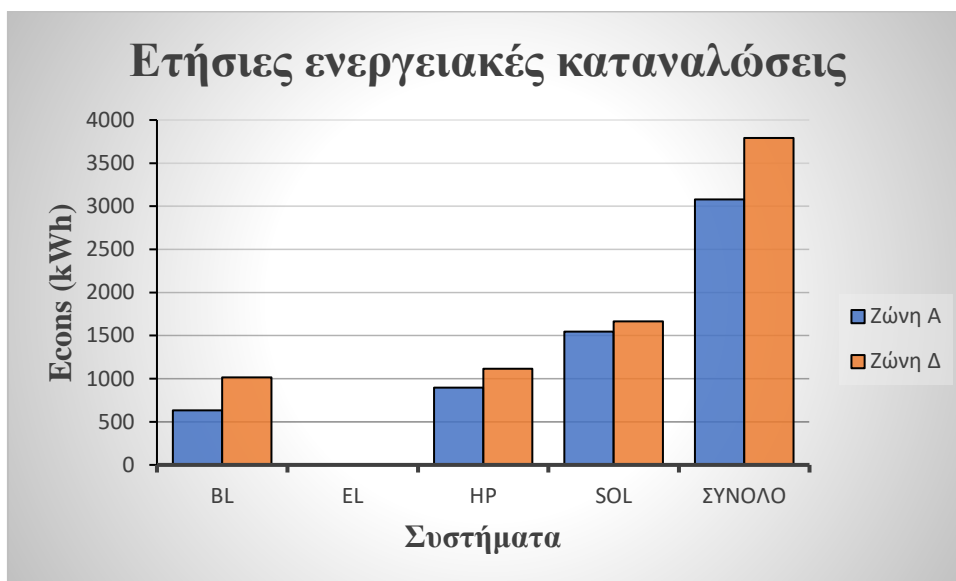
Μήνες	Τιμολόγιο	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)
		Ζώνη Α		Ζώνη Δ	
Ιανουάριος	Κανονικό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0444	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0566
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.01986	$\epsilon_{HP} = 1$	0.253
Φεβρουάριος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.04	$\epsilon_{sol} = 1$	0.056
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.01957	$\epsilon_{HP} = 1$	0.2457
Μάρτιος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.028	$\epsilon_{sol} = 1$	0.038
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.018	$\epsilon_{HP} = 1$	0.022
Απρίλιος	Κανονικό	$\epsilon_{bl} = 1$	0.019	$\epsilon_{bl} = 1$	0.022
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.016	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0187
Μάιος	Κανονικό	$\epsilon_{bl} = 1$	0.016	$\epsilon_{bl} = 1$	0.019
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.013	$\epsilon_{HP} = 1$	0.015
Ιούνιος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.013	$\epsilon_{bl} = 1$	0.017
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.01	$\epsilon_{HP} = 1$	0.012
Ιούλιος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.012	$\epsilon_{sol} = 1$	0.015
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.009	$\epsilon_{HP} = 1$	0.010667
Αύγουστος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.012	$\epsilon_{sol} = 1$	0.017
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.009	$\epsilon_{HP} = 1$	0.01
Σεπτέμβριος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.013	$\epsilon_{sol} = 1$	0.019

	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.01	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.012
Οκτώβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.022	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.033
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.012	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.015
Νοέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.033588	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0415
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.015	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0194
Δεκέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.040235	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0512
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.018	$\varepsilon_{HP} = 1$	0,023

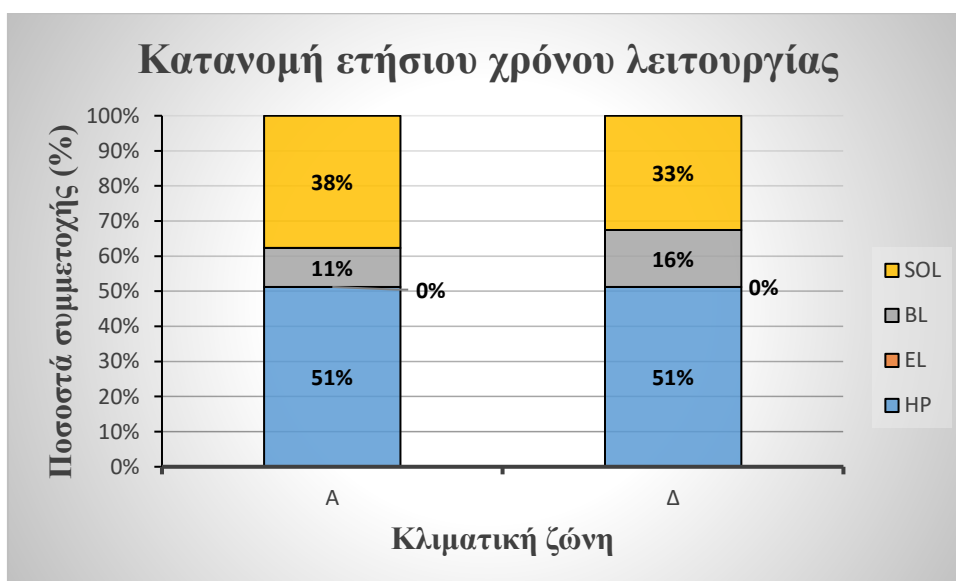
Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται μια ετήσια επισκόπηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το ενεργειακό μοντέλο χωρίς τον λέβητα βιομάζας.



**Διάγραμμα 5.10:** Ετήσια ενεργειακά κόστη για κάθε σύστημα του ενεργειακού μοντέλου χωρίς τη βιομάζα για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.



**Διάγραμμα 5.11:** Ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις για κάθε σύστημα του ενεργειακού μοντέλου χωρίς τη βιομάζα για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.



**Διάγραμμα 5.12:** Ποσοστά συμμετοχής ενεργειακών συστημάτων με βάση τις ώρες λειτουργίας τους για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ.

### 5.3 Περιβαλλοντικό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους

Το περιβαλλοντικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει σκοπό την εύρεση του ποσοστού συμμετοχής των ίδιων πέντε ενεργειακών συστημάτων ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ενός κτηρίου 200 τ.μ. σε ZNX με το ελάχιστο δυνατό περιβαλλοντικό κόστος. Το κόστος αυτό προκύπτει από τιμές κόστους ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνει το κάθε σύστημα ανάλογα με τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα που εκλύονται στο περιβάλλον. Τα περιβαλλοντικά κόστη είναι αρκετά χαμηλά για τα ΑΠΕ συστήματα. Οι τιμές που αναγράφονται στο μοντέλο αναφέρονται σε ωριαία δεδομένα ώστε να είναι περισσότερο λεπτομερής η μελέτη. Ακολουθεί το περιβαλλοντικό μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού.

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$E_{envcost} = y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{wd} + y_3 \cdot \varepsilon_{el} + y_4 \cdot \varepsilon_{hp} + y_5 \cdot \varepsilon_{sol} \quad (5.12)$$

Όπου

- $E_{envcost}$ : Το ελαχιστοποιημένο κόστος που θα προκύψει από το περιβαλλοντικό μοντέλο βελτιστοποίησης.
- $\varepsilon_{bl}, \varepsilon_{wd}, \varepsilon_{el}, \varepsilon_{hp}, \varepsilon_{sol}$ : Οι μεταβλητές απόφασης που εκφράζουν το ποσοστό συμμετοχής του κάθε συστήματος.
- $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$ : Τα ωριαία περιβαλλοντικά κόστη του κάθε συστήματος, που προκύπτουν από τις ενεργειακές καταναλώσεις των συστημάτων.

Περιορισμοί:

- $\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1$
- $0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1$

Από την λύση του γραμμικού αυτού μοντέλου προγραμματισμού μπορούν να προκύψουν τρεις λύσεις. Αυτό συμβαίνει καθώς τα ωριαία περιβαλλοντικά κόστη των συστημάτων βιομάζας και ηλιακών συλλεκτών είναι ίσα. Συνεπώς, το βέλτιστο σύστημα που προκύπτει από το μοντέλο μπορεί να είναι είτε 100% χρησιμοποίηση λέβητα βιομάζας ή 100% ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες ή ποσοστιαία κάλυψη κατά 50% των δύο αυτών συστημάτων ή κάποιος άλλος ποσοστιαίος συνδυασμός. Στην μελέτη αυτή, ωστόσο, γίνεται η παραδοχή της 100% χρήσης των ηλιακών συλλεκτών,

διότι αποτελούν σχετικά νέες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα συνολικά κόστη της κάθε ώρας του κάθε μήνα.

**Πίνακας 5.3:** Αποτελέσματα περιβαλλοντικού μοντέλου (κόστη για κάθε ώρα του κάθε μήνα) για την κλιματική ζώνη Α και Δ.

Μήνες	Ελάχιστο ωριαίο κόστος για κάθε μήνα	Ελάχιστο μηνιαίο κόστος	Ελάχιστο ωριαίο κόστος για κάθε μήνα	Ελάχιστο μηνιαίο κόστος
	Ζώνη Α		Ζώνη Δ	
Ιανουάριος	0.003	2.232	0.003	2.232
Φεβρουάριος	0.003	2.016	0.003	2.016
Μάρτιος	0.002	1.488	0.003	2.232
Απρίλιος	0.002	1.44	0.003	2.16
Μάιος	0.002	1.488	0.002	1.488
Ιούνιος	0.002	1.44	0.002	1.44
Ιούλιος	0.001	0.744	0.002	1.488
Αύγουστος	0.001	0.744	0.002	1.488
Σεπτέμβριος	0.002	1.44	0.002	1.44
Οκτώβριος	0.002	1.488	0.002	1.488
Νοέμβριος	0.002	1.44	0.003	2.16
Δεκέμβριος	0.002	1.488	0.003	2.232
Ετήσιο σύνολο	17.448		21.864	



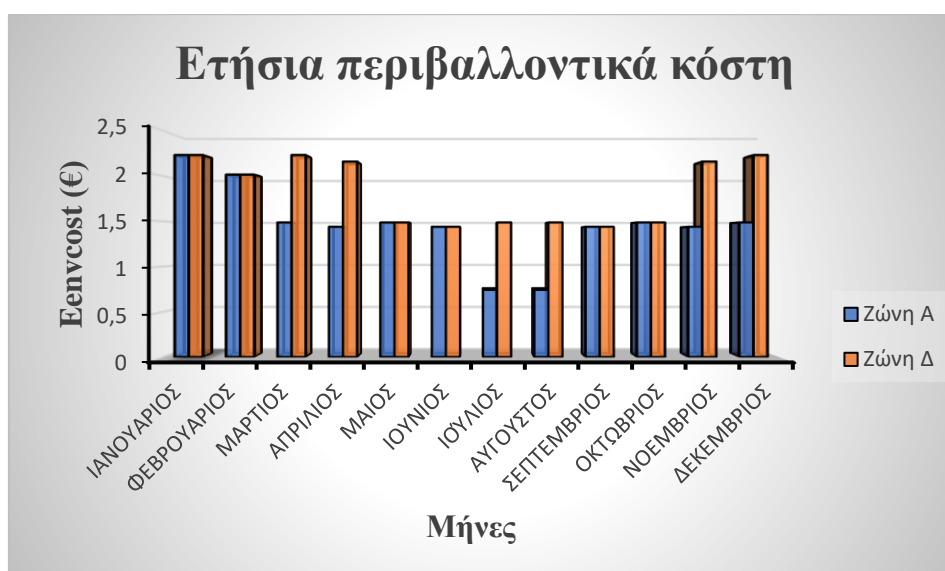
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα προκύπτουν και σε αντίστοιχο μοντέλο όπου αφαιρείται από την μελέτη το σύστημα του λέβητα βιομάζας και για τις δύο κλιματικές ζώνες Α και Δ. Αυτό μπορεί να γίνει καθώς, όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα βιομάζας και συλλέκτη έχουν ισάξια κόστη. Συνεπώς, γίνεται αυτή η παραδοχή και η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$E_{envcost} = y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{el} + y_3 \cdot \varepsilon_{hp} + y_4 \cdot \varepsilon_{sol} \quad (5.13)$$

Περιορισμοί:

- iii.  $\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1$
- iv.  $0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1$



**Διάγραμμα 5.13:** Μηνιαία περιβαλλοντικά κόστη που προκύπτουν από την επίλυση του περιβαλλοντικού μοντέλου για τις δύο κλιματικές ζώνες Α και Δ.

## 5.4 Μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους πολλαπλών κριτηρίων

### 5.4.1 Γενική περιγραφή

Η βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (Multi Objective Optimization, MOP) αποτελεί ένα υποσύνολο της λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (Multiple Criteria Decision Making, MCDM). Το MCDM ασχολείται με προβλήματα στα οποία οι εναλλακτικές λύσεις είναι γνωστές και οι προοπτικές

επίλυσης είναι προς αναζήτηση. Η θεωρία πίσω από το MOP προέρχεται πριν από σχεδόν 50 χρόνια. Το MOP αντιμετωπίζει προβλήματα στα οποία οι εναλλακτικές λύσεις αντιπροσωπεύονται από μεταβλητές απόφασης και περιορισμούς (Singiresu S. Rao, 2009).

Στην συνέχεια περιγράφεται η δομή των προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων ή διαφορετικά πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων.

Αντικειμενική συνάρτηση:

Βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση)  $\bar{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$  (5.14)

Περιορισμοί:

$$h(x) = 0 \quad (5.15)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (5.16)$$

Όπου η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν μαθηματικές συναρτήσεις που περιλαμβάνουν μεταβλητές απόφασης, οι οποίες προκύπτουν από το μοντέλο ως βέλτιστη λύση. Ανάλογα με το εάν οι συναρτήσεις αυτές είναι γραμμικές ή μη γραμμικές, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως γραμμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού.

#### 5.4.2 Μοντέλο χωρίς βαρύτητες

Στην περίπτωση αυτή μελετάται ένα συνολικό μοντέλο που περιέχει τόσο τα ενεργειακά κόστη και κόστη εγκατάστασης, όσο και τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά. Ωστόσο, γίνεται η παραδοχή να μην συνυπολογιστεί το σύστημα του λέβητα βιομάζας, με συνέπεια να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις 5.11 και 5.13. Άρα, το νέο μοντέλο παίρνει την ακόλουθη μορφή.

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\begin{aligned} E_{costs} = & [x_1 \cdot \varepsilon_{bl} + x_2 \cdot \varepsilon_{el} + x_3 \cdot \varepsilon_{hp} + x_4 \cdot \varepsilon_{sol}] + \\ & + [k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma] + \\ & + [y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{el} + y_3 \cdot \varepsilon_{hp} + y_4 \cdot \varepsilon_{sol}] \quad (5.17) \end{aligned}$$

Όπου

- $E_{costs}$ : Το ελαχιστοποιημένο κόστος που θα προκύψει από το μοντέλο βελτιστοποίησης.
- $\varepsilon_{bl}, \varepsilon_{el}, \varepsilon_{hp}, \varepsilon_{sol}$ : Οι μεταβλητές απόφασης που εκφράζουν το ποσοστό συμμετοχής του κάθε συστήματος.
- $\alpha, \beta, \gamma$ : Οι δυαδικές μεταβλητές που ενεργοποιούνται όταν το αντίστοιχο σύστημα εννοείται να χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με το μοντέλο.
- $x_1, x_2, x_3, x_4$ : Τα ωριαία ενεργειακά κόστη του κάθε συστήματος, που προκύπτουν από τις ενεργειακές καταναλώσεις των συστημάτων, όμως το  $x_4$  προκύπτει από την επιφάνεια των θερμικών ηλιακών συλλεκτών που πρόκειται να εγκατασταθούν.
- $y_1, y_2, y_3, y_4$ : Τα ωριαία περιβαλλοντικά κόστη του κάθε συστήματος, που προκύπτουν από τις ενεργειακές καταναλώσεις των συστημάτων.
- $k_1, k_2, k_3$ : Τα ωριαία κόστη εγκατάστασης για κάθε σύστημα, που προκύπτουν από τα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία για 5 ώρες ημερήσιας λειτουργίας.

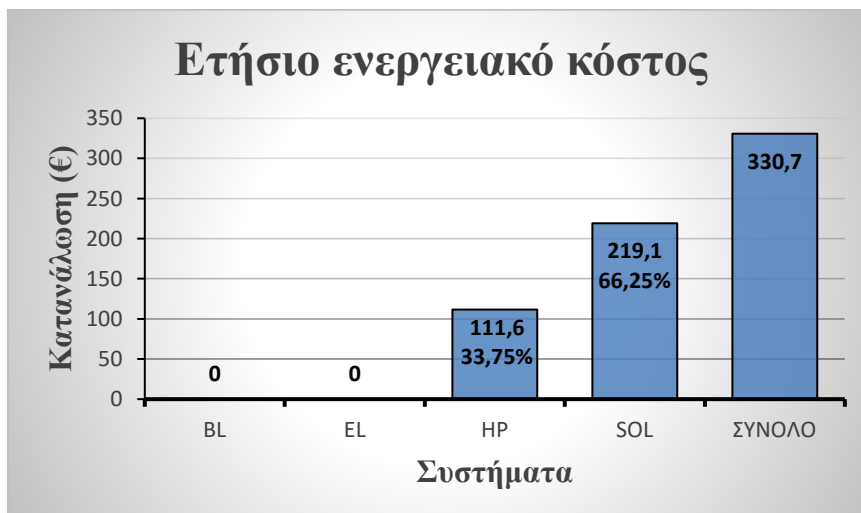
Τα αποτελέσματα από το παραπάνω μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 5.4:** Αποτελέσματα συνολικού μοντέλου χωρίς βαρύτητες (ποσοστά συμμετοχής και κόστη για κάθε ώρα του κάθε μήνα) για την κλιματική ζώνη Δ.

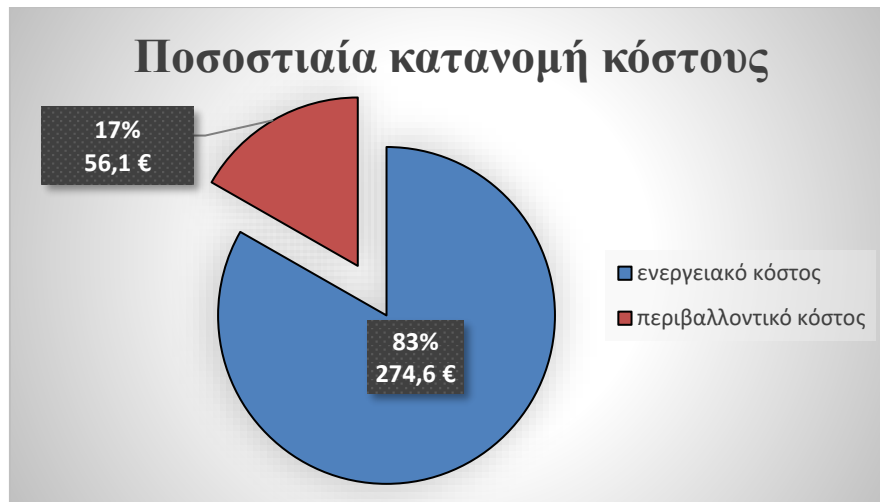
Μήνες	Τιμολόγιο	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)
Ιανουάριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.082
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.04886
Φεβρουάριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.06
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0473
Μάρτιος	Ολικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.041
Απρίλιος	Ολικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.035
Μάιος	Ολικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.026

Ιούνιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.019
Ιούλιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.017
Αύγουστος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.019
Σεπτέμβριος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.021
Οκτώβριος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.036
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.2844
Νοέμβριος	Κανονικό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0572
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0369
Δεκέμβριος	Κανονικό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0446
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.0706

Στο διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνονται τα ετήσια ενεργειακά κόστη για κάθε σύστημα αλλά και συνολικά, καθώς και τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε συστήματος. Επίσης στο διάγραμμα 16 φαίνονται τα ποσοστά που κατατάσσονται τα κόστη με βάση το ενεργειακό και το περιβαλλοντικό μοντέλο.



**Διάγραμμα 5.14:** Ετήσιο ενεργειακό κόστος κατανάλωσης για κάθε σύστημα και ποσοστά συμμετοχής τους για το συνδυαστικό μοντέλο χωρίς βαρύτητες.



**Διάγραμμα 5.15:** Κατανομή κόστους (ενεργειακό – περιβαλλοντικό) για το συνδυαστικό μοντέλο χωρίς βαρύτητες.

### 5.4.3 Μοντέλο με βαρύτητες

Η μέθοδος στάθμισης – βαρύτητας χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει το μη καθορισμένο σύνολο μέσω της αναγνώρισης των ακραίων σημείων κατά μήκος της μη δομημένης επιφάνειας. Μια προσέγγιση του μη καθορισμένου συνόλου σχηματίζεται με τη "σύνδεση" των ακραίων σημείων που εντοπίστηκαν. Η ιδέα των μεθόδων στάθμισης είναι να συσχετίσει κάθε αντικειμενική συνάρτηση με ένα συντελεστή στάθμισης και να ελαχιστοποιήσει το σταθμισμένο άθροισμα των στόχων. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων μετατρέπεται σε μια σειρά προβλημάτων βελτιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα έχει την ακόλουθη μορφή (Singiresu S. Rao, 2009).

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$\text{Βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση)} \quad Z_{mult} = \sum_{i=0}^k (w_i \cdot Z_i) \quad (5.18)$$

Περιορισμοί:

$$h(x) = 0 \quad (5.19)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (5.20)$$

Η θεωρία αναφέρει ότι όταν όλα τα βάρη είναι μεγαλύτερα από το μηδέν τότε η βέλτιστη λύση του σταθμισμένου προβλήματος είναι ένα μη καθορισμένο σύνολο του αρχικού προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά σημαντικά μειονεκτήματα της χρήσης της μεθόδου στάθμισης, μερικά εξ αυτών φαίνονται παρακάτω:

1. Η αναποτελεσματικότητά του που προκύπτει από τον γραμμικό συνδυασμό των αντικειμενικών συναρτήσεων.
2. Η δυσκολία του να ελέγξει την περιοχή της μη καθορισμένης επιφάνειας στην οποία ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων προσδοκά λύση σε μεγάλο βαθμό. Για παράδειγμα, μια μικρή αλλαγή στους συντελεστές βαρύτητας μπορεί να προκαλέσει μεγάλες αλλαγές στις μεταβλητές απόφασης οδηγώντας σε διαφορετικές και μη επιθυμητές λύσεις, ενώ σε άλλες περιπτώσεις μεγάλες αλλαγές μπορεί να μην αλλάξουν καθόλου την λύση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, μπορούν να προστεθούν ποσοστιαίες βαρύτητες ως συντελεστές της οικονομικής εξίσωσης και της αντίστοιχης περιβαλλοντικής, στο μοντέλο της υποενότητας 5.4.1. Οι συντελεστές αυτοί καθορίζουν ποιο κριτήριο (οικονομικό ή περιβαλλοντικό) είναι σημαντικότερο για τον κάθε χρήστη. Στην υποενότητα αυτή μελετώνται δύο σενάρια, το ένα δίνει βαρύτητα 70% στο ενεργειακό και 30% στο περιβαλλοντικό κριτήριο, ενώ στο δεύτερο σενάριο 30% και 70% στο οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίστοιχα, ώστε να φανούν τυχόν διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων. Τα μοντέλα αυτά έχουν την παρακάτω μορφή:

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$E_{costs} = 0.7 \cdot [x_1 \cdot \varepsilon_{bl} + x_2 \cdot \varepsilon_{el} + x_3 \cdot \varepsilon_{hp} + x_4 \cdot \varepsilon_{sol} + k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma] + 0.3 \cdot [y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{el} + y_3 \cdot \varepsilon_{hp} + y_4 \cdot \varepsilon_{sol}] \quad (5.21)$$

Αντικειμενική συνάρτηση:

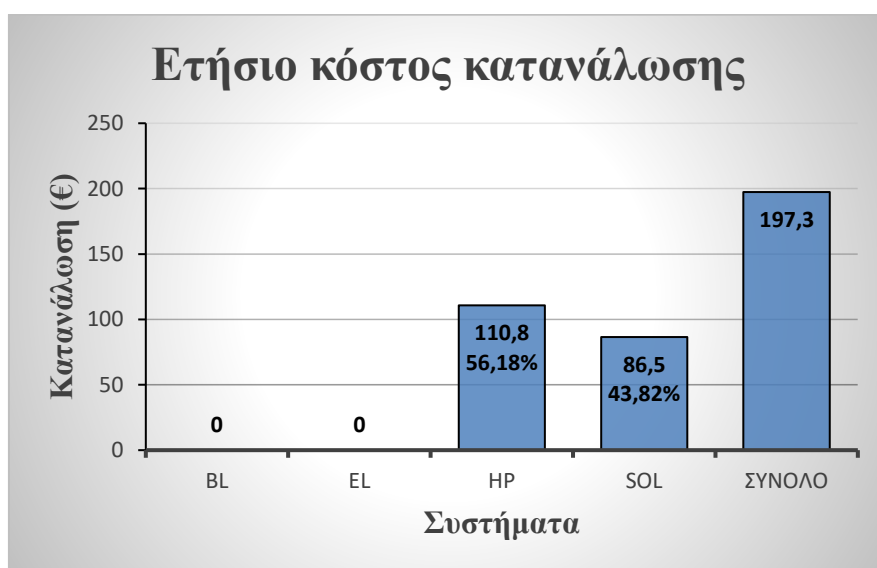
$$E_{costs} = 0.3 \cdot [x_1 \cdot \varepsilon_{bl} + x_2 \cdot \varepsilon_{el} + x_3 \cdot \varepsilon_{hp} + x_4 \cdot \varepsilon_{sol} + k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma] + 0.7 \cdot [y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{el} + y_3 \cdot \varepsilon_{hp} + y_4 \cdot \varepsilon_{sol}] \quad (5.22)$$

Τα αποτελέσματα (ποσοστά συμμετοχής και κόστη για κάθε ώρα του κάθε μήνα) των δύο αυτών σεναρίων αποτυπώνονται στου δύο πίνακες που ακολουθούν.

**Πίνακας 5.5:** Αποτελέσματα μοντέλου με βαρύτητες 70%-30% στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό μέρος αντίστοιχα για την κλιματική ζώνη Δ.

Μήνες	Τιμολόγιο	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)
Ιανουάριος	Κανονικό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0461
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0249
Φεβρουάριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.04
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.024
Μάρτιος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.027
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0216
Απρίλιος	Κανονικό	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.023
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.018
Μάιος	Κανονικό	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.017
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0143
Ιούνιος	Κανονικό	$\varepsilon_{bl} = 1$	0.012
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0114
Ιούλιος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.011
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.01
Αύγουστος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.012
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0098
Σεπτέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.014
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0114
Οκτώβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{sol} = 1$	0.024

	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0147
Νοέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0338
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0189
Δεκέμβριος	Κανονικό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0418
	Νυχτερινό	$\varepsilon_{HP} = 1$	0.0229



**Διάγραμμα 5.16:** Ετήσιο ενεργειακό κόστος κατανάλωσης για κάθε σύστημα και ποσοστά συμμετοχής τους για το συνδυαστικό μοντέλο με βαρύτητες 70%-30%.

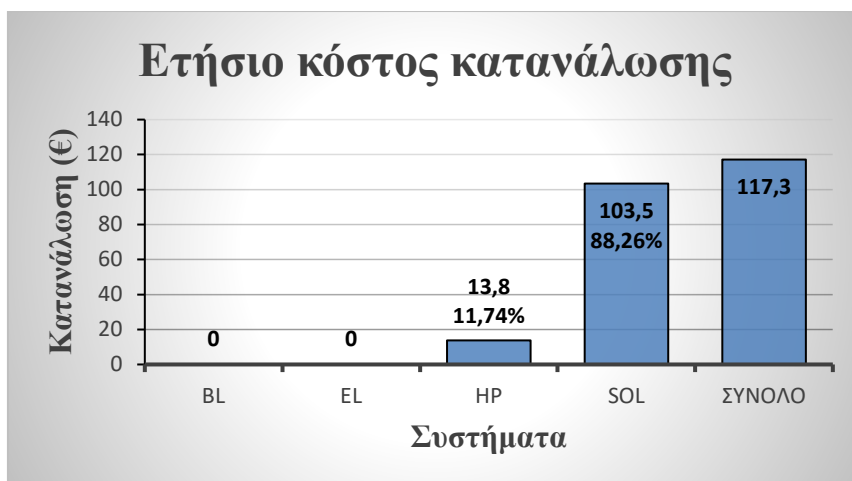


**Διάγραμμα 5.17:** Κατανομή κόστους (ενεργειακό – περιβαλλοντικό) για το συνδυαστικό μοντέλο με βαρύτητες 70%-30%.



**Πίνακας 5.6:** Αποτελέσματα μοντέλου με βαρύτητες 30%-70% στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό μέρος αντίστοιχα για την κλιματική ζώνη Δ.

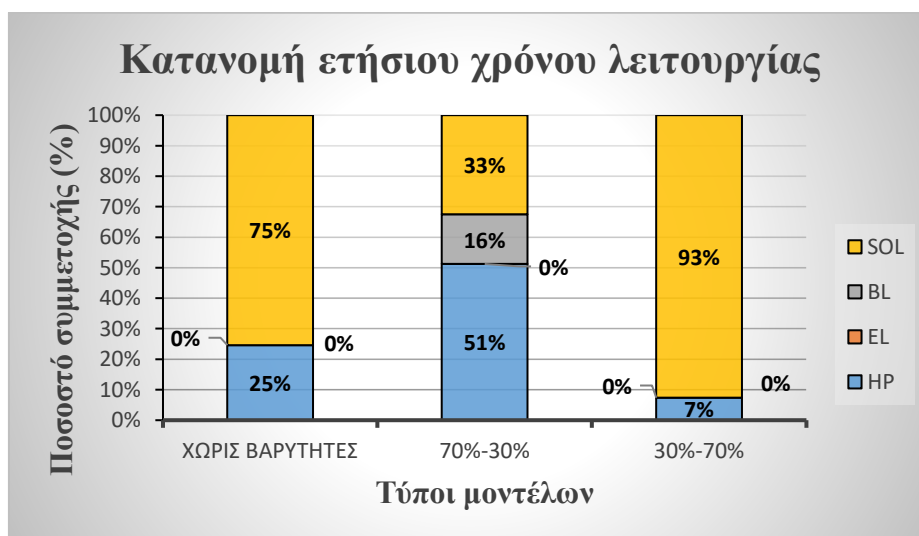
Μήνες	Τιμολόγιο	Ποσοστά συμμετοχής	Ωριαίο κόστος (€)
Ιανουάριος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.026
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.024
Φεβρουάριος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.019
Μάρτιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.013
Απρίλιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.011
Μάιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.009
Ιούνιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.006
Ιούλιος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.006
Αύγουστος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.006
Σεπτέμβριος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.007
Οκτώβριος	Ολικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.012
Νοέμβριος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.02
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.018
Δεκέμβριος	Κανονικό	$\epsilon_{sol} = 1$	0.029
	Νυχτερινό	$\epsilon_{HP} = 1$	0.022



**Διάγραμμα 5.18:** Ετήσιο ενεργειακό κόστος κατανάλωσης για κάθε σύστημα και ποσοστά συμμετοχής τους για το συνδυαστικό μοντέλο με βαρύτητες 30%-70%.



**Διάγραμμα 5.19:** Κατανομή κόστους (ενεργειακό – περιβαλλοντικό) για το συνδυαστικό μοντέλο με βαρύτητες 30%-70%.



**Διάγραμμα 5.20:** Κατανομή χρόνου λειτουργίας για τα μοντέλα πολλαπλών κριτηρίων.

## Κεφάλαιο 6: Βελτιστοποίηση Goal programming

---

### 6.1 Εισαγωγικές έννοιες του προγραμματισμού στόχου

Ο προγραμματισμός στόχου (Goal Programming, GP) είναι ένας κλάδος της βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, ο οποίος με τη σειρά του αποτελεί έναν άλλον κλάδο της ανάλυσης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDA), επίσης γνωστό ως πολλαπλά κριτήρια λήψης αποφάσεων (MCDM). Το Goal Programming είναι ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης και μπορεί να θεωρηθεί ως μια επέκταση ή γενίκευση του γραμμικού προγραμματισμού που μπορεί να χειριστεί πολλαπλάσιο αριθμό ακόμη και αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων. Σε κάθε μια από αυτές δίνεται μια τιμή στόχου, η οποία πρέπει να επιτευχθεί. Στη συνέχεια οι ανεπιθύμητες αποκλίσεις από αυτό το σύνολο τιμών στόχων ελαχιστοποιούνται σε μια νέα αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή μπορεί να είναι ένα διάνυσμα ή ένας σταθμισμένος παράγοντας που εξαρτάται από την παραλλαγή προγραμματισμού στόχου που χρησιμοποιείται. Δεδομένου ότι η ικανοποίηση του στόχου θεωρείται ότι ικανοποιεί τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων, θεωρείται μια υποκείμενη φιλοσοφία ικανοποίησης. Το Goal Programming χρησιμοποιείται για την εκτέλεση τριών τύπων ανάλυσης:

1. Τον καθορισμό των απαιτούμενων περιορισμών για την επίτευξη ενός επιθυμητού συνόλου στόχων.
2. Τον καθορισμό του βαθμού επίτευξης των στόχων με βάση τους διαθέσιμους πόρους που καλύπτονται μέσω περιορισμών.
3. Την παροχή της βέλτιστης λύσης ικανοποιώντας ένα σύνολο περιορισμών και προτεραιοτήτων των στόχων.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του Goal Programming σε σύγκριση με άλλες τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι σε αυτή τη περίπτωση αντιμετωπίζονται πραγματικά προβλήματα απόφασης και λαμβάνονται αρκετά επιθυμητά αποτελέσματα. Με το Goal Programming συνυπολογίζονται στο τελικό μοντέλο των στόχων πολυάριθμοι τομείς, όπως περιβαλλοντικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί κ.α. αποτελώντας έτσι ένα βελτιωμένο μοντέλο ανάλυσης πολλών πραγματικών προβλημάτων.

Το μοντέλο του Goal Programming σχηματίζεται και εισάγεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στα μοντέλα του γραμμικού προγραμματισμού, με μόνη διαφορά ότι οι

πληροφορίες των αντικειμενικών συναρτήσεων εισάγονται στην επιθυμητή προτεραιότητα. Μια ακόμη προσέγγιση του Goal Programming είναι ο καθορισμός των στόχων ως περιορισμούς προσθετικά στους κανονικούς περιορισμούς του προβλήματος. Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση καθορίζεται με την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων από τους στόχους. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται μέσα από την αντικειμενική συνάρτηση μπορούν να διαθέτουν συντελεστές βάρους ανάλογα με τις προτεραιότητες που τίθενται σύμφωνα με τους επιθυμητούς στόχους. Το πρόβλημα αυτό λύνεται σαν πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με χρήσιμη την ανάλυση ευαισθησίας.

Ως εκ τούτου, το Goal Programming είναι ένα από τα μαθηματικά εργαλεία, σχεδιασμένα σε ένα πλαίσιο για την επίλυση προβλημάτων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων σε διάφορους τομείς για τη λήψη μιας αποτελεσματικής, έγκαιρης και ακριβής απόφασης. Εδώ και πέντε δεκαετίες έχουν γίνει πολλές έρευνες σχετικά με το πεδίο του Goal Programming ώστε να προκύψει μια διαυγής εικόνα αυτού του εργαλείου για την κατανόηση της τεχνικής που ακολουθείται και την προσαρμογή της στους βιομηχανικούς τομείς. Υπάρχουν και παραλλαγές του μοντέλου: (i) Weighted Goal Programming, (ii) Lexicographic Goal Programming, και (iii) Chebyshev Goal Programming. Από αυτά, παρακάτω αναλύεται το κλασικό και το μοντέλο με τις βαρύτητες (Jason Papathanasiou & Nikolaos Ploskas, 2017).

### 6.1.1 Κλασικό Goal Programming

Η διατύπωση του προβλήματος του Goal Programming είναι παρόμοια με αυτή των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Σύμφωνα με τους Charnes και (Cooper Charnes, A., Cooper, W.W., 1981) το Goal Programming επεκτείνει τη διατύπωση γραμμικού προγραμματισμού για να συμπεριλάβει τον μαθηματικό προγραμματισμό των πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, πράγμα το οποίο μελετήθηκε από τον Ijiri (Ijiri, Y., 1965). Οι μεγαλύτερες διαφορές είναι η ρητή εξέταση των στόχων και της ποικιλίας των προτεραιοτήτων που συνδέονται με τους διαφορετικούς στόχους.

Η αντικειμενική συνάρτηση του Goal Programming πρέπει πάντα να ελαχιστοποιείται και να αποτελείται από τις μεταβλητές απόκλισης και από τους στόχους. Βέβαια, στη συνολική διαμόρφωση του προβλήματος υπάρχουν δύο τύποι μεταβλητών, οι μεταβλητές απόφασης και οι μεταβλητές απόκλισης, μέσω των οποίων

διατυπώνονται αντίστοιχα οι δομικοί περιορισμοί (αυστηροί περιορισμοί γραμμικού προγραμματισμού) και οι περιορισμοί των στόχων. Οι περιορισμοί των στόχων αποτελούν εκφράσεις των αρχικών αντικειμενικών συναρτήσεων με τους στόχους, τις προτεραιότητες και τις μεταβλητές απόφασης.

Το μοντέλο του Goal Programming μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως προς τον τρόπο με τον οποίο οι στόχοι έχουν ισχυρά συγκρίσιμη σημασία, ο προγραμματισμός στόχων είναι γνωστός ως μη προληπτικός. Σε περιπτώσεις προγραμματισμού προληπτικών στόχων, οι στόχοι έχουν επίπεδα προτεραιότητας. Οι στόχοι κατατάσσονται από τον πιο σημαντικό (στόχος 1) στο λιγότερο σημαντικό (στόχος m) και ο συντελεστής αντικειμενικής συνάρτησης που αποδίδεται για την μεταβλητή απόκλισης όπου παρουσιάζεται ο στόχος είναι το  $p_i$ . Αυτός είναι ένας βολικός τρόπος να υποδείξουμε ότι ένας στόχος είναι περισσότερο σημαντικός από το άλλο. Αυτοί οι συντελεστές δείχνουν ότι το βάρος του στόχου 1 είναι πολύ μεγαλύτερο για την αξία ή το κόστος ενός άλλου στόχου ή ενός δευτερεύοντος στόχου, αλλά συχνά μπορεί να καθορίσει το ανώτερο ή το χαμηλότερο όριό του. Ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων μπορεί να καθορίσει την προτεραιότητα της επιθυμητής επίτευξης κάθε στόχου ή ενός δευτερεύοντος στόχου και την κατάταξη των προτεραιοτήτων σε μια κανονική ακολουθία. Προφανώς, δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί κάθε στόχος στο βαθμό που είναι επιθυμητό. Έτσι, με ή χωρίς το Goal Programming, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων αποδίδει κάποια προτεραιότητα στην επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου. Η πραγματική αξία του Goal Programming, επομένως, είναι η συμβολή στην επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων που αφορούν πολλαπλούς και αντικρουόμενους στόχους.

Οι Charnes και Cooper (1976) παρουσίασαν το γενικό μοντέλο του Goal Programming με την ακόλουθη μαθηματική διατύπωση.

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$\text{Minimize: } z = \sum_{i=1}^m (n_i^+ + p_i^-) \quad (6.1)$$

Περιορισμοί των στόχων:

$$\sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot x_j - n_i^+ + p_i^- = b_i), \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \quad (6.2)$$

Περιορισμοί του συστήματος:

$$\sum_{j=1}^n \left( a_{ij} \cdot x_j \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_i \right), \text{ για } i = m + 1, m + 2, \dots, m + p \quad (6.3)$$

Τα παραπάνω ισχύουν για:

$$n_i^-, p_i^+, x_j \geq 0, \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \text{ και } j = 1, 2, \dots, n$$

Όπου δηλαδή υπάρχουν  $m$  στόχοι,  $p$  περιορισμοί του συστήματος και  $n$  μεταβλητές απόφασης.

Στη συνέχεια εξηγούνται οι συμβολισμοί των μεταβλητών.

- $z$ : Αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή είναι το αλγεβρικό άθροισμα των μεταβλητών απόκλισης, το οποίο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.
- $a_{ij}$ : Ο συντελεστής που σχετίζεται με την μεταβλητή  $j$  του  $i$  στόχου.
- $x_j$ : Μεταβλητή απόφασης.
- $n_i^-$ : Μεταβλητή αρνητικής απόκλισης από τον  $i$  στόχο (υποκάλυψη).
- $p_i^+$ : Μεταβλητή θετικής απόκλισης από τον  $i$  στόχο (υπερκάλυψη).

Η υπέρ και υπό κάλυψη ενός στόχου δεν μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα, εντούτοις είτε η μια είτε και οι δύο αυτές μεταβλητές πρέπει να έχουν μηδενική τιμή τέτοια ώστε να ικανοποιείται η σχέση:

$$n_i^- \times p_i^+ = 0 \quad (6.4)$$

Βέβαια και οι δύο αυτές μεταβλητές απόκλισης πρέπει να είναι μη αρνητικές, όπως άλλωστε και κάθε άλλη μεταβλητή στον γραμμικό προγραμματισμό, οπότε θα πρέπει να ισχύει:

$$n_i^-, p_i^+ \geq 0 \quad (6.5)$$

Ένα κλασικό πρόβλημα Goal Programming διαθέτει  $n$  μεταβλητές απόφασης  $x = x_1, x_2, \dots, x_n$  και  $m$  στόχους, ο καθένας από τους οποίους έχει μια τιμή που πρέπει να προσεγγίσει,  $f_i(x)$  με  $i=1, 2, \dots, m$  ανάλογα με κάποιο σχετικό κριτήριο που πρέπει να καλύπτεται. Φυσικά η τιμή αυτή αποτελεί συνάρτηση των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος. Ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κάθε φορά, τίθεται και μια τιμή – στόχος  $b_i$  για κάθε στόχο, έτσι ο κάθε στόχος διαμορφώνεται ως εξής:

$$f_i(x) + n_i^- - p_i^+ = b_i \quad (6.6)$$

Όπου

- $n_i$ : μεταβλητή αρνητικής απόκλισης του  $i$  στόχου.
- $p_i$ : μεταβλητή θετικής απόκλισης του  $i$  στόχου.

Μια μεταβλητή απόκλισης καταγράφει την διαφορά μεταξύ του επιπέδου της τιμής – στόχου και της βέλτιστης τιμής που θα λάμβανε από την λύση. Όταν η τιμή είναι χαμηλότερη από τον στόχο, τότε η διαφορά αυτή αντιπροσωπεύεται από την αρνητική μεταβλητή απόκλισης, ενώ αν είναι υψηλότερη, τότε αντιπροσωπεύεται από την θετική μεταβλητή απόκλισης. Πιο αναλυτικά, η αρνητική μεταβλητή απόκλισης δείχνει το επίπεδο όπου ο επιθυμητός στόχος υπό επιτυχάνεται, ενώ η θετική μεταβλητή απόκλισης δείχνει το αντίστοιχο επίπεδο όπου ο επιθυμητός στόχος υπέρ επιτυχάνεται.

Για κάθε στόχο είναι απαραίτητο να λαμβάνονται οι μεταβλητές απόκλισης, πράγμα το οποίο καθορίζεται από τον τύπο του στόχου που πρόκειται να προσεγγιστεί. Στη συνέχεια παρατίθενται τρία είδη στόχων:

1. Μη υπέρ επιτυγχανόμενοι στόχοι, οι οποίοι στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ισοδυναμούν με την ανισότητα « $\leq$ ». Για παράδειγμα, ένας στόχος που περιλαμβάνει κόστος βρίσκεται σε αυτή την κατηγορία. Σε αυτούς τους στόχους, η θετική μεταβλητή απόκλισης,  $p$ , επιβαρύνεται στην αντικειμενική συνάρτηση.
2. Μη υπό επιτυγχανόμενοι στόχοι, οι οποίοι στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ισοδυναμούν με την ανισότητα « $\geq$ ». Για παράδειγμα, ένας στόχος που περιλαμβάνει κέρδος βρίσκεται σε αυτή την κατηγορία. Σε αυτούς τους στόχους, η αρνητική μεταβλητή απόκλισης,  $n$ , επιβαρύνεται στην αντικειμενική συνάρτηση.
3. Στόχοι που δεν πρέπει να είναι είτε ανεπαρκώς επιτευχθέντες είτε υπερβολικά επιτευχθέντες. Αυτοί οι στόχοι είναι οι ισοδύναμοι περιορισμοί ισότητας στον γραμμικό προγραμματισμό. Για παράδειγμα, ένας στόχος που αφορά την απασχόληση βρίσκεται σε αυτή την κατηγορία. Σε αυτούς τους στόχους, τόσο οι αρνητικές όσο και οι θετικές μεταβλητές απόκλισης εμφανίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση.

Μετά την εύρεση του τύπου του κάθε στόχου, η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min h(n, p) \quad (6.7)$$

Όπου  $n$  είναι το διάνυσμα των  $m$  αρνητικών μεταβλητών απόκλισης και  $p$  είναι το διάνυσμα των  $m$  θετικών μεταβλητών απόκλισης

Στο πρόβλημα Goal Programming υπάρχουν δύο τύποι περιορισμών, οι χαλαροί περιορισμοί και οι αυστηροί περιορισμοί. Ένας χαλαρός περιορισμός αντιπροσωπεύει έναν στόχο στον οποίο προστίθενται μεταβλητές απόκλισης για να μετράται η διαφορά μεταξύ των στόχων και της τιμής που δίνει η λύση. Ένας αυστηρός περιορισμός αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό για την ύπαρξη λύσεων στο πρόβλημα. Συνεπώς, είναι σημαντικό να καθοριστεί ποιοι περιορισμοί είναι χαλαροί, καθώς αυτοί αποτελούν τους στόχους που πρέπει να επιτυγχάνονται και ποιοι περιορισμοί είναι αυστηροί, που είναι απαραίτητοι για να καθίσταται δυνατή η λύση του προβλήματος και λαμβάνουν την εξής μαθηματική περιοριστική μορφή:

$$x \in F$$

Με το  $F$  να αποτελεί το φυσικό σύνολο αριθμών όπου ικανοποιούνται όλοι οι αυστηροί περιορισμοί αλλά και οι περιορισμοί ορίων, οι οποίοι περιορίζουν τις μεταβλητές απόφασης και απόκλισης να παίρνουν συγκεκριμένες τιμές μέσα στο επιτρεπόμενο σύνολο τιμών. Για παράδειγμα στα περισσότερα προβλήματα οι μεταβλητές αυτές πρέπει να είναι μη αρνητικές και συνεχείς (Jason Papathanasiou & Nikolaos Ploskas, 2017).

Συνοψίζοντας, ένα πρόβλημα Goal Programming διαμορφώνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Καθορισμός αν ένας περιορισμός είναι αυστηρός ή χαλαρός.
2. Προσθήκη μιας θετικής και μιας αρνητικής μεταβλητής απόκλισης σε κάθε περιορισμό και κατάλληλη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης.
3. Ο κάθε αυστηρός περιορισμός γράφεται στο πρόβλημα ως έναν περιορισμό σε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.
4. Προσθήκη περιορισμού ορίων στο πρόβλημα όταν αυτό απαιτείται.



### 6.1.2 Weighted Goal Programming

Σε αυτή την υπόενοτητα παρουσιάζεται μια παραλλαγή της μεθόδου Προγραμματισμού Στόχου που ονομάζεται σταθμισμένος Προγραμματισμός στόχων ή μπορεί επίσης να βρεθεί στη βιβλιογραφία ως non-preemptive Goal Programming. Η κύρια ιδέα αυτής της παραλλαγής είναι να επιβάλλει συντελεστές βαρύτητας στις ανεπιθύμητες μεταβλητές απόκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτά τα βάρη αποτελούνται από δύο μέρη:

1. Την σημασία της επιβάρυνσης σε κάθε μεταβλητή απόκλιση. Δηλώνοντας ως  $u_i$  το βάρος που σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του  $n_i$ , ενώ  $v_i$  είναι το βάρος που σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του  $p_i$ , όπου  $i = 1, 2, \dots, m$ . Αυτά τα βάρη δείχνουν τη σχετική σημασία της ελαχιστοποίησης μιας μεταβλητής απόκλισης. Είναι σημαντικό ότι οι αποκλίνουσες μεταβλητές των οποίων η ελαχιστοποίηση είναι ασήμαντη, όπως για παράδειγμα η μεταβλητή αρνητικής απόκλισης ενός στόχου για το κόστος, όπου αποδίδεται ένα βάρος ίσο με 0.
2. Μια σταθερά κανονικοποίησης ( $k_i$ ) προκειμένου να εξασφαλιστεί η αντιστοιχία των στόχων. Αυτοί οι παράγοντες είναι απαραίτητοι προκειμένου να κλιμακωθούν όλοι οι στόχοι στις ίδιες μονάδες μέτρησης.

Μια απλή διατύπωση του προβλήματος Weighted Goal Programming είναι η ακόλουθη:

Αντικειμενική συνάρτηση:

Βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση)

$$Z_{mult} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{(u_i \cdot n_i)}{k_i} + \frac{(v_i \cdot p_i)}{k_i} \right) \quad (6.8)$$

Περιορισμοί:

$$f_i(x) + n_i + p_i = b_i \quad (6.9)$$

$$x \in F$$

$$n_i, p_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

Το παραπάνω μοντέλο προγραμματισμού στόχου είναι παρόμοιο με τον κλασικό πρόβλημα προγραμματισμού στόχων με μόνη διαφορά την αντικειμενική συνάρτηση. Τα περισσότερα βήματα που ακολουθούνται για την δημιουργία του

σταθμισμένου προβλήματος προγραμματισμού στόχων είναι παρόμοια με αυτά του κλασικού μοντέλου. Ωστόσο, απαιτείται ένα επιπλέον βήμα, το οποίο αφορά την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων. Ο αριθμητής του βάρους επιλέγεται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να απεικονίσει τη σημασία της βαρύτητας σε κάθε μεταβλητή απόκλισης. Στη συνέχεια, θα πρέπει να επιλεγεί μια σταθερά κανονικοποίησης. Υπάρχουν πολλές τεχνικές κανονικοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρόβλημα σταθμισμένου προγραμματισμού στόχων. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα εξής:

1. Ποσοστιαία κανονικοποίηση: Σε αυτή τη μέθοδο κανονικοποίησης, ο παρονομαστής,  $k_i$ , είναι ίσος με την τιμή της δεξιάς πλευράς του σχετικού στόχου. Κάθε μεταβλητή απόκλισης μετατρέπεται σε ποσοστιαία τιμή μακριά από την τιμή-στόχο της. Ως εκ τούτου, όλες οι αποκλίσεις μετρώνται στις ίδιες μονάδες. Η ποσοστιαία κανονικοποίηση είναι απλή και ευθύς, ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει κάποια παραμόρφωση όταν ένα υποσύνολο των στόχων μετράται στις ίδιες μονάδες.
2. Κανονικοποίηση μηδέν και ένα: Σε αυτή τη μέθοδο κανονικοποίησης, οι μεταβλητές απόκλισης κλιμακώνονται σε ένα εύρος μηδέν-ένα. Η τιμή μηδέν αντιπροσωπεύει μηδενική απόκλιση, ενώ η μοναδιαία τιμή αντιπροσωπεύει τη χειρότερη δυνατή απόκλιση. Η τελευταία τιμή είναι ο παρονομαστής που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου κανονικοποίησης. Για να βρεθεί αυτή η τιμή πρέπει να λυθεί ένα ενιαίο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού μεγιστοποίησης στόχου για κάθε στόχο. Η αντικειμενική τιμή θα είναι η χειρότερη δυνατή απόκλιση για αυτόν τον στόχο. Αν ένα τέτοιο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού δεν έχει όρια, τότε ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να επιλέξει μια ρεαλιστική εκτίμηση του παρονομαστή. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής: (i) απαιτεί την επίλυση  $m$  προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού για να βρεθεί η χειρότερη απόκλιση για κάθε στόχο, και (ii) σε παραδείγματα με στόχους χωρίς όρια, μπορεί να υποφέρει από το πρόβλημα αναξιόπιστων τιμών που επιλέγονται κάθε φορά.
3. Ευκλείδεια κανονικοποίηση: Σε αυτή τη μέθοδο κανονικοποίησης, ο παρονομαστής,  $k_i$ , είναι ίση με τον Ευκλείδειο μέσο όρο των τεχνικών συντελεστών του αντίστοιχου στόχου. Για παράδειγμα, ο παρονομαστής

$K_1$  ενός στόχου του τύπου  $2x_1 + 4x_2 + n_1 - p_1 = 600$ , θα είναι ίσος με  $\sqrt{2^2 + 4^2} = \sqrt{20}$ . Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα ακόλουθα: (i) αυτή η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη τις τιμές της δεξιάς πλευράς των στόχων και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σχετικά χαμηλές τιμές των παραγόντων κανονικοποίησης και (ii) όταν αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ομαλοποίηση των αποκλίσεων, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν έχει καμία προφανή έννοια.

## 6.2 Μοντέλα προγραμματισμού στόχου (Goal programming)

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η περιγραφή και διατύπωση των μοντέλων και των τεσσάρων παραλλαγών του goal programming, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, για το σύνθετο πρόβλημα που περιλαμβάνει το ενεργειακό και περιβαλλοντικό μοντέλο. Σε κάθε υποενότητα που ακολουθεί δίνονται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε μια περίπτωση.

### 6.2.1 Μοντέλο Goal Programming

Στην υποενότητα αυτή αναπτύσσεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης, βασισμένο στις αρχές του goal programming, για να αναδείξει τα ποσοστά συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX, ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελαχιστοποιημένο. Στο μοντέλο αυτό περιλαμβάνονται δύο στόχοι, οι οποίοι θα πρέπει να επιτευχθούν κατά μια βέλτιστη προοπτική. Ο πρώτος στόχος αφορά τα ενεργειακά κόστη και περιγράφεται από την εξίσωση 6.10 που ακολουθεί, η οποία είναι ίδια με την αντικειμενική συνάρτηση της ενότητας 5.2. Ο δεύτερος στόχος αφορά τα περιβαλλοντικά κόστη, όπως η εξίσωση που αναπτύχθηκε στην ενότητα 5.3. Οι στόχοι αυτοί συνοψίζονται στις δύο παρακάτω σχέσεις και είναι σημαντικό να αναφερθούν δύο παραδοχές. Αρχικά, στους δύο αυτούς στόχους δεν περιλαμβάνεται το σύστημα του λέβητα βιομάζας, καθώς, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, το περιβαλλοντικό μοντέλο έθετε ισάξια χρησιμοποίηση του λέβητα βιομάζας και του θερμικού ηλιακού συλλέκτη. Επιπλέον, το νέο αυτό πρόβλημα και κατ' επέκταση και οι στόχοι του αφορούν ωριαίες τιμές του κάθε μήνα για ολόκληρο το έτος, συνεπώς οι τιμές των συντελεστών κόστους είναι σε ευρώ ανά ώρα. Για κάθε ώρα λοιπόν αναπτύσσεται και ένα διαφορετικό μοντέλο, το οποίο κάθε φορά δίνει και μια διαφορετική λύση.

$$E_{encost} = x_1 \cdot \varepsilon_{bl} + x_2 \cdot \varepsilon_{el} + x_3 \cdot \varepsilon_{hp} + x_4 \cdot \varepsilon_{sol} + k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma \quad (6.10)$$

$$E_{envcost} = y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{el} + y_3 \cdot \varepsilon_{hp} + y_4 \cdot \varepsilon_{sol} \quad (6.11)$$

Όπου

$E_{encost}, E_{envcost}$ : Τα βέλτιστα ωριαία κόστη όπως αυτά προέκυψαν από τα γραμμικά μοντέλα των αντίστοιχων ενοτήτων και οι τιμές τους φαίνονται στους πίνακες 5.2 και 5.3 αντίστοιχα.

Το μοντέλο του προγραμματισμού στόχων προσπαθεί να εντοπίσει μια συμβιβαστική λύση, μετατρέποντας τις δύο αυτές ισότητες σε ευέλικτους στόχους, μέσω της εισαγωγής των μεταβλητών απόκλισης, και θέτοντάς τους ως περιορισμούς σε ένα πρόβλημα όπου η αντικειμενική συνάρτηση θα προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει αυτές τις μεταβλητές απόκλισης. Οι ευέλικτοι αυτοί στόχοι διατυπώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} x_1 \cdot \varepsilon_{bl} + x_2 \cdot \varepsilon_{el} + x_3 \cdot \varepsilon_{hp} + x_4 \cdot \varepsilon_{sol} + k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma + n_1^- - p_1^+ \\ = E_{encost} \quad (6.12) \end{aligned}$$

$$y_1 \cdot \varepsilon_{bl} + y_2 \cdot \varepsilon_{el} + y_3 \cdot \varepsilon_{hp} + y_4 \cdot \varepsilon_{sol} + n_2^- - p_2^+ = E_{envcost} \quad (6.13)$$

Φυσικά, ισχύουν και οι υπόλοιποι περιορισμοί για τις μεταβλητές απόφασης, όπως ακριβώς και στα προηγούμενα προβλήματα.

$$\varepsilon_{bl} \leq \alpha, \varepsilon_{el} \leq \beta, \varepsilon_{HP} \leq \gamma$$

$$0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1$$

$$0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1$$

$$0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1$$

$$0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1$$

$$\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{sol} = 1$$

Οι μη αρνητικές μεταβλητές απόκλισης  $n_i^-, p_i^+ \geq 0, i = 1, 2$  αναπαριστούν τις αποκλίσεις κάτω (αρνητικές) και πάνω (θετικές) από το δεξί μέλος του εκάστοτε περιορισμού. Επίσης, οι μεταβλητές αυτές δεν υπόκεινται στην κατηγορία των βασικών μεταβλητών ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, αλλά είναι εξ ορισμού εξαρτημένες μεταβλητές. Αυτό σημαίνει ότι το πολύ μια από τις δύο αυτές μεταβλητές απόκλισης μπορεί να λάβει θετική τιμή. Ουσιαστικά ο ορισμός των  $n_i^-, p_i^+$  επιτρέπει την ικανοποίηση ή την παραβίαση του αντίστοιχου περιορισμού κατά βούληση.

Δεδομένου ότι οι περιορισμοί είναι τύπου « = » όλες οι μεταβλητές απόκλισης αναπαριστούν τις ποσότητες κατά τις οποίες παραβιάζονται οι στόχοι. Επομένως, το μοντέλο προγραμματισμού στόχου αναζητά μια συμβιβαστική λύση όπου όλες αυτές οι μεταβλητές θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται σε μια αντικειμενική συνάρτηση, η οποία έχει την μορφή που φαίνεται παρακάτω.

$$\min z = n_1^- + p_1^+ + n_2^- + p_2^+ \quad (6.14)$$

**Πίνακας 6.1:** Ποσοστά συμμετοχής ανά ώρα σε μια μέρα του κάθε μήνα του μοντέλου goal programming.

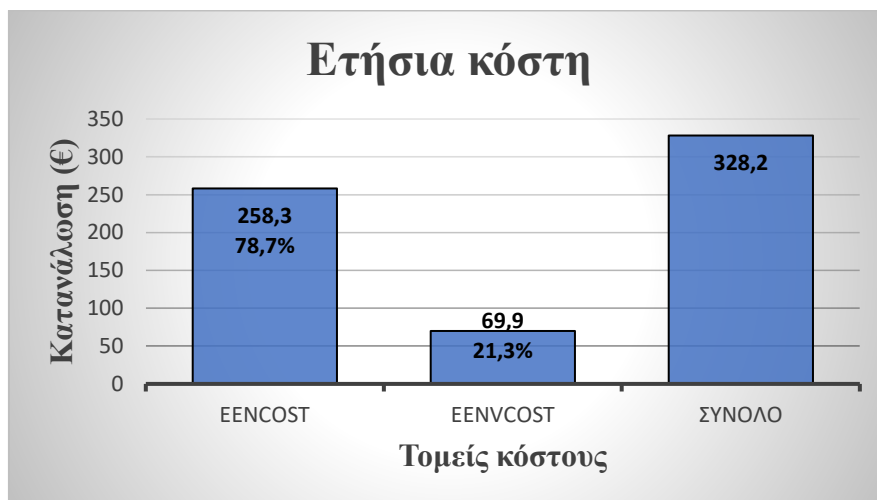
Ωρες	Μήνες									
	1	2	3	4	5,6,7	8	9	10	11	12
1	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.995$ $\varepsilon_{sol} = 0.005$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$
2	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$
3	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.99$ $\varepsilon_{sol} = 0.01$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.98$ $\varepsilon_{sol} = 0.02$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$
4	$\varepsilon_{HP} = 0.992$ $\varepsilon_{sol} = 0.008$	$\varepsilon_{HP} = 0.992$ $\varepsilon_{sol} = 0.008$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.986$ $\varepsilon_{sol} = 0.014$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.991$ $\varepsilon_{sol} = 0.009$	$\varepsilon_{HP} = 1$
5	$\varepsilon_{HP} = 0.992$ $\varepsilon_{sol} = 0.008$	$\varepsilon_{HP} = 0.993$ $\varepsilon_{sol} = 0.007$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.988$ $\varepsilon_{sol} = 0.012$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.992$ $\varepsilon_{sol} = 0.008$	$\varepsilon_{HP} = 1$
6	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.991$ $\varepsilon_{sol} = 0.009$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.984$ $\varepsilon_{sol} = 0.016$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.99$ $\varepsilon_{sol} = 0.01$	$\varepsilon_{HP} = 1$
7	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.975$ $\varepsilon_{sol} = 0.025$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$
8	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.987$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.999$ $\varepsilon_{sol} = 0.001$



18	$\varepsilon_{HP} = 0.998$ $\varepsilon_{sol} = 0.002$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.993$ $\varepsilon_{sol} = 0.007$
19	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.995$ $\varepsilon_{sol} = 0.005$
20	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.997$ $\varepsilon_{sol} = 0.003$
21	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.996$ $\varepsilon_{sol} = 0.004$
22	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.997$ $\varepsilon_{sol} = 0.003$	$\varepsilon_{HP} = 0.997$ $\varepsilon_{sol} = 0.003$
23	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.995$ $\varepsilon_{sol} = 0.005$	$\varepsilon_{HP} = 0.973$ $\varepsilon_{sol} = 0.027$	$\varepsilon_{HP} = 0.993$ $\varepsilon_{sol} = 0.007$	$\varepsilon_{HP} = 0.983$ $\varepsilon_{sol} = 0.017$	$\varepsilon_{HP} = 1$
24	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{sol} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 0.985$ $\varepsilon_{sol} = 0.015$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$	$\varepsilon_{HP} = 1$



Τα αποτελέσματα με τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη συνοψίζονται στα δύο επόμενα διαγράμματα.



**Διάγραμμα 6.1:** Ετήσια ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη που προκύπτουν από το κλασικό goal programming.



**Διάγραμμα 6.2:** Μηνιαία ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη που προκύπτουν από το κλασικό goal programming.

Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε σύγκριση με τα συνολικά κόστη του περιβαλλοντικού και του ενεργειακού γραμμικού μοντέλου, τα αντίστοιχα κόστη που προκύπτουν από το goal programming είναι μεγαλύτερα. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ποσοστά συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων διαφοροποιούνται, καθώς συνυπολογίζονται τόσο οι ενεργειακοί όσο και οι περιβαλλοντικοί στόχοι.

## 6.2.2 Μοντέλο Weighted Goal Programming

Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια παραλλαγή του κλασικού μοντέλου goal programming και στηρίζεται στην αναπαράσταση των πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας μια απλή αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτελεί το σταθμισμένο άθροισμα των συναρτήσεων που αναπαριστούν τους στόχους του προβλήματος. Οι βαρύτητες που δίνονται κάθε φορά επαφίονται στον αναλυτή και στη συγκεκριμένη περίπτωση μελετήθηκε μια περίπτωση, όπου θεωρήθηκε ότι ο στόχος της ενεργειακής εξίσωσης έχει διπλάσια σημαντικότητα από την αντίστοιχη περιβαλλοντική. Αυτό γίνεται τοποθετώντας στις μεταβλητές απόκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης, συντελεστές βαρύτητας του τύπου  $\frac{2}{E_{encost}}, \frac{1}{E_{envcost}}$ . Συνεπώς, το πρόβλημα του Weighted Goal Programming λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$\min z = \frac{2}{E_{encost}} \cdot n_1^- + \frac{2}{E_{encost}} \cdot p_1^+ + \frac{1}{E_{envcost}} \cdot n_2^- + \frac{1}{E_{envcost}} \cdot p_2^+ \quad (6.15)$$

Περιορισμοί:

$$x_1 \cdot e_{bl} + x_3 \cdot e_{el} + x_4 \cdot e_{hp} + x_5 \cdot e_{sol} + k_1 \cdot a + k_3 \cdot c + k_4 \cdot d + n_1^- - p_1^+ = E_{encost} \quad (6.16)$$

$$y_1 \cdot e_{bl} + y_3 \cdot e_{el} + y_4 \cdot e_{hp} + y_5 \cdot e_{sol} + n_2^- - p_2^+ = E_{envcost} \quad (6.17)$$

$$\varepsilon_{bl} \leq \alpha, \varepsilon_{el} \leq \gamma, \varepsilon_{HP} \leq \delta$$

$$0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1$$

$$0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1$$

$$0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1$$

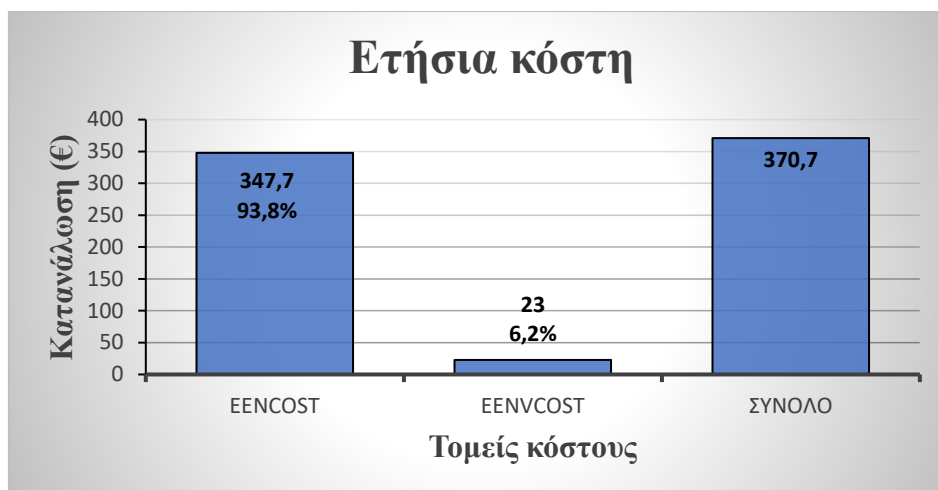
$$0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1$$

$$\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{wd} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{sol} = 1$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το παραπάνω μοντέλο φανερώνουν πως όλους τους μήνες εκτός από τον Νοέμβριο ευνοείται η χρήση θερμικών ηλιακών συλλεκτών κατά το 100% της λειτουργίας τους, για κάθε ώρα όλων των ημερών τους. Ωστόσο, για τον Νοέμβρη, τα ποσοστά συμμετοχής για την κάθε ώρα αποτυπώνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 6.2:** Ποσοστά συμμετοχής ανά ώρα για μια μέρα του Νοεμβρίου με την μέθοδο goal programming.

Νοέμβριος			
Ωρες		Ωρες	
1	$\varepsilon_{sol} = 1$	13	$\varepsilon_{sol} = 1$
2	$\varepsilon_{HP} = 1$	14	$\varepsilon_{sol} = 1$
3	$\varepsilon_{sol} = 1$	15	$\varepsilon_{sol} = 1$
4	$\varepsilon_{sol} = 1$	16	$\varepsilon_{sol} = 1$
5	$\varepsilon_{sol} = 1$	17	$\varepsilon_{sol} = 1$
6	$\varepsilon_{sol} = 1$	18	$\varepsilon_{sol} = 1$
7	$\varepsilon_{HP} = 1$	19	$\varepsilon_{sol} = 1$
8	$\varepsilon_{HP} = 1$	20	$\varepsilon_{sol} = 1$
9	$\varepsilon_{sol} = 0.99$ $\varepsilon_{bl} = 0.01$	21	$\varepsilon_{sol} = 1$
10	$\varepsilon_{sol} = 1$	22	$\varepsilon_{sol} = 0.99$ $\varepsilon_{bl} = 0.01$
11	$\varepsilon_{sol} = 1$	23	$\varepsilon_{sol} = 0.99$ $\varepsilon_{bl} = 0.01$
12	$\varepsilon_{sol} = 1$	24	$\varepsilon_{sol} = 0.99$ $\varepsilon_{bl} = 0.01$



**Διάγραμμα 6.3:** Ετήσια ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη που προκύπτουν από το weighted goal programming.



**Διάγραμμα 6.4:** Μηνιαία ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη που προκύπτουν από το weighted goal programming.

Το παρόν μοντέλο μπορεί να συγκριθεί με το γραμμικό μοντέλο πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με βαρύτητες 70%-30%. Από την σύγκριση προκύπτει ότι τα περιβαλλοντικά κόστη κυμαίνονται στα ίδια ποσά, επειδή η βαρύτητα και στις δύο περιπτώσεις είναι χαμηλές και οφείλονται στο ίδιο ενεργειακό σύστημα κατά κύριο λόγο. Αναφορικά με τα ενεργειακά κόστη, στο weighted goal programming αυτά είναι μεγαλύτερα σε σχέση με το μοντέλο 70%-30% και αυτό οφείλεται στο ότι τα ενεργειακά συστήματα μεταβάλλονται, αυξάνοντας έτσι κατά πολύ τις αποκλίσεις στα συνολικά κόστη.

## Κεφάλαιο 7: Επίλογος

---

### 7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τα ποσοστά συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων, που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών για ζεστό νερό οικιακής χρήσης, μέσα από μαθηματικά μοντέλα γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν τόσο ενεργειακούς όσο και περιβαλλοντικούς όρους, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και εγκατάστασης, καθώς και την ελάττωση των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Αρχικά, γίνεται διερεύνηση του ενεργειακού γραμμικού μοντέλου για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ, από όπου προκύπτει ότι τα συνολικά ελάχιστα κόστη είναι υψηλότερα στην κλιματική ζώνη Δ, εξαιτίας των αυξημένων αναγκών λόγω του ψυχρού κλίματος. Επίσης, τα αποτελέσματα δείχνουν πως και στις δύο περιπτώσεις, είναι προτιμότερη η εγκατάσταση λέβητα βιομάζας, πράγμα το οποίο οφείλεται στις χαμηλές τιμές του κόστους του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Έπειτα, στην ζώνη Α ακολουθεί η χρησιμοποίηση ηλιακών θερμικών συλλεκτών, εξαιτίας του ενισχυμένου ηλιακού δυναμικού, και η αντλία θερμότητας σε μικρότερο ποσοστό, λόγω του ελαττωμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας κατά το νυχτερινό τιμολόγιο. Τελευταίος σε συμμετοχή έρχεται ο λέβητας πετρελαίου. Εντούτοις, στην ζώνη Δ ως δεύτερο σύστημα έρχεται η αντλία θερμότητας, μετά ο λέβητας πετρελαίου, λόγω των χαμηλών τιμών σε ορισμένες κρίσιμες εποχές και τελευταίος ο ηλιακός θερμοσίφωνας. Στο αντίστοιχο πρόβλημα χωρίς την εξέταση του λέβητα βιομάζας και για τις δύο κλιματικές ζώνες τα συνολικά κόστη αυξάνονται σε σχέση με το προηγούμενο. Επιπλέον, ευνοείται η χρησιμοποίηση των αντλιών θερμότητας και ακολουθούν οι ηλιακοί συλλέκτες και ο λέβητας πετρελαίου σε πολύ μικρό ποσοστό συμμετοχής. Αναφορικά με τις ενεργειακές καταναλώσεις, καθοριστικό παράγοντα παίζουν οι βαθμοί απόδοσης των συστημάτων. Αυτό έχει ως συνέπεια να μεταβάλλονται οι συνολικοί συντελεστές συμμετοχής των συστημάτων σε σχέση με τους αντίστοιχους του κόστους, όμως και πάλι ο λέβητας βιομάζας συμμετέχει περισσότερο. Ακολουθούν οι ηλιακοί συλλέκτες, ο λέβητας πετρελαίου και τέλος η αντλία θερμότητας.

Στο περιβαλλοντικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους όπου ενσωματώνονται οι εκλυόμενοι ρύποι, τα συστήματα των οποίων η χρησιμοποίηση είναι βέλτιστη είναι τα ΑΠΕ, δηλαδή η βιομάζα και η ηλιακή ενέργεια. Αυτό συμβαίνει

διότι το περιβαλλοντικό κόστος των συστημάτων αυτών είναι ελαττωμένο κατά πολύ σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα.

Στα γραμμικά μοντέλα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων συνυπολογίζονται το ενεργειακό και περιβαλλοντικό κριτήριο, για την εύρεση των συντελεστών συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων. Στο πρόβλημα χωρίς συντελεστές βαρύτητας το συνολικό κόστος οφείλεται περισσότερο στα ενεργειακά κόστη σε σχέση με τα περιβαλλοντικά. Το σύστημα που επικρατεί είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας και σε μικρότερο ποσοστό η αντλία θερμότητας. Στο μοντέλο 70%-30% (ενεργειακό-περιβαλλοντικό κριτήριο) η αντλία θερμότητας υπερτερεί κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό σε σχέση με τον ηλιακό θερμοσίφωνα και τα κόστη είναι αυξημένα καθώς οφείλονται κυρίως στο ενεργειακό κριτήριο. Αντίστοιχα, στο γραμμικό μοντέλο με βαρύτητες 30%-70% τα συνολικά κόστη είναι μειωμένα σε σχέση με το 70%-30%, καθώς το ενεργειακό κριτήριο του κόστους έχει μεγαλύτερη σημαντικότητα.

Στο κλασικό μοντέλο προγραμματισμού στόχου (goal programming), τόσο το ενεργειακό όσο και το περιβαλλοντικό κόστος είναι αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα γραμμικά μοντέλα, καθώς με τον συνυπολογισμό των δύο αυτών κριτηρίων υπάρχουν αποκλίσεις από τους στόχους. Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και το weighted goal programming όπου τα κόστη αυξάνονται σε σχέση με το 70%-30%.

## 7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία έχει πλούσιο ερευνητικό ενδιαφέρον για μελλοντικές επεκτάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη μπορεί να επεκταθεί και σε περισσότερα ενεργειακά συστήματα για την κάλυψη του ZNX και σε διαφορετικού μεγέθους κτήρια που μπορεί να βρίσκονται σε άλλες περιοχές άλλων κλιματικών ζωνών. Επιπλέον, μπορούν να εισαχθούν στην διερεύνηση περισσότερες χρήσεις κατανάλωσης της ενέργειας σε ένα κτήριο, όπως για παράδειγμα η θέρμανση και η ψύξη των χώρων. Παράλληλα, μπορεί να διεξαχθεί ανάλυση ευαισθησίας στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα, ώστε να προκύψουν λεπτομερέστερα συμπεράσματα, αλλά και να επεκταθούν οι μέθοδοι επίλυσης σε περισσότερα μοντέλα γραμμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού. Τέλος, η μείωση του χρονικού βήματος της ανάλυσης του προβλήματος μπορεί να οδηγήσει στην αξιοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των ευρημάτων σε προβλήματα ανάπτυξης αλγορίθμων βέλτιστου ελέγχου ενεργειακών συστημάτων σε αντίστοιχες εφαρμογές.

## Παράρτημα

### Παράρτημα Π.1

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται οι πίνακες με τις ενεργειακές καταναλώσεις όλων των συστημάτων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 (πλην των θερμικών συλλεκτών) για την θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης. Οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με τη σχέση 3.1 και αφορούν στην πλήρη κάλυψη του φορτίου σε μηνιαίο, ημερήσιο και ωριαίο επίπεδο και για τις δύο κλιματικές ζώνες που μελετώνται (Α και Δ).

**Πίνακας Π.1.1:** Φορτία ενεργειακών καταναλώσεων του λέβητα πετρελαίου σε μηνιαίο, ημερήσιο και ωριαίο επίπεδο για κάθε κλιματική ζώνη.

$Q_{cons}(kWh)$	Κλιματική ζώνη Α			Κλιματική ζώνη Δ		
Μήνες	Μηνιαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο	Μηνιαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο
Ιανουάριος	574.18	18.52	0.77	732.08	23.62	0.98
Φεβρουάριος	521.86	18.64	0.78	648.27	23.15	0.97
Μάρτιος	559.83	18.06	0.75	672.87	21.71	0.9
Απρίλιος	498.36	16.61	0.69	581.71	19.39	0.81
Μάιος	450.38	14.53	0.61	525.74	16.96	0.71
Ιούνιος	368.13	12.27	0.51	437.58	14.59	0.61
Ιούλιος	337.33	10.88	0.45	409.11	13.2	0.55
Αύγουστος	330.16	10.65	0.44	400.13	12.91	0.54
Σεπτέμβριος	349.02	11.63	0.48	430.64	14.36	0.59
Οκτώβριος	418.08	13.49	0.56	522.15	16.84	0.7
Νοέμβριος	467.1	15,57	0.65	593.86	19.79	0.83
Δεκέμβριος	541.89	17.48	0.73	689.02	22.226	0.926

**Πίνακας Π.1.2:** Φορτία ενεργειακών καταναλώσεων του λέβητα βιομάζας σε μηνιαίο, ημερήσιο και ωριαίο επίπεδο για κάθε κλιματική ζώνη.

$Q_{cons}(kWh)$	Κλιματική ζώνη Α			Κλιματική ζώνη Δ		
Μήνες	Μηνιαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο	Μηνιαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο

Ιανουάριος	510.39	16.46	0.69	650.74	20.99	0.87
Φεβρουάριος	463.87	16.57	0.69	576.24	20.58	0.86
Μάρτιος	497.66	16.05	0.67	598.11	19.29	0.80
Απρίλιος	442.99	14.77	0.62	517.07	17.24	0.72
Μάιος	400.33	12.91	0.54	467.32	15.07	0.63
Ιούνιος	327.22	10.91	0.45	388.96	12.97	0.54
Ιούλιος	299.85	9.67	0.40	363.65	11.73	0.49
Αύγουστος	293.47	9.47	0.39	355.67	11.47	0.48
Σεπτέμβριος	310.24	10.34	0.43	382.79	12.76	0.53
Οκτώβριος	371.62	11.99	0.49	464.13	14.97	0.62
Νοέμβριος	415.2	13.84	0.58	527.88	15.84	0.73
Δεκέμβριος	481.68	15.54	0.65	612.46	17.78	0.82

**Πίνακας Π.1.3:** Φορτία ενεργειακών καταναλώσεων του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα σε μηνιαίο, ημερήσιο και ωριαίο επίπεδο για κάθε κλιματική ζώνη.

$Q_{cons}(kWh)$	Κλιματική ζώνη Α			Κλιματική ζώνη Δ		
	Μηνιαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο	Μηνιαίο	Ημερήσιο	Ωριαίο
Μήνες						
Ιανουάριος	483.52	15.60	0.65	616.49	19.89	0.83
Φεβρουάριος	439.46	15.69	0.65	545.91	19.49	0.81
Μάρτιος	471.43	15.21	0.63	566.63	18.28	0.76
Απρίλιος	419.67	13.99	0.58	489.86	16.33	0.68
Μάιος	379.26	12.23	0.51	442.73	14.28	0.59
Ιούνιος	310	10.33	0.43	368.49	12.28	0.51
Ιούλιος	284.07	9.16	0.38	344.51	11.11	0.46
Αύγουστος	278.03	8.97	0.37	336.95	10.87	0.45
Σεπτέμβριος	293.92	9.80	0.41	362.64	12.09	0.50
Οκτώβριος	352.07	11.36	0.47	439.70	14.18	0.59
Νοέμβριος	393.35	13.11	0.55	500.10	16.67	0.69
Δεκέμβριος	456.32	14.72	0.61	580.23	18.72	0.78



**Πίνακας Π.1.4:** Φορτία ενεργειακών καταναλώσεων της ηλεκτρικής αντλίας θερμότητας σε ωριαίο επίπεδο για την κλιματική ζώνη Α.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.2778	0.2727	0.2506	0.2107	0.1695	0.1317	0.1120	0.1091	0.1291	0.1629	0.2075	0.2501
2	0.2800	0.2750	0.2529	0.2129	0.1714	0.1331	0.1130	0.1101	0.1303	0.1643	0.2093	0.2521
3	0.2818	0.2768	0.2547	0.2147	0.1729	0.1342	0.1138	0.1108	0.1312	0.1655	0.2107	0.2538
4	0.2831	0.2782	0.2561	0.2161	0.1740	0.1351	0.1144	0.1114	0.1319	0.1663	0.2118	0.2550
5	0.2835	0.2787	0.2566	0.2166	0.1744	0.1353	0.1146	0.1116	0.1322	0.1666	0.2121	0.2554
6	0.2827	0.2778	0.2557	0.2156	0.1736	0.1348	0.1142	0.1112	0.1317	0.1660	0.2114	0.2546
7	0.2804	0.2754	0.2533	0.2134	0.1718	0.1334	0.1132	0.1103	0.1305	0.1646	0.2096	0.2526
8	0.2765	0.2713	0.2492	0.2093	0.1684	0.1309	0.1114	0.1086	0.1284	0.1620	0.2064	0.2489
9	0.2709	0.2655	0.2433	0.2036	0.1638	0.1274	0.1089	0.1063	0.1255	0.1584	0.2019	0.2438
10	0.2645	0.2588	0.2367	0.1973	0.1586	0.1235	0.1060	0.1036	0.1221	0.1543	0.1968	0.2380
11	0.2575	0.2516	0.2294	0.1903	0.1529	0.1193	0.1029	0.1007	0.1185	0.1499	0.1912	0.2316
12	0.2511	0.2449	0.2230	0.1840	0.1478	0.1155	0.1001	0.0981	0.1152	0.1458	0.1861	0.2258
13	0.2464	0.2400	0.2179	0.1795	0.1441	0.1127	0.0980	0.0962	0.1128	0.1429	0.1824	0.2215
14	0.2433	0.2368	0.2148	0.1765	0.1417	0.1109	0.0967	0.0950	0.1112	0.1409	0.1800	0.2187
15	0.2422	0.2356	0.2136	0.1754	0.1408	0.1102	0.0962	0.0945	0.1106	0.1402	0.1791	0.2176
16	0.2433	0.2368	0.2148	0.1765	0.1417	0.1109	0.0967	0.0950	0.1112	0.1409	0.1800	0.2187
17	0.2460	0.2396	0.2176	0.1791	0.1438	0.1125	0.0978	0.0961	0.1126	0.1426	0.1821	0.2211

18	0.2503	0.2441	0.2220	0.1833	0.1472	0.1150	0.0997	0.0978	0.1148	0.1453	0.1855	0.2250
19	0.2555	0.2495	0.2273	0.1883	0.1513	0.1181	0.1020	0.0999	0.1175	0.1486	0.1896	0.2298
20	0.2608	0.2550	0.2328	0.1936	0.1556	0.1213	0.1044	0.1021	0.1202	0.1520	0.1938	0.2346
21	0.2654	0.2597	0.2376	0.1981	0.1593	0.1240	0.1064	0.1040	0.1226	0.1549	0.1975	0.2388
22	0.2696	0.2641	0.2420	0.2024	0.1627	0.1266	0.1083	0.1057	0.1248	0.1576	0.2009	0.2426
23	0.2730	0.2677	0.2455	0.2058	0.1656	0.1287	0.1098	0.1071	0.1266	0.1598	0.2036	0.2458
24	0.2756	0.2704	0.2483	0.2085	0.1677	0.1304	0.1110	0.1082	0.1280	0.1615	0.2057	0.2481

**Πίνακας Π.1.5:** Φορτία ενεργειακών καταναλώσεων της ηλεκτρικής αντλίας θερμότητας σε ωριαίο επίπεδο για την κλιματική ζώνη Δ.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.3588	0.3445	0.3041	0.2480	0.1934	0.1506	0.1277	0.1249	0.1514	0.2002	0.2637	0.3244
2	0.3619	0.3481	0.3077	0.2515	0.1965	0.1532	0.1299	0.1271	0.1538	0.2030	0.2667	0.3275
3	0.3645	0.3510	0.3107	0.2544	0.1990	0.1554	0.1318	0.1289	0.1558	0.2052	0.2690	0.3299
4	0.3664	0.3531	0.3129	0.2566	0.2009	0.1570	0.1331	0.1302	0.1573	0.2069	0.2708	0.3318
5	0.3670	0.3538	0.3136	0.2573	0.2015	0.1575	0.1336	0.1307	0.1579	0.2075	0.2714	0.3324
6	0.3657	0.3524	0.3122	0.2558	0.2003	0.1564	0.1327	0.1298	0.1568	0.2064	0.2702	0.3312
7	0.3626	0.3488	0.3085	0.2522	0.1971	0.1538	0.1304	0.1275	0.1543	0.2035	0.2672	0.3281
8	0.3569	0.3424	0.3019	0.2459	0.1916	0.1491	0.1263	0.1236	0.1499	0.1986	0.2619	0.3226
9	0.3487	0.3332	0.2925	0.2369	0.1839	0.1426	0.1208	0.1182	0.1438	0.1915	0.2544	0.3148

10	0.3395	0.3228	0.2820	0.2270	0.1754	0.1355	0.1147	0.1123	0.1370	0.1838	0.2459	0.3060
11	0.3291	0.3112	0.2705	0.2162	0.1663	0.1280	0.1082	0.1060	0.1298	0.1753	0.2366	0.2961
12	0.3196	0.3007	0.2600	0.2065	0.1582	0.1213	0.1025	0.1005	0.1234	0.1677	0.2282	0.2871
13	0.3126	0.2929	0.2524	0.1995	0.1524	0.1166	0.0985	0.0966	0.1188	0.1623	0.2220	0.2805
14	0.3080	0.2879	0.2474	0.1950	0.1487	0.1135	0.0959	0.0941	0.1159	0.1588	0.2180	0.2761
15	0.3062	0.2860	0.2456	0.1933	0.1473	0.1124	0.0950	0.0931	0.1148	0.1575	0.2166	0.2745
16	0.3080	0.2879	0.2474	0.1950	0.1487	0.1135	0.0959	0.0941	0.1159	0.1588	0.2180	0.2761
17	0.3120	0.2923	0.2517	0.1989	0.1519	0.1162	0.0982	0.0962	0.1184	0.1619	0.2215	0.2799
18	0.3184	0.2994	0.2587	0.2053	0.1572	0.1205	0.1019	0.0998	0.1226	0.1668	0.2272	0.2860
19	0.3261	0.3079	0.2672	0.2131	0.1637	0.1258	0.1064	0.1042	0.1277	0.1729	0.2340	0.2933
20	0.3340	0.3166	0.2759	0.2212	0.1705	0.1315	0.1112	0.1089	0.1331	0.1792	0.2410	0.3007
21	0.3407	0.3241	0.2834	0.2283	0.1765	0.1364	0.1155	0.1131	0.1379	0.1848	0.2471	0.3071
22	0.3469	0.3311	0.2904	0.2349	0.1822	0.1412	0.1195	0.1170	0.1424	0.1899	0.2527	0.3130
23	0.3519	0.3367	0.2961	0.2403	0.1868	0.1451	0.1229	0.1203	0.1461	0.1942	0.2573	0.3178
24	0.3556	0.3409	0.3004	0.2445	0.1904	0.1481	0.1255	0.1228	0.1489	0.1975	0.2608	0.3214

## Παράρτημα Π.2

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη όλων των συστημάτων (πλην των θερμικών συλλεκτών) που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 για την θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης. Οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με τις τιμές κόστους που αναγράφονται σε αντίστοιχους πίνακες του κεφαλαίου 3, οι οποίες προέκυψαν από έρευνες αγοράς για πρότυπα συστήματα. Οι τιμές αυτές του κόστους πολλαπλασιάζονται με τις ενεργειακές καταναλώσεις και έτσι προκύπτουν τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη για κάθε ώρα της ημέρας για κάθε μήνα και για τις δύο κλιματικές ζώνες που μελετώνται (Α και Δ).

**Πίνακας Π.2.1:** Ωριαία ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη του λέβητα πετρελαίου σε € για κάθε μήνα.

Ωριαία κόστη	Κλιματική ζώνη Α		Κλιματική ζώνη Δ	
	Ενεργειακό	Περιβαλλοντικό	Ενεργειακό	Περιβαλλοντικό
Ιανουάριος	0.0772	0.0309	0.0984	0.0394
Φεβρουάριος	0.0777	0.0311	0.0965	0.0386
Μάρτιος	0.0752	0.0301	0.0904	0.0362
Απρίλιος	0.0173	0.0277	0.0202	0.0323
Μάιος	0.0151	0.0242	0.0177	0.0283
Ιούνιος	0.0128	0.0205	0.0152	0.0243
Ιούλιος	0.0453	0.0181	0.0549	0.0219
Αύγουστος	0.0444	0.0178	0.0538	0.0215
Σεπτέμβριος	0.0485	0.0194	0.0598	0.0239
Οκτώβριος	0.0562	0.0225	0.0702	0.0281
Νοέμβριος	0.0649	0.0259	0.0825	0.0329
Δεκέμβριος	0.0728	0.0291	0.0926	0.0370

**Πίνακας Π.2.2:** Ωριαία ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη του λέβητα βιομάζας σε € για κάθε μήνα.

Ωριαία κόστη	Κλιματική ζώνη Α		Κλιματική ζώνη Δ	
	Ενεργειακό	Περιβαλλοντικό	Ενεργειακό	Περιβαλλοντικό
Ιανουάριος	0.0274	0.0025	0.0349	0.0032
Φεβρουάριος	0.0276	0.0025	0.0343	0.0031
Μάρτιος	0.0268	0.0025	0.0322	0.0029
Απρίλιος	0.0246	0.0023	0.0287	0.0026
Μάιος	0.0215	0.0019	0.0251	0.0023
Ιούνιος	0.0182	0.0017	0.0216	0.0019
Ιούλιος	0.0161	0.0018	0.0196	0.0018
Αύγουστος	0.0158	0.0014	0.0191	0.0018
Σεπτέμβριος	0.0172	0.0016	0.0213	0.0020
Οκτώβριος	0.0199	0.0018	0.0249	0.0023
Νοέμβριος	0.0231	0.0021	0.0293	0.0027
Δεκέμβριος	0.0259	0.0024	0.0329	0.0030

**Πίνακας Π.2.3:** Ωριαία ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα σε € για κάθε μήνα (κανονικό τιμολόγιο).

Ωριαία κόστη	Κλιματική ζώνη Α		Κλιματική ζώνη Δ	
	Ενεργειακό	Περιβαλλοντικό	Ενεργειακό	Περιβαλλοντικό
Ιανουάριος	0.0975	0.0422	0.1243	0.0539
Φεβρουάριος	0.0981	0.0425	0.1219	0.0528
Μάρτιος	0.0950	0.0412	0.1142	0.0495
Απρίλιος	0.0874	0.0379	0.1021	0.0442
Μάιος	0.0765	0.0331	0.0893	0.0387
Ιούνιος	0.0646	0.0279	0.0768	0.0333
Ιούλιος	0.0573	0.0248	0.0695	0.0301
Αύγουστος	0.0561	0.0243	0.0679	0.0294

Σεπτέμβριος	0.0612	0.0265	0.0756	0.0327
Οκτώβριος	0.0709	0.0308	0.0887	0.0384
Νοέμβριος	0.0819	0.0355	0.1042	0.0451
Δεκέμβριος	0.0920	0.0399	0.1169	0.0507

**Πίνακας Π.2.4:** Ωριαία ενεργειακά κόστη του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα σε € για κάθε μήνα (νυχτερινό τιμολόγιο).

Κλιματική ζώνη	Α	Δ
Ωριαία κόστη	Ενεργειακό	Ενεργειακό
Ιανουάριος	0.0325	0.0414
Φεβρουάριος	0.0327	0.0406
Μάρτιος	0.0317	0.0381
Απρίλιος	0.0291	0.0340
Μάιος	0.0255	0.0298
Ιούνιος	0.0215	0.0256
Ιούλιος	0.0191	0.0232
Αύγουστος	0.0187	0.0226
Σεπτέμβριος	0.0204	0.0252
Οκτώβριος	0.0237	0.0296
Νοέμβριος	0.0273	0.0347
Δεκέμβριος	0.0307	0.0390

**Πίνακας Π.2.5:** Ωριαία ενεργειακά κόστη της αντλίας θερμότητας σε € για κάθε ώρα του κάθε μήνα για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.  
(α)

Ωρες	Μήνες ( Κλιματική ζώνη Α)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0416	0.0409	0.038	0.0316	0.0085	0.0066	0.0056	0.0054	0.0065	0.0081	0.031	0.0375
2	0.0139	0.0138	0.0126	0.0107	0.0086	0.0067	0.0057	0.0055	0.0065	0.0082	0.0105	0.0126
3	0.0141	0.0138	0.0127	0.0107	0.0086	0.0067	0.0057	0.0055	0.0066	0.0083	0.0105	0.0127
4	0.0142	0.0139	0.0128	0.0108	0.0087	0.0068	0.0057	0.0056	0.0066	0.0083	0.0106	0.0128
5	0.0142	0.0139	0.0128	0.0108	0.0087	0.0068	0.0057	0.0056	0.0066	0.0083	0.0106	0.0128
6	0.014	0.0139	0.0128	0.0108	0.0087	0.0067	0.0057	0.0056	0.0066	0.0083	0.0106	0.0127
7	0.014	0.0138	0.0127	0.0107	0.0086	0.0067	0.0057	0.0055	0.0065	0.0082	0.0105	0.0126
8	0.0138	0.0136	0.012	0.0105	0.0253	0.0196	0.0167	0.0163	0.0193	0.0243	0.0103	0.0124
9	0.041	0.0398	0.036	0.0305	0.0246	0.0191	0.0163	0.0159	0.0188	0.0238	0.0303	0.0366
10	0.0397	0.0388	0.036	0.0296	0.0238	0.0185	0.0159	0.0155	0.0183	0.0232	0.0295	0.0357
11	0.0386	0.0377	0.034	0.0286	0.0229	0.0179	0.0154	0.0151	0.0178	0.0225	0.0287	0.0347
12	0.0377	0.0367	0.033	0.0276	0.0222	0.0173	0.0150	0.0147	0.0173	0.0219	0.0279	0.0339
13	0.0369	0.036	0.033	0.0269	0.0216	0.0169	0.0147	0.0144	0.0169	0.0214	0.0274	0.0332
14	0.0365	0.0355	0.032	0.0265	0.0213	0.0166	0.0145	0.0142	0.0167	0.0211	0.0269	0.0328
15	0.0363	0.035	0.032	0.0263	0.0211	0.0165	0.0144	0.0142	0.0166	0.0210	0.0269	0.0326

16	0.0365	0.036	0.032	0.0265	0.0213	0.0166	0.0145	0.0142	0.0167	0.0081	0.0269	0.0328
17	0.0369	0.0359	0.0326	0.0269	0.0216	0.0169	0.0147	0.014	0.0169	0.0082	0.0273	0.0331
18	0.0375	0.0366	0.0333	0.0275	0.0221	0.0173	0.0149	0.0147	0.0172	0.0083	0.0278	0.0338
19	0.0383	0.037	0.0341	0.0283	0.0227	0.0177	0.0153	0.0149	0.0176	0.0083	0.0284	0.034
20	0.0391	0.038	0.0349	0.0290	0.0233	0.0182	0.0157	0.0153	0.018	0.0083	0.0291	0.035
21	0.0398	0.0389	0.0356	0.0297	0.02389	0.0186	0.0159	0.0159	0.0184	0.0083	0.0296	0.0358
22	0.0404	0.0396	0.0363	0.0304	0.0244	0.0189	0.0162	0.0159	0.0187	0.0082	0.0301	0.0364
23	0.0409	0.0402	0.0368	0.0309	0.0083	0.0064	0.0055	0.0054	0.0063	0.0243	0.0305	0.0369
24	0.0413	0.0406	0.037	0.0313	0.0084	0.0065	0.0056	0.0054	0.0064	0.0238	0.0309	0.0372

(β)

	Μήνες ( Κλιματική ζώνη Δ)											
Ωρες	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0538	0.0517	0.0456	0.0372	0.0097	0.0075	0.0064	0.0062	0.0076	0.0100	0.0396	0.0487
2	0.0181	0.0174	0.0154	0.0126	0.0098	0.0077	0.0065	0.0064	0.0077	0.0101	0.0133	0.0164
3	0.0182	0.0175	0.0155	0.0127	0.0099	0.0078	0.0066	0.0064	0.0078	0.0103	0.0135	0.0165
4	0.0183	0.0177	0.0156	0.0128	0.0100	0.0078	0.0067	0.0065	0.0079	0.0103	0.0135	0.0166
5	0.0184	0.0177	0.0157	0.0129	0.0101	0.0079	0.0067	0.0065	0.0079	0.0104	0.0136	0.0166
6	0.0183	0.0176	0.0156	0.0128	0.0100	0.0078	0.0066	0.0065	0.0078	0.0103	0.0135	0.0166



7	0.0181	0.0174	0.0154	0.0126	0.0099	0.0077	0.0065	0.0064	0.0077	0.0102	0.0134	0.0164
8	0.0178	0.0171	0.0151	0.0123	0.0287	0.0224	0.0189	0.0185	0.0225	0.0298	0.0131	0.0161
9	0.0523	0.0499	0.0439	0.0355	0.0276	0.0214	0.0181	0.0177	0.0216	0.0287	0.0382	0.0472
10	0.0509	0.0484	0.0423	0.0340	0.0263	0.0203	0.0172	0.0168	0.0205	0.0276	0.0369	0.0459
11	0.0494	0.0467	0.0406	0.0324	0.0249	0.0192	0.0162	0.0159	0.0195	0.0263	0.0355	0.0444
12	0.0479	0.0451	0.0389	0.0310	0.0237	0.0182	0.0154	0.0151	0.0185	0.0252	0.0342	0.0431
13	0.0469	0.0439	0.0378	0.0299	0.0229	0.0175	0.0148	0.0145	0.0178	0.0243	0.0333	0.0421
14	0.0462	0.0432	0.0371	0.0292	0.0223	0.0170	0.0144	0.0141	0.0174	0.0238	0.0327	0.0414
15	0.0459	0.0429	0.0368	0.0289	0.0221	0.0169	0.0142	0.0139	0.0172	0.0236	0.0325	0.0412
16	0.0462	0.0432	0.0371	0.0292	0.0223	0.0170	0.0144	0.0141	0.0174	0.0238	0.0327	0.0414
17	0.0468	0.0438	0.0378	0.0298	0.0228	0.0174	0.0147	0.0144	0.0178	0.0243	0.0332	0.0420
18	0.0478	0.0449	0.0388	0.0308	0.0236	0.0181	0.0153	0.0149	0.0184	0.0250	0.0341	0.0429
19	0.0489	0.0462	0.0401	0.0319	0.0246	0.0189	0.0159	0.0156	0.0192	0.0259	0.0351	0.0440
20	0.0501	0.0475	0.0414	0.0332	0.0256	0.0197	0.0167	0.0163	0.0199	0.0269	0.0361	0.0451
21	0.0511	0.0486	0.0425	0.0342	0.0265	0.0205	0.0173	0.0169	0.0207	0.0277	0.0371	0.0461
22	0.0520	0.0497	0.0436	0.0352	0.0273	0.0212	0.0179	0.0175	0.0214	0.0285	0.0379	0.0470
23	0.0528	0.0505	0.0444	0.0361	0.0093	0.0073	0.0061	0.0060	0.0073	0.0097	0.0386	0.0477
24	0.0533	0.0511	0.0451	0.0367	0.0095	0.0074	0.0063	0.0061	0.0074	0.0099	0.0391	0.0482

**Πίνακας Π.2.6:** Ωριαία περιβαλλοντικά κόστη της αντλίας θερμότητας σε € για κάθε ώρα του κάθε μήνα για την κλιματική ζώνη (α) Α και (β) Δ.  
(α)

Ωρες	Μήνες ( Κλιματική ζώνη Α)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0181	0.0177	0.0163	0.0137	0.0110	0.0086	0.0073	0.0071	0.0084	0.0106	0.0135	0.0163
2	0.0182	0.0179	0.0164	0.0138	0.0111	0.0087	0.0073	0.0072	0.0085	0.0107	0.0136	0.0164
3	0.0183	0.0179	0.0166	0.0139	0.0112	0.0087	0.0074	0.0072	0.0085	0.0108	0.0137	0.0165
4	0.0184	0.0181	0.0166	0.0140	0.0113	0.0088	0.0074	0.0072	0.0086	0.0108	0.0138	0.0166
5	0.0184	0.0181	0.0167	0.0141	0.0113	0.0088	0.0075	0.0073	0.0086	0.0108	0.0138	0.0166
6	0.0184	0.0181	0.0166	0.0140	0.0113	0.0088	0.0074	0.0072	0.0086	0.0108	0.0137	0.0165
7	0.0182	0.0179	0.0165	0.0139	0.0112	0.0087	0.0074	0.0072	0.0085	0.0108	0.0136	0.0164
8	0.0179	0.0176	0.0162	0.0136	0.0109	0.0085	0.0072	0.0071	0.0083	0.0105	0.0134	0.0162
9	0.0176	0.0173	0.0158	0.0132	0.0106	0.0083	0.0071	0.0069	0.0082	0.0103	0.0131	0.0158
10	0.0172	0.0168	0.0154	0.0128	0.0103	0.0080	0.0069	0.0067	0.0079	0.0100	0.0128	0.0155
11	0.0167	0.0164	0.0149	0.0124	0.0099	0.0078	0.0067	0.0065	0.0077	0.0097	0.0124	0.0151
12	0.0163	0.0159	0.0145	0.0119	0.0096	0.0075	0.0065	0.0064	0.0075	0.0095	0.0121	0.0147
13	0.0160	0.0156	0.0142	0.0117	0.0094	0.0073	0.0064	0.0063	0.0073	0.0093	0.0119	0.0144

14	0.0158	0.0154	0.0139	0.0115	0.0092	0.0072	0.0063	0.0062	0.0072	0.0092	0.0117	0.0142
15	0.0157	0.0153	0.0139	0.0114	0.0092	0.0072	0.0063	0.0061	0.0072	0.0091	0.0116	0.0141
16	0.0158	0.0154	0.0139	0.0115	0.0092	0.0072	0.0063	0.0062	0.0072	0.0092	0.0117	0.0142
17	0.0159	0.0156	0.0141	0.0116	0.0093	0.0073	0.0064	0.0062	0.0073	0.0093	0.0118	0.0144
18	0.0163	0.0159	0.0144	0.0119	0.0096	0.0075	0.0065	0.0064	0.0075	0.0094	0.0121	0.0146
19	0.0166	0.0162	0.0148	0.0122	0.0098	0.0077	0.0066	0.0065	0.0076	0.0097	0.0123	0.0149
20	0.0169	0.0166	0.0151	0.0126	0.0101	0.0079	0.0068	0.0066	0.0078	0.0099	0.0126	0.0152
21	0.0173	0.0169	0.0154	0.0129	0.0104	0.0081	0.0069	0.0068	0.0079	0.0101	0.0128	0.0155
22	0.0175	0.0172	0.0157	0.0132	0.0106	0.0082	0.0070	0.0069	0.0081	0.0102	0.0131	0.0158
23	0.0177	0.0174	0.0159	0.0134	0.0108	0.0084	0.0071	0.0069	0.0082	0.0104	0.0132	0.0160
24	0.0179	0.0176	0.0161	0.0135	0.0109	0.0085	0.0072	0.0070	0.0083	0.0105	0.0134	0.0161

(β)

	Μήνες ( Κλιματική ζώνη Δ)											
Ωρες	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0233	0.0224	0.0198	0.016119	0.0126	0.0098	0.0083	0.0081	0.0098	0.0130	0.0171	0.0211
2	0.0235	0.0226	0.0200	0.016349	0.0128	0.0100	0.0084	0.0083	0.0100	0.0132	0.0173	0.0213
3	0.0237	0.0228	0.0202	0.016535	0.0129	0.0101	0.0086	0.0084	0.0101	0.0133	0.0175	0.0214

4	0.0238	0.0230	0.0203	0.016676	0.0131	0.0102	0.0087	0.0085	0.0102	0.0135	0.0176	0.0216
5	0.0239	0.0230	0.0204	0.016723	0.0131	0.0102	0.0087	0.0085	0.0103	0.0135	0.0176	0.0216
6	0.0238	0.0229	0.0203	0.016629	0.0130	0.0102	0.0086	0.0084	0.0102	0.0134	0.0177	0.0215
7	0.0236	0.0227	0.0201	0.016396	0.0128	0.0100	0.0085	0.0083	0.0100	0.0132	0.0174	0.0213
8	0.0232	0.0223	0.0196	0.015982	0.0125	0.0097	0.0082	0.0080	0.0097	0.0129	0.0170	0.0210
9	0.0227	0.0217	0.0190	0.015401	0.0120	0.0093	0.0079	0.0077	0.0093	0.0125	0.0165	0.0205
10	0.0221	0.0210	0.0183	0.014753	0.0114	0.0088	0.0075	0.0073	0.0089	0.011944	0.0160	0.0199
11	0.0214	0.0202	0.0176	0.014051	0.0108	0.0083	0.0070	0.0069	0.0084	0.011395	0.0154	0.0192
12	0.0208	0.0195	0.0169	0.01342	0.0103	0.0079	0.0067	0.0065	0.0080	0.010904	0.0148	0.0187
13	0.0203	0.0190	0.0164	0.0130	0.0099	0.0076	0.0064	0.0063	0.0077	0.01055	0.0144	0.0182
14	0.0200	0.0187	0.0161	0.0127	0.0097	0.0074	0.0062	0.0061	0.0075	0.010321	0.0142	0.0180
15	0.0199	0.0186	0.0160	0.0126	0.0096	0.0073	0.0062	0.0061	0.0075	0.010237	0.0141	0.0178
16	0.0200	0.0187	0.0161	0.0127	0.0097	0.0074	0.0062	0.0061	0.0075	0.010321	0.0142	0.0180
17	0.0203	0.0190	0.0164	0.0129	0.0099	0.0076	0.0064	0.0066	0.0077	0.010521	0.0144	0.0182
18	0.0207	0.0195	0.0168	0.0133	0.0102	0.0078	0.0066	0.0065	0.0080	0.010844	0.0148	0.0186
19	0.0212	0.0200	0.0174	0.0139	0.0106	0.0082	0.0069	0.0068	0.0083	0.011239	0.0152	0.0191
20	0.0217	0.0206	0.0179	0.0144	0.0111	0.0085	0.0072	0.0071	0.0087	0.01165	0.0157	0.0195

<b>21</b>	0.0221	0.0211	0.0184	0.0148	0.0115	0.0089	0.0075	0.0073	0.0090	0.01201	0.0161	0.0199
<b>22</b>	0.0225	0.0215	0.0189	0.0153	0.0118	0.0092	0.0078	0.0076	0.0093	0.012347	0.0164	0.0203
<b>23</b>	0.0229	0.0219	0.0192	0.0156	0.0121	0.0094	0.0080	0.0078	0.0095	0.012623	0.0167	0.0207
<b>24</b>	0.0231	0.0222	0.0195	0.0159	0.0124	0.0096	0.0082	0.0080	0.0097	0.012835	0.0170	0.0209

### Παράρτημα Π.3

Εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού του ενεργειακού και του περιβαλλοντικού κόστους των ηλιακών θερμικών συλλεκτών, τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται σε ξεχωριστό παράρτημα. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι επιφάνειες των συλλεκτών, οι ενεργειακές καταναλώσεις και τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη.

**Πίνακας Π.3.1:** Απαιτούμενες επιφάνειες ηλιακών θερμικών συλλεκτών για κάθε μήνα και το αντίστοιχο ωριαίο κόστος εγκατάστασης σε € .

Μήνες	Κλιματική ζώνη Α		Κλιματική ζώνη Δ	
	A (m <sup>2</sup> )	Ωριαίο κόστος (€)	A (m <sup>2</sup> )	Ωριαίο κόστος (€)
Ιανουάριος	17.86	0.0544	25.94	0.0790
Φεβρουάριος	13.05	0.0397	18.56	0.0565
Μάρτιος	9.14	0.0278	12.35	0.0376
Απρίλιος	6.11	0.0232	8.41	0.0320
Μάιος	4.43	0.0169	6.18	0.0235
Ιούνιος	3.38	0.0129	4.43	0.0168
Ιούλιος	3.03	0.0115	4.05	0.0154
Αύγουστος	3.26	0.0124	4.40	0.0168
Σεπτέμβριος	4.37	0.0133	6.35	0.0193
Οκτώβριος	7.27	0.0221	11.00	0.0334
Νοέμβριος	12.13	0.0369	20.20	0.0615
Δεκέμβριος	18.07	0.0550	29.48	0.0897

**Πίνακας Π.3.2:** Μηνιαίες και ωριαίες ενεργειακές καταναλώσεις των ηλιακών θερμικών συλλεκτών και το αντίστοιχο ωριαίο περιβαλλοντικό κόστος για κάθε μήνα σε € .

Μήνες	Κλιματική ζώνη Α			Κλιματική ζώνη Δ		
	(kWh /μήνα)	(kWh /ώρα)	Ωριαίο κόστος (€)	(kWh /μήνα)	(kWh /ώρα)	Ωριαίο κόστος (€)
Ιανουάριος	468.72	0.6300	0.0025	597.62	0.8033	0.0032
Φεβρουάριος	426.01	0.6339	0.0025	529.20	0.7875	0.0032
Μάρτιος	457.00	0.6143	0.0025	549.28	0.7383	0.0030
Απρίλιος	406.82	0.5650	0.0023	474.86	0.6595	0.0026
Μάιος	367.65	0.4942	0.0020	429.17	0.5768	0.0023
Ιούνιος	300.51	0.4174	0.0017	357.21	0.4961	0.0020
Ιούλιος	275.37	0.3701	0.0015	333.96	0.4489	0.0018
Αύγουστος	269.51	0.3623	0.0014	326.64	0.4390	0.0018
Σεπτέμβριος	284.92	0.3957	0.0016	351.54	0.4883	0.0020
Οκτώβριος	341.29	0.4587	0.0018	426.24	0.5729	0.0023
Νοέμβριος	381.31	0.5296	0.0021	484.79	0.6733	0.0027
Δεκέμβριος	442.36	0.5946	0.0024	562.47	0.7560	0.0030

#### Παράρτημα Π.4

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται οι τιμές του COP της αντλίας θερμότητας όπως αυτές υπολογίζονται από τον τύπο 3.3 για κάθε ώρα της ημέρας του κάθε μήνα.

**Πίνακας Π.4.1:** Ωριαίες τιμές του COP της αντλίας θερμότητας για κάθε μήνα για την κλιματική ζώνη Α.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2,8337	2,8301	2,8876	3,0680	3,3343	3,6910	3,9274	3,9420	3,7058	3,4468	3,1804	2,9620
2	2,8114	2,8065	2,8612	3,0356	3,2985	3,6528	3,8925	3,9090	3,6725	3,4169	3,1534	2,9383
3	2,7938	2,7877	2,8403	3,0100	3,2701	3,6224	3,8647	3,8827	3,6461	3,3931	3,1319	2,9195
4	2,7806	2,7737	2,8247	2,9909	3,2489	3,5998	3,8440	3,8631	3,6264	3,3754	3,1160	2,9055
5	2,7763	2,7691	2,8196	2,9846	3,2419	3,5923	3,8372	3,8566	3,6198	3,3695	3,1107	2,9009
6	2,7850	2,7784	2,8299	2,9973	3,2559	3,607	3,8509	3,8696	3,6329	3,3813	3,1213	2,9102
7	2,8070	2,8018	2,8560	3,0292	3,2914	3,6452	3,8855	3,9024	3,6659	3,4109	3,1480	2,9336
8	2,8471	2,8444	2,9036	3,0876	3,3560	3,7142	3,9484	3,9619	3,7259	3,4649	3,1967	2,9762
9	2,9060	2,9072	2,9737	3,1738	3,4514	3,8157	4,0407	4,0492	3,8139	3,5442	3,2682	3,0389
10	2,9756	2,9815	3,0568	3,2761	3,5645	3,9358	4,1493	4,1518	3,9176	3,6376	3,3526	3,1129
11	3,0565	3,0679	3,1536	3,3957	3,6965	4,0755	4,2752	4,2705	4,0379	3,7459	3,4505	3,1988
12	3,1346	3,1515	3,2475	3,5119	3,8244	4,2105	4,3963	4,3846	4,1538	3,8504	3,5451	3,2817
13	3,1944	3,2156	3,3195	3,6012	3,9227	4,3140	4,4888	4,4717	4,2424	3,9302	3,6174	3,3452
14	3,2349	3,2590	3,3684	3,6619	3,9894	4,3841	4,5513	4,5305	4,3022	3,9842	3,6664	3,3881
15	3,2502	3,2755	3,3869	3,6849	4,0147	4,4106	4,5749	4,5527	4,3249	4,0046	3,6849	3,4043
16	3,2349	3,2590	3,3684	3,6619	3,9894	4,3841	4,5513	4,5305	4,3022	3,9842	3,6664	3,3881
17	3,1995	3,2210	3,3256	3,6088	3,9310	4,3227	4,4966	4,4790	4,2498	3,9369	3,6235	3,3505



18	3,1445	3,1621	3,2594	3,5266	3,8407	4,2276	4,4116	4,3991	4,1684	3,8636	3,5570	3,2922
19	3,0807	3,0938	3,1827	3,4317	3,7361	4,1173	4,3127	4,3059	4,0738	3,7783	3,4798	3,2245
20	3,0182	3,0269	3,1077	3,3390	3,6339	4,0092	4,2156	4,2143	3,9809	3,6946	3,4041	3,1581
21	2,9663	2,9715	3,0456	3,2623	3,5492	3,9196	4,1347	4,1380	3,9037	3,6250	3,3412	3,1029
22	2,9198	2,9219	2,9901	3,1940	3,4738	3,8395	4,0623	4,0696	3,8345	3,5627	3,2849	3,0536
23	2,8832	2,8829	2,9465	3,1404	3,4145	3,7764	4,0050	4,0155	3,7798	3,5135	3,2405	3,0147
24	2,8561	2,8540	2,9142	3,1007	3,3705	3,7296	3,9625	3,9752	3,7393	3,4770	3,2076	2,9858

**Πίνακας Π.4.2:** Ωριαίες τιμές του COP της αντλίας θερμότητας για κάθε μήνα για την κλιματική ζώνη Δ.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2,1942	2,2402	2,3796	2,6064	2,9224	3,2276	3,4454	3,4443	3,1613	2,8044	2,5023	2,2835
2	2,1750	2,2171	2,3512	2,5697	2,8767	3,1727	3,3858	3,3851	3,1107	2,7660	2,4746	2,2623
3	2,1598	2,1990	2,3289	2,5407	2,8406	3,1294	3,3388	3,3385	3,0707	2,7356	2,4526	2,2456
4	2,1486	2,1855	2,3123	2,5193	2,8139	3,0973	3,3039	3,3038	3,0411	2,7131	2,4364	2,2331
5	2,1449	2,1811	2,3069	2,5122	2,8051	3,0866	3,2924	3,2924	3,0313	2,7057	2,4310	2,2290
6	2,1523	2,1900	2,3178	2,5264	2,8228	3,1079	3,3155	3,3153	3,0509	2,7206	2,4418	2,2373
7	2,1712	2,2126	2,3456	2,5624	2,8676	3,1618	3,3740	3,3734	3,1006	2,7583	2,4690	2,2581
8	2,2058	2,2542	2,3968	2,6287	2,9502	3,2610	3,4816	3,4802	3,1921	2,8277	2,5191	2,2964
9	2,2573	2,3163	2,4733	2,7280	3,0737	3,4093	3,6424	3,6397	3,3286	2,9312	2,5937	2,3533

10	2,3190	2,3910	2,5655	2,8477	3,2225	3,5879	3,8356	3,8314	3,4927	3,0555	2,6829	2,4214
11	2,3918	2,4796	2,6749	2,9901	3,3992	3,7999	4,0647	4,0585	3,6872	3,2025	2,7883	2,5018
12	2,4631	2,5668	2,7828	3,1306	3,5734	4,0087	4,2901	4,2819	3,8785	3,3470	2,8916	2,5804
13	2,5184	2,6347	2,8669	3,2401	3,7091	4,1713	4,4653	4,4556	4,0272	3,4591	2,9716	2,6414
14	2,5561	2,6811	2,9244	3,3151	3,8019	4,2826	4,5851	4,5743	4,1289	3,5358	3,0262	2,6829
15	2,5705	2,6987	2,9462	3,3436	3,8372	4,3249	4,6306	4,6194	4,1675	3,5649	3,0470	2,6987
16	2,5561	2,6811	2,9244	3,3151	3,8019	4,2826	4,5851	4,5743	4,1289	3,5358	3,0262	2,6829
17	2,5231	2,6404	2,8740	3,2494	3,7206	4,1851	4,4801	4,4703	4,0398	3,4686	2,9784	2,6465
18	2,4722	2,5780	2,7967	3,1486	3,5957	4,0355	4,3189	4,3105	3,9030	3,3654	2,9048	2,5905
19	2,4138	2,5065	2,7082	3,0333	3,4529	3,8642	4,1341	4,1273	3,7461	3,2470	2,8202	2,5260
20	2,3571	2,4374	2,6228	2,9222	3,3150	3,6988	3,9556	3,9503	3,5945	3,1325	2,7382	2,4636
21	2,3106	2,3809	2,5529	2,8314	3,2023	3,5636	3,8094	3,8053	3,4704	3,0386	2,6708	2,4122
22	2,2695	2,3310	2,4914	2,7515	3,1029	3,4444	3,6804	3,6774	3,3609	2,9557	2,6112	2,3667
23	2,2373	2,2921	2,4435	2,6893	3,0256	3,3515	3,5798	3,5776	3,2755	2,8910	2,5647	2,3312
24	2,2136	2,2636	2,4083	2,6437	2,9689	3,2834	3,5060	3,5043	3,2127	2,8434	2,5304	2,3050

## Βιβλιογραφία

---

Allaerts, K., J. Al Koussa, J. Desmedt, and R. Salenbien. 2017. “Improving the Energy Efficiency of Ground-Source Heat Pump Systems in Heating Dominated School Buildings: A Case Study in Belgium.” *Energy and Buildings* 138: 559–568.

ASHRAE HANDBOOK ‘Heating, Venting, and Air – Conditioning SYSTEMS AND EQUIPMENT’, 2020.

Charnes, A., Cooper, W.W. (1981). *Management models and industrial applications of linear programming*. John Wiley & Sons.

Charnes, A., Cooper, W. W., Harrald, J., Karwan, K. R., & Wallace, W. A. (1976). A goal interval programming model for resource allocation in a marine environmental protection program. *Journal of Environmental Economics and Management*, 3(4), 347-362.

EC, 2018. COM/2018/773. Communication/2018/773. A clean planet for all – A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brussels.

EC, 2016. COM/2016/860. Communication/2016/860. Clean energy for all Europeans. Brussels.

EC, 2014. COM/2014/15. Communication/2014/15. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. Brussels. EU, 2018a. Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Brussels.

Enrico Fabrizio, Vincenzo Corrado, Marco Filippi, ‘A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage’, 2009.

EU, 2018b. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Brussels.

EU, 2018c. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Brussels.

European Commission. 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. “A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030” Available at <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0015&from=EN>

Eurostat 2020. Energy Balance Sheets 2018. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>

Eurostat Statistics Explained. Energy consumption in households 2017. Available at [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households) (Accessed February 28, 2020).

EurObserv’ER. 2019. The State of Renewable Energies in Europe. 19th EurObserv’ER Report, Available at <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2020/The-state-of-renewable-energies-in-Europe-2019.pdf>

- Favre-Perrod P, Geidl M, Klockl B, Koeppl G. A vision of future energy networks. In: Proceedings of the inaugural IEEE PES 2005 conference and exposition in Africa, Durban, South Africa; 11–15 July 2005. p. 13–7. Internet site available at: <http://www.future-energy.ethz.ch> [date of inquiry 24 April 2009].
- Huchtemann, K., and D. Müller. 2013. “Simulation Study on Supply Temperature Optimization in Domestic Heat Pump Systems.” *Building and Environment* 59: 327-335.
- Ijiri, Y. (1965). *Management goals and accounting for control* (Vol. 3). North Holland.
- Jason Papathanasiou & Nikolaos Ploskas, ‘Multiple Criteria Decision Making: Methods, Examples and Python Implementations, May 8, 2017
- Junghans, Lars. 2015. “Evaluation of the Economic and Environmental Feasibility of Heat Pump Systems in Residential Buildings.” *Renewable Energy* 76: 699-705
- Lund, W. John, and Tonya L. Boyd. 2016. “Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review.” *Geothermics* 60: 66–93. doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004.
- Madonna, Francesco, and Francesca Bazzocchi. 2013. “Annual Performances of Reversible Air-to-Water Heat Pumps in Small Residential Buildings.” *Energy and Buildings* 65: 299–309.
- Manwell JF. Hybrid energy systems. In: Cleveland CJ, editor. *Encyclopedia of energy*, vol. 3. London: Elsevier; 2004. p. 215–29.
- Martinopoulos, Georgios, Konstantinos T. Papakostas, and Agis M. Papadopoulos. 2018. “A Comparative Review of Heating Systems in EU countries, Based on Efficiency and Fuel Cost.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90: 687-699
- Michanikos Online: Πηγή εικόνας εξώφυλλου.
- Michopoulos, A., D. Bozis, P. Kidikis, K. Papakostas, and N.A. Kyriakis. 2007. “Three Years Operation Experience of a Ground Source Heat Pump System in Northern Greece.” *Energy and Buildings* 39: 328–334.
- Mouzeviris, Georgios; Aristotle University of Thessaloniki, Mechanical Engineering Papakostas, Konstantinos; ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI, MECHANICAL ENGINEERING, 2020. “Comparative Analysis of Air-to-Water and Ground Source Heat Pumps Performances”
- Μπούρης, Βασικές αρχές ρύθμισης θερμοτικού περιβάλλοντος, Σημειώσεις Θέρμανση-Ψύξη-Κλιματισμός
- Naldi, Claudia, Matteo Dongellini, and Gian Luca Morini. 2015. “Climate Influence on Seasonal Performances of Air-to-Water Heat Pumps for Heating.” *Energy Procedia* 81: 100-107.
- NRCAN. (August 6, 2015). *Water Heaters* [Online]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/products/categories/water-heaters/13735>
- NRCAN. (August 6, 2015). *Energy Sources - Water Heaters* [Online]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/products/categories/water-heaters/14490>
- NRCAN. (August 7, 2015). *Water Heater Guide* [Online]. Available: [http://www.nrcan.gc.ca/sites/oe.nrcan.gc.ca/files/files/pdf/equipment/WaterHeaterGuide\\_e.pdf](http://www.nrcan.gc.ca/sites/oe.nrcan.gc.ca/files/files/pdf/equipment/WaterHeaterGuide_e.pdf)

NRCAN. (August 21, 2015). *Residential Sector Energy Use* [Online]. Available: <http://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=CP&sector=res&juris=ca&rn=2&page=0>

Official Journal of the European Union. 2009. “Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Eco-Design Requirements for Energy-Related Products (recast).” Available at <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:en:PDF>

Official Journal of the European Union. 2010. “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council 2010 on the Energy Performance of Buildings.” Available at <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>

Ooka R, Komamura K. Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms. *Build Environ* 2009;44:1538–44.

Renewable heating and cooling (RHC), European technology and innovation platform. 2019. “2050 Vision for 100% Renewable Heating and Cooling in Europe.” Editor Emiliano Corà. Brussels: RHC-Platform. Available at <https://www.rhcplatform.org/content/uploads/2019/10/RHC-VISION-2050-WEB.pdf>

Singiresu S. Rao, ‘Engineering Optimization Theory and Practice Fourth Edition’, 2009

Staffell, Iain, Dan Brett, Nigel Brandon, and Adam Hawkes. 2012 “A review of Domestic Heat Pumps.” *Energy & Environmental Science* 5: 9291-9306

Terzić, Ivana, Vanja Šušteršič, and Katarina Donović. 2018. “Comparative Analysis of Geothermal Heat Pumps.” *Acta Technica Corvininensis - Bulletin of Engineering*, 11(1): 59-62.

TEE, 2010α. TOTEE20701-1: Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την Έκδοση Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης

TEE, 2010β. TOTEE 20701-2. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων.

TEE, 2010γ. TOTEE 20701-3. Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών.

Wikimedia Commons. (August 10, 2015). *Natural Gas Storage Water Heater* [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Storage\\_water\\_heater#/media/File:Natural\\_gas\\_storage\\_water\\_heater.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/Storage_water_heater#/media/File:Natural_gas_storage_water_heater.gif)

Yang, H., P. Cui, and Z. Fang. 2010. “Vertical-Borehole Ground-Coupled Heat Pumps: A Review of Models and Systems.” *Applied Energy* 87: 16–27.