ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Αποτίμηση της ανταγωνιστικότητας συστημάτων ηλιακής ψύξης σε ευρωπαϊκή κλίμακα»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Μαυρούλη Αικατερίνης

Επιβλέπων

Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: **«Αποτίμηση της ανταγωνιστικότητας συστημάτων ηλιακής ψύξης σε ευρωπαϊκή κλίμακα»**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: **Μαυρούλη Αικατερίνη**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: **2018-9**

Σύνοψη

Η παρούσα διατριβή συνίσταται στην χρήση υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της ωριαίας συμπεριφοράς συστημάτων ψύξης/θέρμανσης σε ετήσια βάση για την αποτίμηση της οικονομικής τους ανταγωνιστικότητας σε διάφορες τοποθεσίες στην Ευρώπη. Πρώτο στάδιο της εργασίας είναι η βιβλιογραφική μελέτη διαφόρων συστημάτων ηλιακής ψύξης/θέρμανσης και η αναγνώριση των βασικών δεικτών αξιολόγησης της ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής τους απόδοσης. Στο επόμενο στάδιο, θα επιλεγούν βάσει της καταλληλόλητας τους οι βασικοί δείκτες που θα αποτελέσουν τις κύριες εξόδους των μοντέλων που θα εφαρμοστούν ύστερα από κατάλληλη τροποποίησή τους. Κύριος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η αποτύπωση των αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από τα μοντέλα κατόπιν βελτιστοποίησης σε ένα ευρωπαϊκό χάρτη και η εποπτική ερμηνεία της μεταβολής της απόδοσης των υπό μελέτη συστημάτων σε σχέση με τα τοπικά κλίματα και τα σχετιζόμενα εθνικά κόστη ενέργειας.

Περίληψη

Η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με τις συνεχώς αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών συστημάτων οικιακής θέρμανσης και ψύξης έχει στρέψει το ενδιαφέρον σε εναλλακτικές λύσεις που σχετίζονται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για εφαρμογές ψύξης / θέρμανσης, τα συστήματα που τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά (ΦΒ) αποτελούν μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική επένδυση με σημαντικά ενεργειακά οφέλη.

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν ετήσιες προσομοιώσεις, με ένα ωριαίο βήμα, προκειμένου να αξιολογηθεί η τεχνοοικονομική απόδοση ενός συστήματος θέρμανσης ψύξης αποτελούμενο από φωτοβολταϊκά και μια συμβατική αντλία θερμότητας (VCC) για τον οικιστικό τομέα. Εξειδικεύοντας, χρησιμοποιήθηκαν καιρικά δεδομένα για μεμονωμένες πόλεις από διάφορες χώρες της Ευρώπης από τη βάση δεδομένων του NREL. Ως κτίριο αναφοράς λήφθηκε μια κατοικία 80m2 με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά για όλες τις πόλεις έτσι ώστε η μελέτη να επικεντρωθεί στην επίδραση των μετεωρολογικών δεδομένων στην απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, σύστημα αναφοράς ορίστηκε ένας λέβητας καύσης φυσικού αερίου με απόδοση 95%, ενώ για την περίπτωση της ψύξης μονάδες κλιματισμού με COP 3,28.

Με βάση τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου για κάθε πόλη, προέκυψαν σημαντικά οικονομικά οφέλη από την εγκατάσταση και λειτουργία του εξεταζόμενου συστήματος ΦΒ - αντλία θερμότητας. Για διαφορετικές επιφάνειες εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών που εξετάστηκαν, με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης το σύστημα επιτυγχάνει τις υψηλότερες οικονομικές επιδόσεις στις νότιες περιοχές της Ευρώπης. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στην υψηλή ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και αφετέρου στο υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές αυτές. Από την άλλη πλευρά, οι εφαρμογές τεχνολογιών ηλιακής αξιοποίησης, παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαμηλό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, με τη μεγαλύτερη τιμή να αντιστοιχεί στο Ρέικιαβικ (6.2%).

Τέλος, για διαφορετικά συστήματα (αντλία θερμότητας χωρίς ΦΒ, αντλία θερμότητας με διαφορετικές επιφάνειες ΦΒ) πραγματοποιήθηκε ανάλυση των εκπεμπόμενων ρύπων. Κατά αυτόν τον τρόπο, αποδεικνύεται ότι το εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης/ ψύξης είναι φιλικότερο προς το περιβάλλον καθώς για όλες τις πόλεις παρατηρήθηκε σημαντική ελάττωση των ρύπων. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του εξεταζόμενου σεναρίου με τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (10m2), υπάρχει περίσσεια ενέργειας η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο και θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κατάλληλα προκειμένου να αντικαταστήσει μέρος της ενέργειας που παράγεται από συμβατικές μονάδες και επομένως να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Λέξεις-κλειδιά
Ηλιακή ψύξη, Φωτοβολταϊκά, Αντλία θερμότητας, τεχνοοικονομική ανάλυση

POST-GRADUATE THESIS:	**«Assessment of techno-economic competiveness for solar cooling systems in European»**
STUDENT:	**Mavrouli Aikaterini**
SUPERVISOR:	**Karellas Sotirios, Professor, School of Mechanical Engineering**
ACADEMIC YEAR:	**2018-9**

Abstract

This study consists in the use of off-design models for the simulation of the hourly performance of reversible heat pumps in order to assess their economic competitiveness on annual basis, in coupling with photovoltaic panels, for a number of European cities. In the first level of the analysis, a literature review of the potential solar driven heating/cooling systems is presented in order to identify the key performance indicators of such systems and evaluate the current state of the art in terms of their techno-economic competitiveness. The second level of the analysis consists in the selection of the proper outputs of the simulation models for the needs of the techno-economic investigation. Main task of this study is the detailed mapping of the performance results for the photovoltaic driven heat pumps on European basis and the global overview of the results with respect to local climates and the respective cost of energy per country.

Summary

The fossil fuel depletion along with the growing concerns on the environmental impact of conventional systems for residential heating and cooling has turned attention towards renewable driven alternatives. Solar photovoltaic (PV) driven systems offer a viable solution, being in fact the most competitive -both from energetic as well as economic viewpoint- amongst the solar driven systems for cooling/heating applications.

This study conducted year round simulations, with an hourly step, to evaluate the techno-economic performance of a coupled photovoltaic (PV)-vapor compression cooling/heating system (VCC) on residential scale; weather data for a single city per European country from NREL's database was used. A reference 80 m² residential building was considered on all cases in order to focus on the direct effects of the system's performance in correspondence with the meteorological data of each location. As reference heating system was considered a 95% efficiency natural gas fired boiler, while for the cooling case, single split air conditioning units were considered, with a seasonal COP of 3.28. The savings of the proposed PV-VCC system were derived from the savings of the natural gas and the electricity of the reference systems, based on the national prices per case.

Taking into consideration electricity and gas prices for each city, significant economic benefits were obtained from the operation of the PV – heat pump system. For different installed PV surfaces, the results of the analysis revealed that the system achieves its highest economic performance in the southern regions, thanks not only to the high solar availability throughout the year, but also to the higher costs of electricity. The implementation of solar utilization technologies, on the other hand, results in very low exergy efficiencies, with the highest value corresponding to Reykjavik (6.2%).

Finally, the study investigated the emitted pollutants of different systems (heat pump without PV, heat pump with different PV surfaces). Hence, it occurred that the proposed heating / cooling system is much more environmentally

friendly as a significant reduction of pollutants has been observed in all cities. For the case of the scenario with the maximum area of installed photovoltaics (10m2), there is a surplus of energy that is fed into the grid and this amount could be appropriately used to replace a part of the energy produced by conventional plants and thus achieve even greater reduction of emitted pollutants

Keywords
Solar cooling, Photovoltaics, Heat pump, techno-economic analysis

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Σωτήριου Καρέλλα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Καρέλλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για την συνεχή υποστήριξη του, το χρόνο που διέθεσε προς επίλυση απορριών και διαφόρων ζητημάτων που ανέκυπταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου, τις εύστοχες παρατηρήσεις του και το άριστο κλίμα που χαρακτήριζε τη συνεργασία μας.

Τέλος, ένα ακόμη μεγάλο ευχαριστώ οφείλω πρώτα από όλα στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη τους, αλλά και τους φίλους που αποτέλεσαν σημαντικό στήριγμα για την επίτευξη του στόχου μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Σύνοψη iii

Περίληψη iii

Abstract v

Summary v

Ευχαριστίες vii

Πίνακας Περιεχομένων viii

Κατάλογος εικόνων x

Κατάλογος πινάκων xiv

Πίνακας Συμβόλων xv

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή 1

1.1 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ευρώπη 2

1.2 Ηλιακή Ενέργεια και αξιοποίηση αυτής 7

1.2.1 Φωτοβολταικά 7

1.2.2 Φωτοβολταϊκά στην Ευρώπη 9

1.2.3 Ηλιακοί συλλέκτες 12

1.3 Εισαγωγή στις Τεχνολογίες Ψύξης/Θέρμανσης 13

1.3.1 Ψύξη με μηχανική συμπίεση 14

Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης 16

1.3.2 Ψύξη με απορρόφηση 16

Συντελεστής Συμπεριφοράς 18

1.3.3 Ψύξη με προσρόφηση 19

1.4 Ηλιακή ψύξη 21

1.5 Επιστημονικό Ερώτημα 23

Κεφάλαιο 2. Επεξεργασία 25

2.1 Κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών 25

2.2 Θερμικά και ψυκτικά φορτία 27

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση αποτελεσμάτων 35

3.1 Προσδιορισμός γωνίας κλίσης και προσανατολισμού των φβ για μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας 35

3.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης για το εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης - ψύξης. ... 40

3.3 Οικονομικοί δείκτες (Καθαρή Παρούσα Αξία-Περίοδος αποπληρωμής Κεφαλαίου) 42

3.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων 44

Κεφάλαιο 4. Εξοικονόμηση ρύπων 51

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα- Προτάσεις 69

Βιβλιογραφία 71

Κατάλογος εικόνων

Εικ. 1.1. Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας ανά χώρα στην ΕΕ για το 2006 και το 2016. Πηγή δεδομένων:EuropeanCommission[4] 3

Εικ. 1.2. Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην Ευρωπαική Ένωση για το έτος 2016 Πηγή δεδομένων: Eurostat 4

Εικ. 1.3. Ανάπτυξη της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας στην Ευρωπαική Ένωση κατά το χρονικό διάστημα 2006-2016[5] 4

Εικ. 1.4. Ποσοστό ενεργειακής εξάρτησης κατά τη χρονική περίοδο 2006-2016[5]. 6

Εικ. 1.5. Ευρωπαϊκές ετήσιες συνδέσεις φωτοβολταϊκών κατά τη χρονική περίοδο 2000-2017[12] 10

Εικ. 1.6. Συνολικές ευρωπαϊκές συνδέσεις φωτοβολταϊκών κατά τη χρονική περίοδο 2000-2017[12]. 11

Εικ. 1.7. Η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη έως το 2017 για επιλεγμένες χώρες[12]. 11

Εικ.1.8. Βασική κατηγοριοποίηση ηλιακών συλλεκτών 12

Εικ. 1.9. Επίπεδος συλλέκτης [13] 13

Εικ. 1.10. Σχεδιάγραμμαψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών (VaporCompressionCycle-VCC) 14

Εικ. 1.11.Σχεδιάγραμμα ψυκτικής διάταξης με απορρόφηση 17

Εικ. 1.12.Σχεδιάγραμμα ψυκτικής διάταξης με προσρόφηση 20

Εικ. 1.13.Καταμερισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας των νοικοκυριών σε χώρες τις Ευρωπαϊκής Ένωσης 22

Εικ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση των δύο τρόπων λειτουργίας αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας (α) κατά την ψυχρή και (β) τη θερμή λειτουργία 25

Εικ. 2.2 Θερμικά και ψυκτικά φορτία για κτήριο αναφοράς μια κατοικία, όπως αυτά προέκυψαν από το πρόγραμμα EnergyPlus με βάση τα καιρικά δεδομένα της Αθήνας. 28

Εικ. 2.3 Θερμικά και ψυκτικά φορτία για κτήριο αναφοράς μια κατοικία, όπως αυτά προέκυψαν από το πρόγραμμα EnergyPlus με βάση τα καιρικά δεδομένα του Βερολίνου. 29

Εικ. 2.4Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις για το έτος 2018 29

Εικ. 2.5Τιμές φυσικού αερίου για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις για το έτος 2018 (Για την Ελλάδα λήφθηκε η τιμή του φυσικού αερίου για το έτος 2017). 30

Εικ. 2.6 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για το Φ/Β - MLU255HC για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}=25 °C, ταχύτητα ανέμου u_w=2.5 m/s) 33

Εικ. 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για το Φ/Β - MLU255HC για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}=25 °C, ταχύτητα ανέμου u_w=2.5 m/s) 33

Εικ. 3.1Γραφική απεικόνιση της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας ενός Φ/Β πλαισίου που βρίσκεται στο Βόρειο ημισφαίριο. 35

Εικ. 3.2Επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος (σε επί τοις εκατό ποσοστά) [35]. 36

Εικ. 3.3 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης. 44

Εικ. 3.4 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης. 45

Εικ. 3.5 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης. 46

Εικ. 3.6 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης. 47

Εικ. 3.7 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης. 48

Εικ. 3.8 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για το Κίεβο. 49

Εικ. 3.8 Συγκεντρωτικοί ευρωπαϊκοί χάρτες για (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης (%), (β) την εξοικονόμηση ενέργειας (MWh/έτος), (γ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου (έτη). ...50

Εικ. 4.1 Ετήσια συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.....54

Εικ. 4.2 Ετήσια συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 55

Εικ. 4.3 Ετήσια συγκέντρωση μεθανίου (CH_4) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 56

Εικ. 4.4 Ετήσια συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.....57

Εικ. 4.5 Ετήσια συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 58

Εικ. 4.6 Ετήσια συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM<2.5μm στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 59

Εικ. 4.7 Ετήσια συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM>10μm στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 60

Εικ. 4.8 Ετήσια συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM>2.5μmκαι PM<10μm στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 61

Εικ. 4.9 Ετήσια συγκέντρωση διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.....62

Εικ. 4.10 Ετήσια συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις 63

Εικ. 4.11Ετήσια συγκέντρωση ισοδύναμων εκπομπών ανόργανων ουσιών PM2.5 στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις. 64

Εικ. 4.12 Ετήσια συγκέντρωση ισοδύναμων εκπομπών CFC-11 στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις. 65

Εικ. 4.13 Ετήσια συγκέντρωση ισοδύναμων εκπομπών CO_2εστην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις..... 66

Κατάλογος πινάκων

Πιν. 2.1.Χαρακτηριστικά για τη λειτουργία ψύξης, της εξεταζόμενης αντλίας θερμότητας [28] 26

Πιν. 2.2. Θερμικές ιδιότητες των δομικών υλικών βάσει του EN ISO 6946[30] 27

Πιν. 2.3. Χαρακτηριστικά μεγέθη για το Φ/Β-MLU255HC[34] 32

Πιν. 3.1. Κόστος μονάδας (€) και ειδικό κόστος (€/KW)για την αντλία θερμότητας σε συνάρτηση με την ισχύ [37] 42

Πίνακας Συμβόλων

c_{ideal}	Συντελεστής ιδανικότητας	[-]
COP_{th}	Θεωρητικός συντελεστής απόδοσης	[-]
E	Εξίσωση χρόνου για κάθε μέρα του έτους	[S]
EER	Δείκτης ενεργειακής απόδοσης	[KW/KW]
Ex_{cool}	Εξέργεια κατά την περίοδο ψύξης	[J/S]
Ex_{heat}	Εξέργεια κατά την περίοδο θέρμανσης	[J/S]
Ex_{out}	Εξέργεια	[J/S]
$\dot{E}x$	Ρυθμός εξέργειας	[W]
I_0	Αντίστροφο ρεύμα κορεσμού	[A]
I_b	Άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	[W/m^2]
I_{bn}	Μέση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου	[W/m^2]
I_{bn}	Άμεση ακτινοβολία κάθετου επιπέδου	[W/m^2]
I_{bT}	Άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου	[W/m^2]
I_d	Μέση διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου	[W/m^2]
I_{glob}	Μέση ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	[W/m^2]
I_{ph}	Φωτόρευμα	[A]
$I_{pv,arr}$	Ολικό ρεύμα	[A]
$I_{pv,mod}$	Ρεύμα εξόδου	[A]
$I_{sc,STC}$	Ρεύμα βραχυκυκλώματος σε τυπικές συνθήκες δοκιμής	[A]
$I_{sol,STC}$	Ηλιακή ακτινοβολία σε τυπικές συνθήκες δοκιμής	[W/m^2]
L_{loc}	Γεωγραφικό μήκος	[deg]
L_{st}	Γεωγραφικό πλάτος	[deg]

L_{WT}	Leaving Water Temperature	[°C]
n_{ex}	Εξεργειακός βαθμός απόδοσης	[%]
$N_{pv,p}$	Αριθμός ΦΒ συνδεδεμένα παράλληλα	[-]
$N_{pv,s}$	Αριθμός ΦΒ συνδεδεμένα σε σειρά	[-]
Ns	Αριθμός φωτοβολταϊκών κυττάρων	[-]
q	Φορτίο των ηλεκτρονίων	[C]
q	Ρυθμός ροής νερού στον εξατμιστή	[l/s]
Q_c	Ψυκτική ισχύς	[W]
$\dot{Q}_{\Sigma}$	Θερμική ισχύς	[W]
$\dot{Q}_{\Psi}$	Ωφέλιμη ψυκτική ισχύς	[W]
Rp	Αντίσταση διακλάδωσης	[Ohm]
Rs	Αντίσταση σειράς	[Ohm]
$T_{cell,STC}$	Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού κυττάρου	[°C]
T_{sol}	Θερμοκρασία του ήλιου	[K]
$V_{pv,arr}$	Ολική τάση	[V]
$W_{th,th}$	Μηχανική ισχύς	[W]
Δt	χρονική απόσταση από το ηλιακό μεσημέρι	[S]

<u>Ελληνικά Σύμβολα</u>

β	Κλίση επιφάνειας	[Deg]
δ	Ηλιακή απόκλιση	[Deg]
Θ	Γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια	[Deg]
$Θ_{amb}$	Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος	[°C]
Θz	Γωνία ζενίθ	[Deg]
I_T	Ολική ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου	[W/m^2]
κ	Σταθερά Boltzmann	[J/K]

μ_{sc}	Συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκυκλώματος	$[A \cdot K^{-1}]$
ϕ	Γεωγραφικό πλάτος	[Deg]
ω	Ωριαία γωνία	[Deg]

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η παραγωγή ενέργειας ήταν ανέκαθεν ένα θέμα ιδιάζουσας σημασίας, άμεσα συνδεδεμένο με καθοριστικούς για την ανθρωπότητα παράγοντες όπως το περιβάλλον, η οικονομία και η κοινωνία. Σήμερα, οι ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας ικανοποιούνται κατά κύριο λόγο από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως άνθρακα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Ωστόσο, δεδομένου πως η ανθρωπότητα καταναλώνει ημερησίως τόση ποσότητα ορυκτών καυσίμων όση μπορεί η φύση να δημιουργήσει σε χίλια περίπου χρόνια, αντιλαμβανόμαστε πως η χρήση άλλων πηγών ενέργειας αποτέλεσε επιτακτική ανάγκη[1]. Από την άλλη πλευρά, η πυρηνική ενέργεια, μολονότι παράγει τεράστιες ποσότητες ενέργειας, διχάζει την κοινή γνώμη λόγω της θανατηφόρας ρύπανσης που μπορεί να προκληθεί σε ενδεχόμενο ατυχήματος καθώς επίσης και λόγω του προβλήματος της διάθεσης των πυρηνικών αποβλήτων.

Κατά αυτόν τον τρόπο, τόσο η επιστημονική κοινότητα όσο και η κοινωνία εν γένει στράφηκε προς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες διαθέτουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων. Αρχικά, πρόκειται για ανεξάντλητες πηγές ενέργειας οι οποίες είναι ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον και συντελούν στον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα καθώς και άλλων ρυπαντών της ατμόσφαιρας, όπως και στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επιπλέον, πρόκειται για εγχώριες πηγές ενέργειας που συνεισφέρουν σημαντικά στην ενδυνάμωση της ενεργειακής ανεξαρτησίας ενώ παράλληλα έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος το οποίο δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της οικονομίας.

Βασική μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας αποτελεί η ηλιακή ενέργεια. Η κυριότερη ενεργειακή πηγή στην επιφάνεια του πλανήτη είναι η ηλιακή ακτινοβολία και για αυτόν τον λόγο τα συστήματα μετατροπής της σε χρήσιμες μορφές ενέργειας όπως θερμότητα, ηλεκτρισμό και μηχανική ενέργεια μελετώνται εκτενώς. Η ενέργεια που απορροφά η Γη από τον ήλιο κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι εξαπλάσια του συνόλου των ορυκτών καυσίμων που διαθέτει ο ίδιος [2]. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια της ακτινοβολίας του ήλιου που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας ισοδυναμεί κατά μέσο όρο με $1.5\cdot10^{18}$kWh ανά έτος[2]. Από την ενέργεια η οποία φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας το 30% ανακλάται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και επομένως η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τη Γη είναι περίπου 10^{18}kWh ανά έτος. Από το ποσό αυτό έχει υπολογιστεί ότι ανά έτος $2.9\cdot10^{17}$kWh χρησιμοποιούνται για την εξάτμιση νερού στην ατμόσφαιρα, $2\cdot10^{17}$kWh μετατρέπονται σε κινητική ενέργεια του αέρα και ένα ποσό ίσο με $8\cdot10^{14}$kWh χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση[3]. Η υπόλοιπη ηλιακή ενέργεια που απορροφάται θερμαίνει τη Γη και εκπέμπεται πίσω στο διάστημα υπό μορφή θερμικής ακτινοβολίας, προκειμένου να παραμένει σταθερή η θερμοκρασία του πλανήτη.

Σε παγκόσμιο επίπεδο η θέρμανση και η ψύξη απαιτούν ιδιαίτερα υψηλά ποσά ενέργειας. Συστήματα ψύξης χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους χώρους, σύμφωνα κάθε φορά με τις απαιτήσεις της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς και για τη συντήρηση τελικών προϊόντων σε ψυκτικούς θαλάμους, αλλά και σε μεγαλύτερους χώρους. Επιπρόσθετα, μεγάλα ποσά ενέργειας καταναλώνονται και για τις ψύξη κατοικιών και χώρων εργασίας με σκοπό την επίτευξη θερμικής άνεσης. Τις τελευταίες

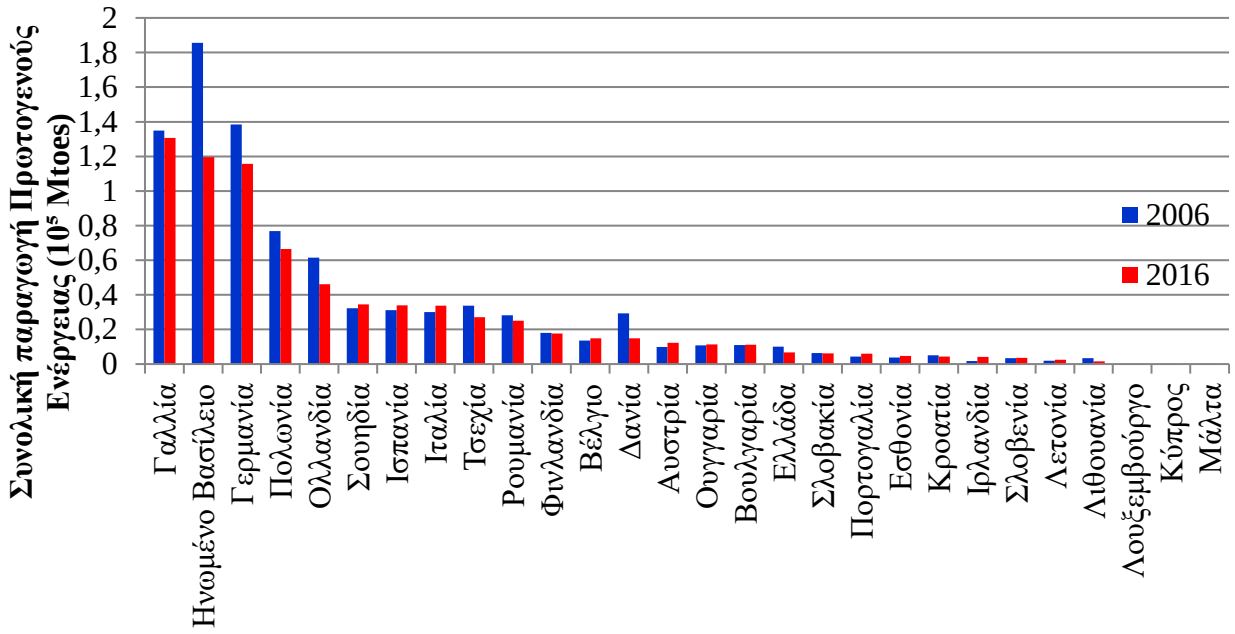
δεκαετίες, ο κλάδος της ψύξης παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη, με αποτέλεσμα να αυξάνονται συνεχώς οι απαιτήσεις σε ενέργεια. Έτσι λοιπόν, η ψύξη με ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον αφενός γιατί πρόκειται για μια ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας και αφετέρου διότι ο κλιματισμός χρειάζεται το καλοκαίρι όπου η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μέγιστο.

1.1 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ευρώπη

Η Ευρώπη έρχεται αντιμέτωπη με μια σειρά προκλήσεων που αφορούν την ενέργεια όπως την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, την ρύπανση του περιβάλλοντος κατά την παραγωγή της, καθώς επίσης και τα προβλήματα που σχετίζονται με τον ενεργειακό εφοδιασμό. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται παγκοσμίως κατά κύριο λόγο οι θερμικοί σταθμοί, βασικό μειονέκτημα των οποίων αποτελεί η εκπομπή ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, σημαντικά ποσά ενέργειας παράγονται μέσα από την πυρηνική τεχνολογία, η οποία μολονότι είναι σε θέση να αντικαταστήσει τους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, αμφισβητείται από τους επιστήμονες λόγω των θανάσιμων ατυχημάτων όπως αυτό του Chernobyl και της Fukushima. Έτσι λοιπόν η ανάπτυξη των ΑΠΕ αποτέλεσε επιτακτική ανάγκη, και αναπτύχθηκαν εξειδικευμένες τεχνολογίες (φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μονάδες βιομάζας κτλ.), οι οποίες αποσκοπούν στην όσο το δυνατό καλύτερη αξιοποίηση των ήπιων μορφών ενέργειας.

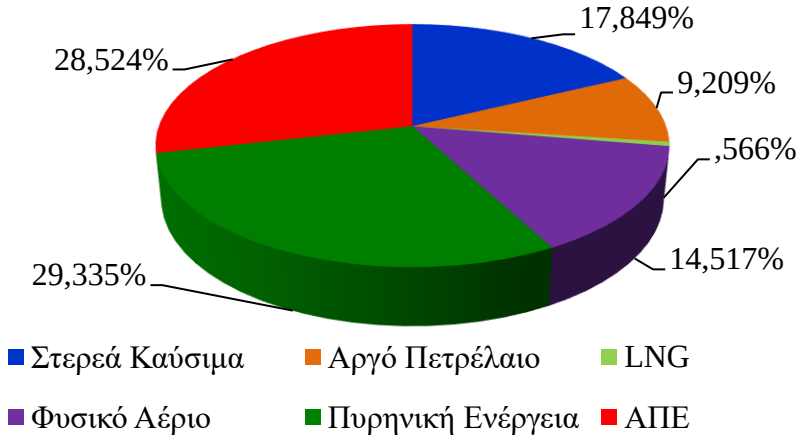
Η κατανάλωση της ενέργειας διαφοροποιείται ανάλογα με την χώρα καθώς εξαρτάται από το επίπεδο οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, τις κλιματολογικές συνθήκες και το πόσο ενεργειακά αυτοδύναμη είναι η ίδια. Η εξάρτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) από τις εισαγωγές ενέργειας, ιδίως του πετρελαίου και πιο πρόσφατα του φυσικού αερίου, αποτελεί ένα ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση προκειμένου να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες, εισάγει ενέργεια από τρίτες χώρες. Με βάση πρόσφατες μελέτες περισσότερο από το ήμισυ (53.6%) της καταναλισκόμενης ενέργειας της ΕΕ (28 κράτη μέλη) το 2016 προήλθε από εισαγόμενες πηγές [2]. Η μείωση της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ μπορεί να οφείλεται αφενός στις εξαντλούμενες προμήθειες πρώτων υλών και αφετέρου στην πεποίθηση ορισμένων παραγωγών πως η εκμετάλλευση περιορισμένων πόρων δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Για το έτος 2016, το υψηλότερο επίπεδο παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ ήταν στη Γαλλία, με ποσοστό 17.3% του συνόλου της ΕΕ. Ακολουθεί το Ηνωμένο Βασίλειο (15.8%) και η Γερμανία (15.3%). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα μιας δεκαετίας νωρίτερα, οι πιο βασικές μεταβολές ήταν η πτώση κατά 5.1 και 1.3 ποσοστιαίων μονάδων για το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Δανία και η αύξηση κατά 2.1 και 1.1 ποσοστιαίες μονάδες για τη Γαλλία και την Ιταλία. Όσον αφορά τα υπόλοιπα κράτη μέλη οι μεταβολές κυμάνθηκαν κατά +/- 1%. Επιπλέον, μείωση κατά την περίοδο που εξετάστηκε παρουσίασαν η Ολλανδία, η Γερμανία, η Ελλάδα, η Τσεχική Δημοκρατία και η Λιθουανία.

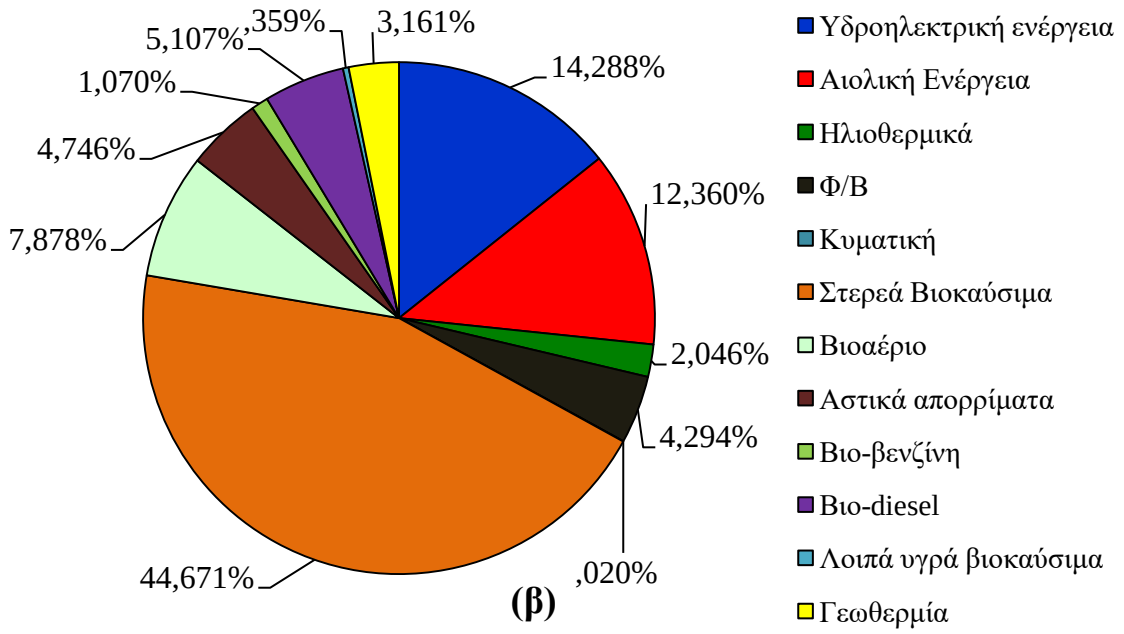


Εικ. 1.1. Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας ανά χώρα στην ΕΕ για το 2006 και το 2016. Πηγή δεδομένων:European Commission[4]

Η πιο ουσιαστική συμβολή πηγής ενέργειας στην παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ το 2016 ήταν εκείνη της πυρηνικής ενέργειας με ποσοστό 28.7% του συνόλου. Πιο συγκεκριμένα στην Γαλλία η πυρηνική ενέργεια αντιστοιχούσε σχεδόν στο 80% της εθνικής παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας, με τη χώρα του Βελγίου και της Σλοβακίας να παρουσιάζουν και αυτές ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά. Σε άλλα κράτη μέλη το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας στην πρωτογενή παραγωγή ήταν μικρότερο από το ήμισυ του συνόλου, ενώ στα μισά δεν υπήρχε η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας με τη Γερμανία να αποσκοπεί στα κλείσιμο όλων των πυρηνικών αντιδραστήρων της μέχρι το 2022. Επιπλέον, το 2016 το 27.9% του συνόλου της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ προήλθε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ακολουθούν τα στερεά καύσιμα (17.5%, κυρίως άνθρακας) και το φυσικό αέριο (14.2%) και το αργό πετρέλαιο (9.8%)[5].

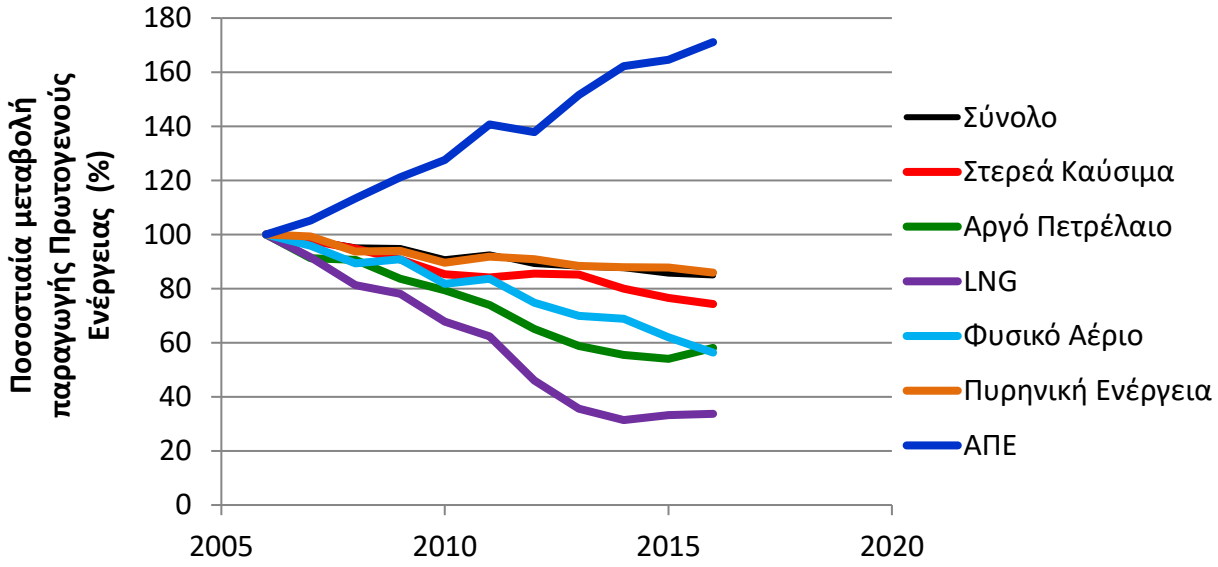


(α)



Εικ. 1.2. Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση για το έτος 2016 Πηγή δεδομένων: Eurostat .

Στην ΕΕ παρουσιάστηκε σημαντική αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά την χρονική περίοδο 2006-2016 όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, με μια μικρή μείωση της παραγωγής το 2011. Όπως παρατηρούμε από το σχήμα, η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές αυξήθηκε πάνω από 60% κατά τη διάρκεια της δεκαετίας αυτής αντικαθιστώντας, εν μέρει, την παραγωγή από άλλες πηγές ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, σημαντική μείωση παρουσίασε το φυσικό αέριο (-41.2%), το αργό πετρέλαιο (-39.0%) και τα στερεά καύσιμα (-30.8%), ενώ η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας μειώθηκε κατά 15.2%[5].

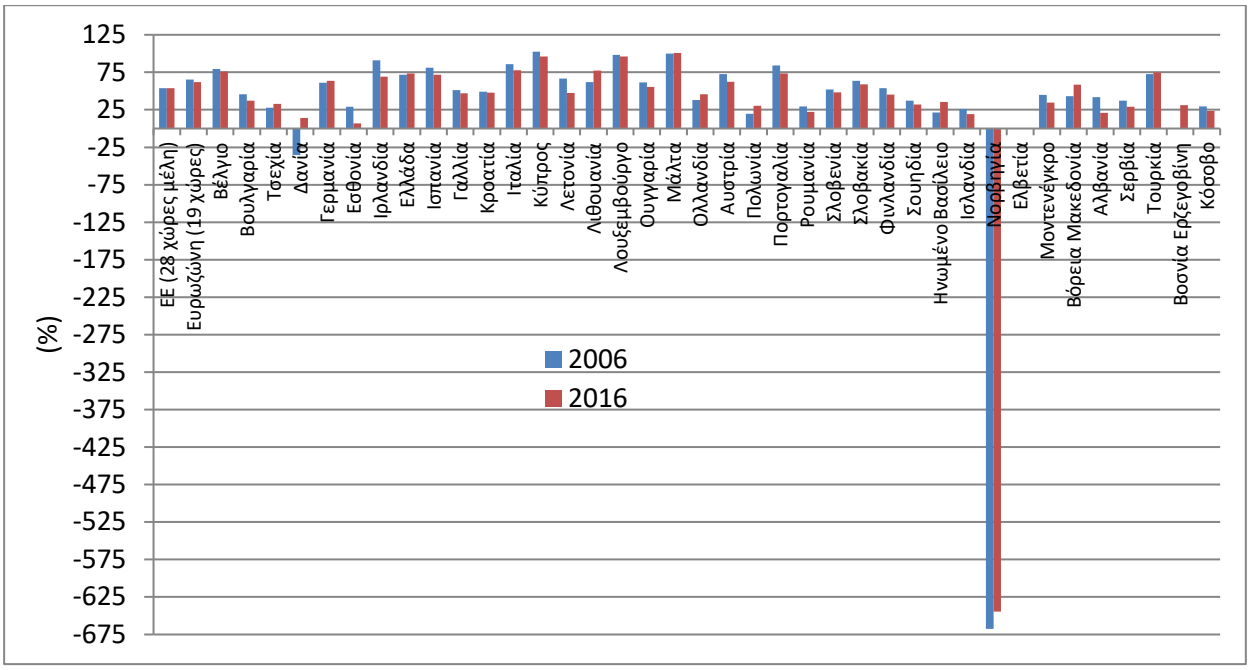


Εικ. 1.3. Ανάπτυξη της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας στην Ευρωπαικη Ένωση κατά το χρονικό διάστημα 2006-2016[5]

Η μείωση της πρωτογενούς παραγωγής λιθάνθρακα, λιγνίτη, πετρελαίου, φυσικού αερίου και πιο πρόσφατα της πυρηνικής ενέργειας έχει ως συνέπεια η ΕΕ να εξαρτάται σημαντικά από τις εισαγωγές πρωτογενούς ενέργειας προκειμένου να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες. Ως κύριος προμηθευτής αργού πετρελαίου, φυσικού αερίου αλλά και ο μεγαλύτερος προμηθευτής στερεών καυσίμων, είναι η Ρωσία. Ακόμη, εισαγωγές πρωτογενούς ενέργειας πραγματοποιούνται από τη Νότια Αφρική την Κολομβία, τη Νορβηγία, το Ιράκ, το Αζερμπαϊτζάν, τη Νιγηρία καθώς και την Αυστραλία. Έτσι το ποσοστό εξάρτησης της ΕΕ-28 από τις εισαγωγές ενέργειας έφθασε το 53.6% το 2016. Αναλυτικότερα, τα υψηλότερα ποσοστά το 2016 σημειώθηκαν για το αργό πετρέλαιο (87.8%) και για το φυσικό αέριο (70.4%), ενώ για τα στερεά καύσιμα ήταν 40.2%[5].

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η ενεργειακή εξάρτηση των κρατών μελών της ΕΕ. Το 2013, δεδομένου ότι δεν ήταν πλέον καθαρός εξαγωγέας, το ποσοστό ενεργειακής εξάρτησης της Δανίας έγινε θετικό και παρέμεινε θετικό και το 2016. Το ίδιο συνέβη και σε όλα τα άλλα κράτη μέλη της ΕΕ. Το 2016 τα χαμηλότερα ποσοστά εξάρτησης από την ενέργεια καταγράφηκαν για την Εσθονία, τη Δανία, τη Ρουμανία και την Πολωνία. Η Μάλτα, η Κύπρος και το Λουξεμβούργο ήταν εξ ολοκλήρου εξαρτημένες από τις εισαγωγές πρωτογενούς ενέργειας, με ποσοστά εξάρτησης πάνω από 96,0%.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 2006-2016 παρατηρείται ότι η Δανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Λιθουανία, οι Κάτω Χώρες και η Πολωνία εξαρτώνται όλο και περισσότερο από τις εισαγωγές ενέργειας προκειμένου να ικανοποιήσουν την ενεργειακή ζήτηση. Αυτό οφείλεται στη μείωση της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας που σχετίζεται με την εξάντληση των πρώτων υλών. Επιπλέον, μια αυξανόμενη εξάρτηση παρατηρήθηκε στο Βέλγιο, την Τσεχική Δημοκρατία, την Ελλάδα, τη Γερμανία και τη Μάλτα, ενώ τα υπόλοιπα κράτη μέλη της ΕΕ σημείωσαν πτώση των ποσοστών ενεργειακής εξάρτησης για το διάστημα αυτό. Η πιο ταχεία αλλαγή σημειώθηκε στην Εσθονία, όπου το ποσοστό μειώθηκε από 29,2% σε 6,8%. Επιπροσθέτως, σημαντική μείωση (περισσότερο από 10,0 ποσοστιαίες μονάδες) παρουσιάστηκε στην Ιρλανδία, τη Λετονία, την Πορτογαλία και την Αυστρία. Αυτό αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης καθώς και στην παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.



Εικ. 1.4. Ποσοστό ενεργειακής εξάρτησης κατά τη χρονική περίοδο 2006-2016[5].

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει πως περισσότερο από το ήμισυ της ενέργειας της ΕΕ-28 προέρχεται από χώρες εκτός της ΕΕ ,με την Ρωσία να αποτελεί έναν βασικό προμηθευτή ενέργειας. Ωστόσο, ιδιαίτερα μετά τη σύγκρουση με την Ουκρανία, ενισχύθηκαν σημαντικά οι ανησυχίες για την ασφάλεια του εφοδιασμού από τη Ρωσία. Για το λόγο αυτόν σχεδιάστηκαν νέα μέτρα για τις αγορές πετρελαίου και φυσικού αερίου προκειμένου τα κράτη μέλη της ΕΕ να συνεργαστούν αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση ενδεχόμενων διαταραχών στον εφοδιασμό ενέργειας.

Τον Νοέμβριο του 2010, υιοθετήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μια στρατηγική η οποία έθεσε προτεραιότητες για μια περίοδο 10 ετών όπως την επίτευξη μιας ενεργειακά αποδοτικής Ευρώπης τη δημιουργία μιας πραγματικά πανευρωπαϊκής ολοκληρωμένης αγοράς ενέργειας, την ενδυνάμωση των καταναλωτών και την επίτευξη του υψηλότερου επιπέδου ασφάλειας και προστασίας, την επέκταση της ηγετικής θέσης της Ευρώπης στον τομέα της ενεργειακής τεχνολογίας και της καινοτομίας καθώς και την ενίσχυση της εξωτερικής διάστασης της ενεργειακής αγοράς της ΕΕ[6]. Αυτοί οι στόχοι αναπτύχθηκαν περαιτέρω μέσω μιας ενεργειακής στρατηγικής για το 2030, η οποία στοχεύει μεταξύ άλλων στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990[7]. Έτσι προτάθηκε ένα μεταρρυθμισμένο σύστημα εμπορίας εκπομπών της ΕΕ (European Union Emissions Trading System, EUETS), καθώς επίσης και νέοι δείκτες για την ανταγωνιστικότητα και την ασφάλεια του ενεργειακού συστήματος, όπως οι διαφορές τιμών με τους κυριότερους εμπορικούς εταίρους, η διαφοροποίηση της προσφοράς και η ικανότητα διασύνδεσης μεταξύ των χωρών της ΕΕ. Επιπλέον παρουσιάστηκαν ιδέες για ένα νέο σύστημα διακυβέρνησης βασισμένο σε εθνικά σχέδια για ανταγωνιστική, ασφαλή και βιώσιμη ενέργεια και ακολούθησε ένας μακροπρόθεσμος στόχος, ο οποίος αναφέρεται στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της ΕΕ κατά 80-95% έως το 2050[8].

1.2 Ηλιακή Ενέργεια και αξιοποίηση αυτής

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές. Πρόκειται για μια ανεξάντλητη, άφθονη πηγή ενέργειας η αξιοποίηση της οποίας σε γενικότερο πλαίσιο δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον. Επίσης είναι ευρέως διαθέσιμη ενώ παράλληλα αξιοποιείται σε πλήθος εφαρμογών όπως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μέρη που δεν διαθέτουν σύνδεση με το δίκτυο , για την απόσταξη νερού στην Αφρική , ή ακόμη και σε δορυφόρους στο διάστημα. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ελάχιστη συντήρηση που απαιτούν τα συστήματα ηλιακής ενέργειας καθώς επίσης και η αθόρυβη λειτουργία τους. Για όλους αυτούς τους λόγους οι τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον με συνέπεια η ηλιακή βιομηχανία να αναπτύσσεται συνεχώς. Ωστόσο η χρήση της ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η ασυνεχής χρονική κατανομή την ημέρα και τη νύχτα, η παρουσία νεφών καθώς και η εναλλαγή της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των διαφόρων εποχών του έτους. Για αυτό τον λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνδυασμό με άλλες ενεργειακές πηγές καθώς και να γίνει χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας όπως μπαταρίες. Ένα επιπλέον πρόβλημα αποτελεί η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας και έτσι σε ορισμένες εφαρμογές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν συγκεντρωτικά συστήματα. Επιπροσθέτως, βασικό μειονέκτημα της ηλιακής ενέργειας είναι το υψηλό ειδικό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης KWh.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί με διάφορα συστήματα συλλογής και τεχνολογίες μετατροπής της σε χρήσιμες για τον άνθρωπο μορφές ενέργειας. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας διακρίνεται σε τρείς βασικές κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, με σκοπό τη θέρμανση νερού, τη θέρμανση χώρων και πολλές άλλες χρήσεις (οικιακές, βιομηχανικές κλπ). Από την άλλη πλευρά τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

1.2.1 Φωτοβολταϊκά

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε και αναλύθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον Henri Becquerel και αναφέρεται στην εμφάνιση διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο περιοχών ενός υλικού όταν πέσει φως πάνω του [9]. Προκειμένου να εμφανισθεί το φαινόμενο απαιτείται η απορρόφηση φωτονίων καθώς επίσης και η ύπαρξη εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στο υλικό που προκύπτει από κάποιο φράγμα δυναμικού, έτσι ώστε να διαχωριστούν οι φορείς ηλεκτρισμού (ηλεκτρόνια και οπές) οι οποίοι δημιουργούνται λόγω απορρόφησης των φωτονίων.

Τα στοιχειώδη φωτοβολταϊκά (φ/β) ονομάζονται ηλεκτρικά κύτταρα (στοιχεία) και είναι εφικτό να συνδεθούν σε σειρά για την αύξηση της τάσης ή παράλληλα για την αύξηση του ρεύματος. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ομάδες ενταγμένες σε ένα πλαίσιο (panel) ενώ

το σύνολο των πλαισίων ονομάζεται φωτοβολταϊκό σύστημα. Το στοιχείο που χρησιμοποιείται στην κατασκευή φ/β στοιχείων ευρείας κατανάλωσης είναι το πυρίτιο σε όλες τις μορφές του: κρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο. Ωστόσο ερευνητικά έχουν κατασκευαστεί πάρα πολλά είδη. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους κυμαίνεται από 7% (ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου) έως 12-15% (ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου) ενώ σε εργαστηριακό πλαίσιο έχουμε αποδόσεις γύρω στο 46%[10]. Αξίζει να αναφερθεί πως η ενέργεια που παράγεται με αυτό τον τρόπο, είναι εφικτό να αποθηκευτεί σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες). Επομένως υπάρχει ανεξάντλητη, ανανεώσιμη, και κατά κύριο λόγο "καθαρή" ενέργεια.

Τα φ/β πλαίσια διακρίνονται ανάλογα με το βαθμό ενσωμάτωσης τους σε τυπικά (πλαίσιο γυαλιού-ελασμάτων) και ημιπερατά (κρυσταλλικά πλαίσια γυαλιού-γυαλιού. Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, τα συγκεκριμένα πλαίσια αποτελούν την πιο διαδεδομένη λύση σε εφαρμογές φ/β συστημάτων πάνω σε στέγες κτιρίων ή ακόμα και σε πολύ μεγάλες φ/β εγκαταστάσεις στην ύπαιθρο και η κατασκευή τους βασίζεται σε μέθοδο πολυστρωμάτωσης. Τα ημιπερατά πλαίσια επιλέγονται στις περιπτώσεις αρχιτεκτονικής ενσωμάτωσης. Αυτό γίνεται λόγω του ιδιαίτερου σχεδιασμού τους, αλλά και γιατί είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικοί υαλοπίνακες. Ως προς το υλικό κατασκευής τους, τα φ/β πλαίσια διακρίνονται σε εκείνα τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου και σε τεχνολογίας λεπτού υμενίου.

Οι δυνατότητες χρήσης των φβ διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- τα αυτόνομα/υβριδικά συστήματα: χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο, και συνήθως συμπεριλαμβάνουν μπαταρίες προκειμένου να αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας για κάλυψη του φορτίου όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον απαιτείται ένας ρυθμιστής συνεχούς τάσης έτσι ώστε να ρυθμίζει τη ροή του ρεύματος από τα φ/β στοιχεία προς τις μπαταρίες και να διατηρεί ομαλή την φόρτιση των μπαταριών. Ακόμη χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας για την αλλαγή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο δεδομένου πως οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές του εμπορίου καταναλώνουν εναλλασσόμενο ρεύμα. Στα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιείται μια συμβατική πηγή ενέργειας (π.χ. το ηλεκτρικό δίκτυο ή μια ηλεκτρογεννήτρια) έτσι ώστε να καλύπτεται το φορτίο όταν δεν επαρκεί η παραγωγή ή η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια. Επειδή τα συστήματα αυτά είναι αρκετά περίπλοκα, απαιτούν επιπλέον αυτοματισμούς προκειμένου να λειτουργούν σωστά.
- Στις κεντρικές εγκαταστάσεις: τα φ/β μπορούν να τροφοδοτούν άμεσα το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένα. Στην περίπτωση των κεντρικών εγκαταστάσεων τα φ/β μπορούν να τροφοδοτούν άμεσα το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένα. Προκειμένου να συμβαίνει αυτό, συμπεριλαμβάνουν απαραίτητα έναν μετατροπέα ρεύματος καθώς και έναν μετασχηματιστή τάσεως, ενώ συνήθως δεν χρησιμοποιούνται μπαταρίες. Για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης, λαμβάνεται υπ’ όψιν η όσο το δυνατόν ευκολότερη σύνδεση στο δίκτυο[11].

Για να θεωρηθεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ενσωματωμένο σε κτίριο πρέπει τα φ/β πλαίσια να έχουν ενταχθεί στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και η τοποθέτησή τους να γίνεται παράλληλα με την κατασκευή του οικοδομήματος. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές αφορούν την ενσωμάτωση των φ/β σε στέγες, προσόψεις, στέγαστρα και φωταγωγούς. Πιο συγκεκριμένα, τα φ/β μπορούν να ενσωματωθούν στο κέλυφος των κτιρίων, και τα στοιχεία τοποθετούνται στην οροφή, ή χρησιμοποιούνται σαν υλικά για φεγγίτες. Επιπλέον μπορούν να τοποθετηθούν στις όψεις των κτιρίων και αποτελούν τμήμα του κελύφους ή λειτουργούν ταυτόχρονα και σαν σκίαστρο προσφέροντας προστασία από τον ήλιο. Ωστόσο, οι δυνατότητες ενσωμάτωσης είναι πάρα πολλές, επειδή τα Φ/Β μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιοδήποτε οικοδομικό έργο, από κτίρια υψηλής τεχνολογικής αισθητικής έως οικοδομήματα πολιτιστικής κληρονομιάς, σε νέα ή παλαιά κτίρια.

Βασικό πλεονέκτημα των φ/β συστημάτων αποτελεί η καλή απόδοση σε μικρά και μεγάλα συστήματα. Αυτό συνεπάγεται την μεγάλη ευελιξία για μικρές καταναλώσεις ενώ παράλληλα είναι κατάλληλα για την κάλυψη μικρών φορτίων ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Δεν έχουν κινούμενα μέρη, έχουν μικρό βάρος και δεν παράγουν θόρυβο κατά τη λειτουργία τους. Επιπλέον έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, περίπου 25 έτη και είναι ανεξάρτητα από καύσιμα και δίκτυα διανομής. Το βασικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα Φ/Β συστήματα είναι το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο υψηλό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Επιπλέον η ενέργεια που παράγουν επηρεάζεται από πιθανές νεφώσεις ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας απαιτείται για αυτόνομα συστήματα η χρήση συσσωρευτών. Δεδομένου πως τα φ/β πλαίσια παράγουν συνεχή τάση η οποία πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενη (με τη χρήση αντιστροφέα), υπάρχουν απώλειες ενέργειας.

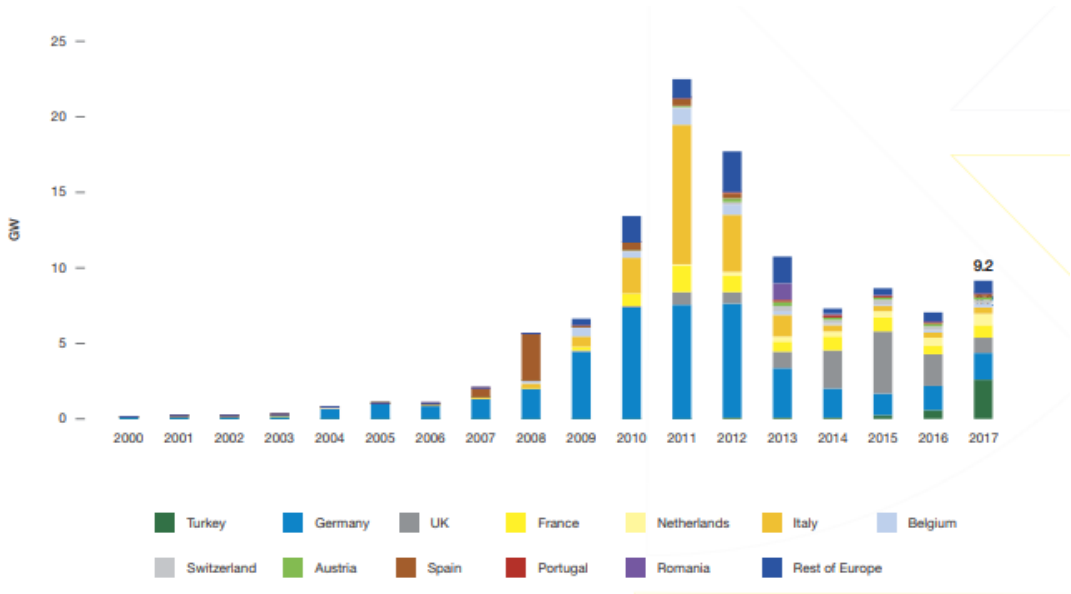
Τα φωτοβολταϊκά μπορεί να είναι τοποθετημένα σε σταθερά πλαίσια ή να είναι προσαρμοσμένα σε ένα σύστημα κίνησης, ή με κατάλληλη τεχνολογία να συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια τους. Όσο πιο κάθετα προς τη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι τοποθετημένη η επιφάνεια του φ/β τόσο αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πάνω σε αυτήν. Κατά συνέπεια, μια επιφάνεια φ/β που διαθέτει σύστημα κίνησης έτσι ώστε να παρακολουθεί τη κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή απόδοση.

1.2.2 Φωτοβολταϊκά στην Ευρώπη

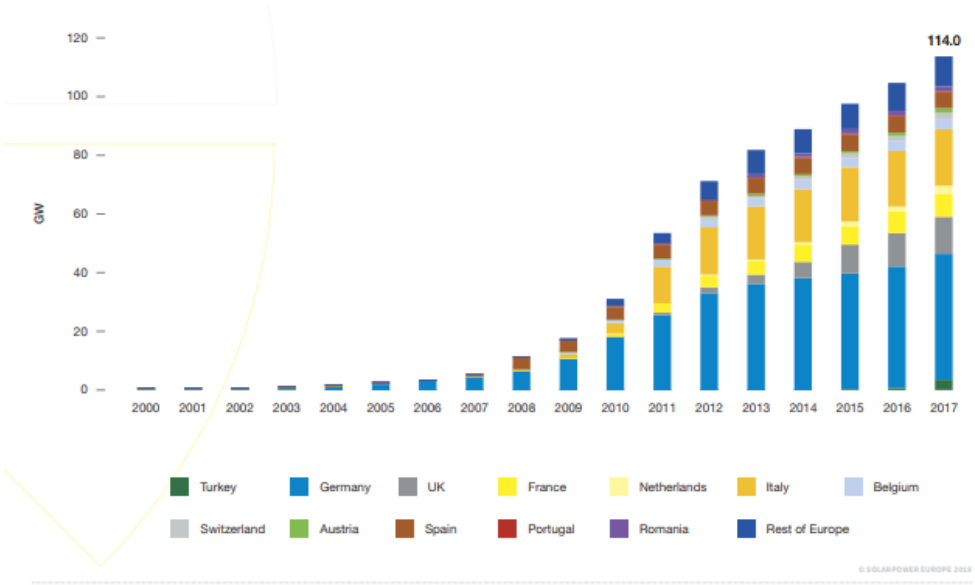
Με μια πρώτη ματιά, το 2017 ήταν ένα σχετικά καλό έτος για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ευρώπη. Οι νέες εγκαταστάσεις αυξήθηκαν κατά 31% φτάνοντας συνολικά τα 9.2 GW. Αξίζει να αναφερθεί πως στο νούμερο αυτό συμπεριλαμβάνεται και η Τουρκία, στην περίπτωση της οποίας παρουσιάστηκε αξιοσημείωτη αύξηση το 2017, αφού από τα 584MW το 2016, έφτασε τα 2.6 GW το 2017. Συνολικά, όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα το 2012 είχε ξεκινήσει μια πτωτική πορεία, η οποία παρουσίασε ελάχιστο το 2016. Εξετάζοντας λοιπόν μόνο την περίπτωση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, χωρίς την Τουρκία, δεν παρατηρήθηκε κάποια ανάπτυξη. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό αποτέλεσε και η απόφαση εξόδου της Βρετανίας από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Όσον αφορά τη Γερμανία, το 2013 εγκατέστησε 3.3 GW , μετά από 7.5 GW που εγκαθιστούσε ετησίως τα τρία προηγούμενα έτη. Αυτό συνέβη κυρίως χάρη στην πολιτική βούληση για τη μείωση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ικανότητα της Γερμανίας το 2015 ήταν περισσότερο από 35.5 GW. Στην Ιταλία εγκαταστάθηκαν το 2013 1.5 GW φωτοβολταϊκών συστημάτων, σε σύγκριση με 9.3 GW το 2011 και 3.6 GW το 2012. Η Ιταλική κυβέρνηση περιόρισε το κόστος που βαρύνει την ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Ενώ η γαλλική αγορά αυξήθηκε κατά 56% σε 873MW το 2017, από μόλις 559 MW το 2016, δεν έχει φτάσει τα 895 MW που διέθετε το 2015. Επιπλέον, η Ολλανδία πρόσθεσε περισσότερα από 500 MW το 2017. Όσον αφορά την Ισπανία, η αγορά της σχεδόν τριπλασιάστηκε το 2017, αλλά το τελικό νούμερο των 135MW ήταν ακόμα πολύ μικρό. Συνοπτικά, 21 από τα 28 κράτη μέλη εγκατέστησαν περισσότερα φ/β το 2017 σε σχέση με το 2016.

Κατά την εξέταση των συνολικά εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη κατά το έτος 2017, σχεδόν τίποτα δεν μεταβλήθηκε σε σχέση με το 2016. Δύο χώρες - Γερμανία (37.7%) και Ιταλία (17.0%) - εξακολουθούν να διαθέτουν περισσότερο από το ήμισυ των συστημάτων αξιοποίησης της συνολικής ηλιακής ενέργειας της Ευρώπης . Ακολουθεί το Ηνωμένο Βασίλειο (11.1%), ενώ η Γαλλία διατηρεί την τέταρτη θέση (7.0%). Η Ισπανία παραμένει στην πέμπτη θέση(4.9%) αν και πρόσθεσε λιγότερα από 750MW τα τελευταία 6 χρόνια, και αμέσως μετά βρίσκεται η Τουρκία (3.0%).

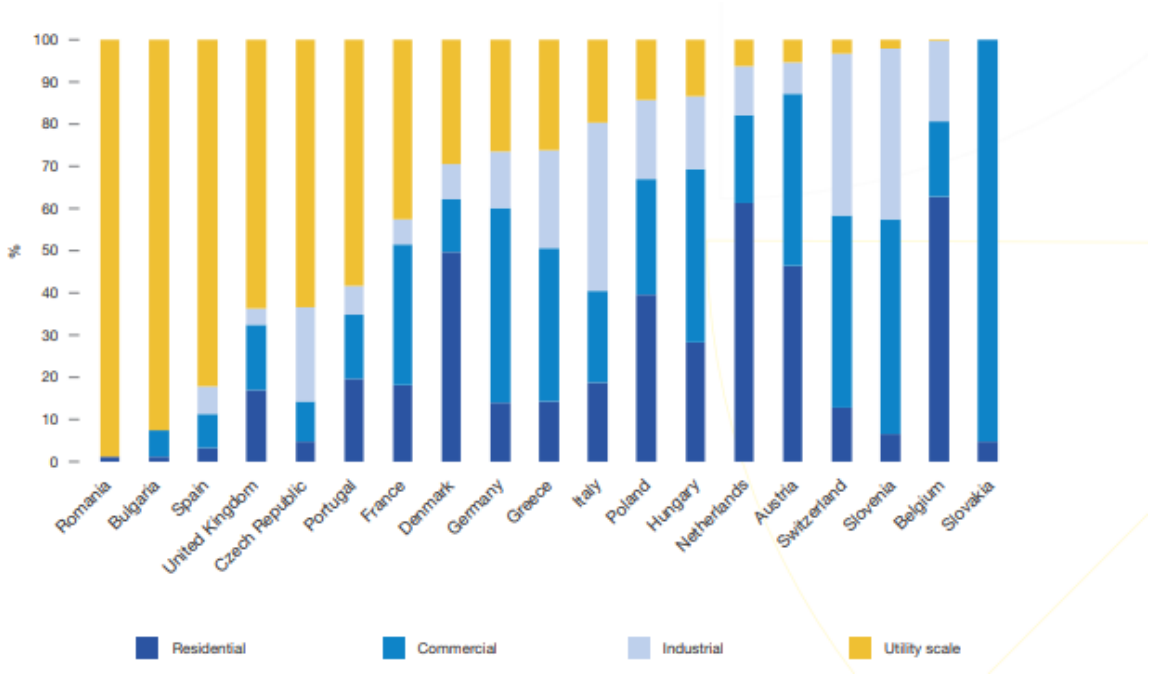


Εικ. 1.5. Ευρωπαϊκές ετήσιες συνδέσεις φωτοβολταϊκών κατά τη χρονική περίοδο 2000-2017[12]



Εικ. 1.6. Συνολικές ευρωπαϊκές συνδέσεις φωτοβολταϊκών κατά τη χρονική περίοδο 2000-2017[12].

Το 2017 εγκαταστάθηκε περίπου το 26% των ηλιακών συστημάτων σε οικιστικές στέγες, περίπου 18% στις εμπορικές στέγες, 20% στο βιομηχανικό τομέα και 36%στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας (Εικ. 1.7).



Εικ. 1.7. Η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη έως το 2017 για επιλεγμένες χώρες[12].

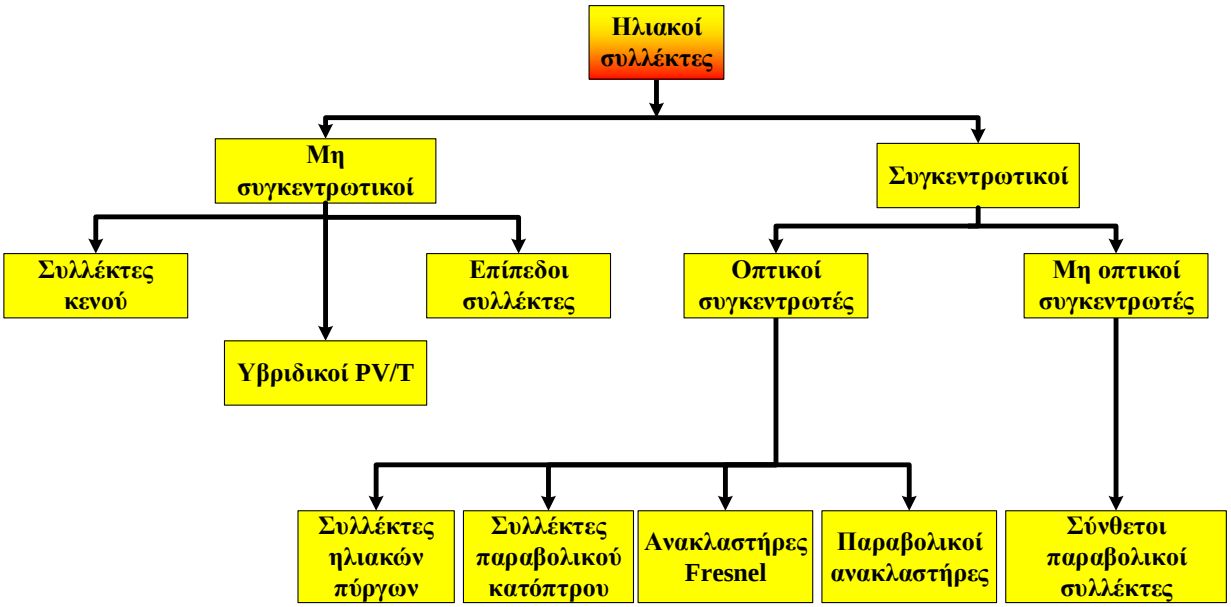
1.2.3 Ηλιακοί συλλέκτες

Ανάλογα με τα μηχανικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται, τα συστήματα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

- Τα παθητικά ηλιακά συστήματα τα οποία αφορούν κατάλληλες αρχιτεκτονικές λύσεις και χρήση των κατάλληλων δομικών υλικών για τη μεγιστοποίηση της απευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, δροσισμό ή φωτισμό στα κτίρια χωρίς τη χρήση αντλιών ή άλλων μηχανικών συστημάτων.
- Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα στα οποία η θερμότητα κυκλοφορεί στο σύστημα με τη βοήθεια κάποιας αντλίας, ανεμιστήρα κτλ. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα ηλιοθερμικά συστήματα τα οποία συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και ύστερα την μεταφέρουν με μορφή θερμότητας στο νερό, στον αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό.

Οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν το σύστημα συλλογής της θερμότητας ενός ευρύτερου ηλιακού συστήματος, είτε αυτό είναι ενεργητικό είτε παθητικό. Ουσιαστικά πρόκειται για ειδικής μορφής εναλλάκτες θερμότητας, που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρουν την ενέργεια σε ένα εργαζόμενο μέσο, το οποίο διαπερνά τον συλλέκτη και αποτελεί την καρδιά κάθε ηλιακού Συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο η ηλιακή ενέργεια μεταδίδεται μέσω του ρευστού απευθείας για χρήση ή αποθηκεύεται σε κατάλληλο θερμομονωμένο για χρήση στο μέλλον. Υπάρχουν διάφορα είδη ηλιακών συλλεκτών:

- Επίπεδοι συλλέκτες
- Συλλέκτες κενού
- Συγκεντρωτικοί συλλέκτες



Εικ.1.8. Βασική κατηγοριοποίηση ηλιακών συλλεκτών

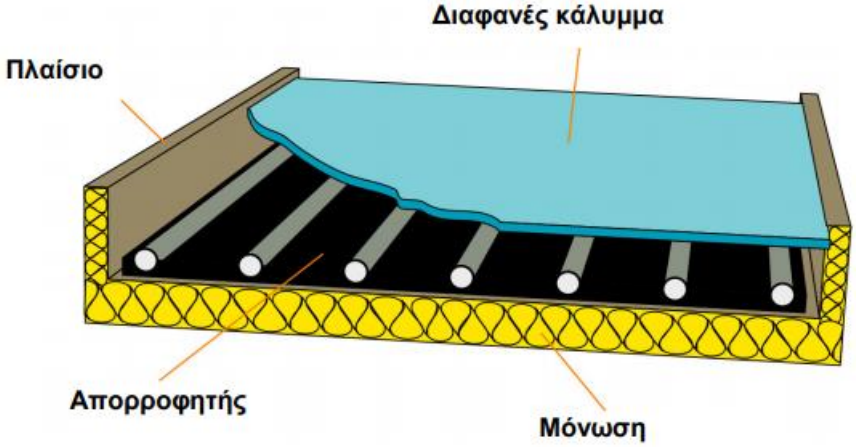
<u>I. Επίπεδοι συλλέκτες</u>

Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος συλλεκτών στον κόσμο για οικιακά συστήματα θέρμανσης νερού και ηλιακή θέρμανση/ψύξη χώρου. Η λειτουργία τους εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας, τη γωνία κλίσης του συλλέκτη, τις συνθήκες

περιβάλλοντος (πχ θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου κ.α.) και τις συνθήκες λειτουργίας (πχ θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου, θερμικές ιδιότητες του ρευστού). Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από τα εξής μέρη:

I. Το διαφανές κάλυμμα, το οποίο μπορεί να αποτελείται από ένα, δύο ή και περισσότερες διαφανείς πλάκες από γυαλί ή πλαστικό.
II. Την φωτοαπορροφητική πλάκα που απορροφά την ηλιακή ενέργεια η οποία είναι μια ειδικά επεξεργασμένη μεταλλική επιφάνεια ή βαμμένη με κατάλληλη βαφή.
III. Τους σωλήνες που είναι σε επαφή με την απορροφητική πλάκα μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ρευστό που απάγει τη θερμική ενέργεια από την απορροφητική πλάκα.
IV. Το περίβλημα που συνήθως είναι μεταλλικό ή πλαστικό, το οποίο ενοποιεί την κατασκευή ενώ παράλληλα προστατεύει το συλλέκτη από τις συνθήκες περιβάλλοντος.
V. Την μόνωση στην πίσω και στις πλάγιες πλευρές του συλλέκτη.

Τέτοιου είδους συλλέκτες χρησιμοποιούνται για ζεστό νερό χρήσης, θέρμανση χώρου και ηλιακό κλιματισμό.



Εικ. 1.9. Επίπεδος συλλέκτης [13]

1.3 Εισαγωγή στις Τεχνολογίες Ψύξης/Θέρμανσης

Η ψύξη είναι μια από τις πιο σημαντικές θερμικές διεργασίες με διάφορες πρακτικές εφαρμογές.. Έχει αναφερθεί ότι τα συστήματα κλιματισμού καταναλώνουν περίπου το 15% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας[14] ενώ το 0.3% της συνολικής οικιακής κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται σε συστήματα κλιματισμού[15].Στις μέρες μας, η ψύξη χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών σύμφωνα με τις απαιτήσεις βιομηχανικών διαδικασιών ή για την διατήρηση θερμοκρασιών άνεσης στους χώρους κατοικίας και εργασίας. Επιπλέον, η χρήση της κρίνεται αναγκαία για την συντήρηση τροφίμων και ποτών για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ο πιο απλός τρόπος παραγωγής ψύξης είναι η εξάτμιση ή ατμοποίηση ενός πτητικού μέσου. Πιο συγκεκριμένα, τα πτητικά μέσα έχουν την ιδιότητα να εμφανίζουν γρήγορη αύξηση της πίεσης ατμών με τη θερμοκρασία και κατά συνέπεια μπορεί να έχουν υψηλή πίεση ατμών ακόμα

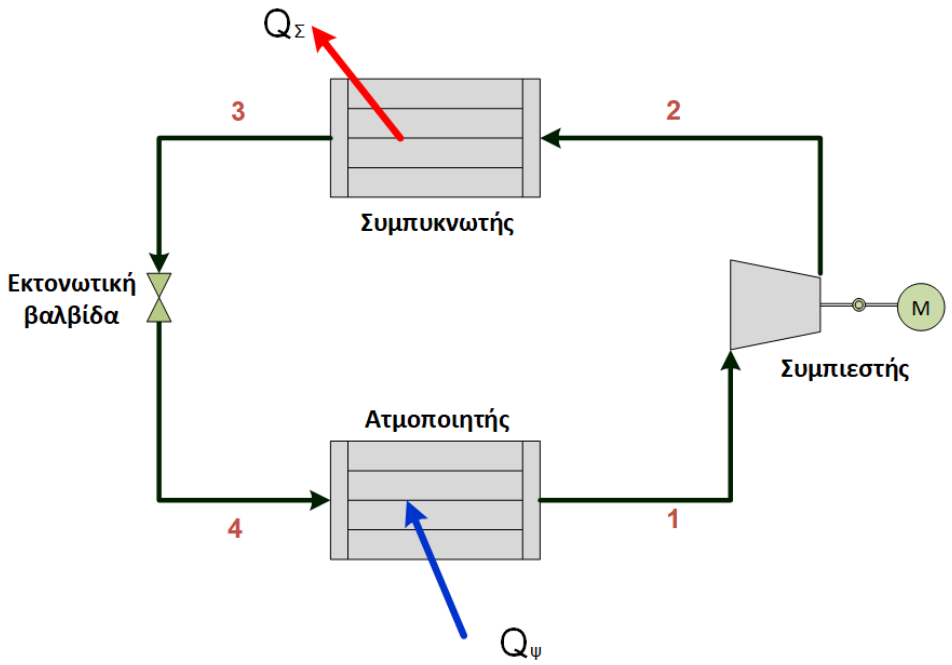
και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτό συνεπάγεται πως έχουν τη δυνατότητα να εξατμισθούν σε συνθήκες περιβάλλοντος. Με την εξάτμισή τους απορροφάται θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο, με τελικό αποτέλεσμα την ψύξη του. Τα πτητικά μέσα, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ψύξης, ονομάζονται ψυκτικά μέσα[16].

1.3.1 Ψύξη με μηχανική συμπίεση

Ο ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών (Vapor Compression Cycle-VCC) είναιοπιο διαδεδομένος και εκτενώς μελετημένος κύκλος ψύξης. Στην Ελλάδα η ψύξη γίνεται ως επί το πλείστον με μηχανική συμπίεση ατμών και βρίσκει εφαρμογή σε ψυκτικές εγκαταστάσεις ισχύος από λίγες δεκάδες Wέως 17.5MW ανά μονάδα[17].

Μια συμβατική διάταξη παραγωγής ψύξης με μηχανική συμπίεση, αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- μηχανικό συμπιεστή (δυναμικού τύπου ή θετικής εκτόπισης),
- συμπυκνωτή (εναλλάκτης θερμότητας αερόψυκτος ή υδρόψυκτος),
- διάταξη εκτόνωσης ή στραγγαλισμού
- ατμοποιητή (εναλλάκτης θερμότητας),



Εικ. 1.10. Σχεδιάγραμμα ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών (Vapor Compression Cycle-VCC)

Στην παραπάνω ψυκτική διάταξη, το ψυκτικό μέσο εκτελώντας ένα πλήρη ιδανικό κύκλο υφίσταται τις εξής διεργασίες:

Συμπίεση(μεταβολή 1→2): Αρχικά, το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης (σημείο 1) και εισέρχεται στον μηχανικό συμπιεστή. Εκεί ο ατμός συμπιέζεται και αυξάνοντας την πίεση και τη θερμοκρασία του. Μετά τη συμπίεση ο ατμός εξέρχεται από το συμπιεστή ως υπέρθερμος, σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία (σημείο 2). Κατά τη διαδικασία της συμπίεσης του ατμού ψυκτικού μέσου στο συμπιεστή είναι απαραίτητη σε αυτόν η πρόσδοση μηχανικής ισχύος$\dot{W}_{th}$ από εξωτερική πηγή.

Συμπύκνωση (μεταβολή 2→3): Ο ατμός μετά την έξοδο από το συμπιεστή (σημείο 2), εισάγεται στο συμπυκνωτή. Εκεί ο ατμός ξεκινά να αποβάλλει θερμότητα προς το μέσο του δευτερεύοντος κυκλώματος (συνήθως αέρας περιβάλλοντος ή νερό), με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να μειώνεται μέχρι να γίνει ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού, για την πίεση υπό την οποία βρίσκεται ο ατμός. Στο σημείο αυτό ο ατμός ξεκινά να συμπυκνώνεται (υγροποιείται), έως ότου όλο το ψυκτικό μέσο να έχει μετατραπεί σε υγρό (κορεσμένο). Το ψυκτικό υγρό εξέρχεται από το συμπυκνωτή σε κατάσταση υψηλής πίεσης και μειωμένης θερμοκρασίας (σημείο 3).

Στο συμπυκνωτή, κατά τη συμπύκνωση του αερίου ψυκτικού μέσου, αποβάλλεται θερμότητα προς το περιβάλλον$\dot{Q}_{\sigma}$ ενώ αμελώντας τις πτώσεις πίεσης στον εναλλάκτη θερμότητας η μεταβολή 2→3 θεωρείται ισοβαρής.

Εκτόνωση(μεταβολή 3→4):Για να ατμοποιηθεί το ψυκτικό μέσο αφού εξέλθει από τον συμπυκνωτή, θα πρέπει να μειωθεί η πίεση του μέχρι να γίνει ίση με την πίεση που επικρατεί μέσα στον ατμοποιητή. Για αυτόν τον λόγο το εργαζόμενο μέσο περνάει από μία διάταξη εκτονώσεως ή στραγγαλισμού, όπου εκτονώνεται και εξέρχεται σε κατάσταση διμερούς φάσης (χαμηλής ξηρότητας), χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός πως κατά την διεργασία της εκτόνωσης του ψυκτικού μέσου δεν πραγματοποιείται καμία συναλλαγή ενέργειας από ή προς το περιβάλλον.

Ατμοποίηση (μεταβολή 4→1): Στον ατμοποιητή το ψυκτικό μέσο εισάγεται σε κατάσταση χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας (σημείο 4). Εκεί ξεκινά να απορροφά θερμότητα από το δευτερεύον κύκλωμα του ατμοποιητή, ατμοποιείται και εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση ψυχρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης (σημείο 1). Επομένως το ψυκτικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα στον ατμοποιητή, καθώς απομακρύνεται η θερμότητα από το χώρο του ατμοποιητή μέσω του ψυκτικού. Πιο συγκεκριμένα η θερμότητα που απορροφάται από το ψυκτικό μέσο στον ατμοποιητή είναι η θερμότητα ατμοποίησης $\dot{Q}_{\psi}$. Η θερμότητα αυτή είναι η ωφέλιμη θερμότητα ψύξης.Θεωρητικά η θέρμανση του ψυκτικού μέσου 4→1 είναι ισοβαρής μεταβολή.

Άρα στον ατμοποιητή γίνεται απορρόφηση θερμικής ισχύος (ωφέλιμη ψυκτική ισχύς) από το χώρο του, ενώ στο συμπυκνωτή αποβάλλεται θερμική ισχύς.

Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης

Στον ατμοποιητή γίνεται απορρόφηση θερμικής ισχύος $\dot{Q}_{\psi}$ (ωφέλιμη ψυκτική ισχύς)από το χώρο που τον περιβάλλει κι έτσι αυτός ψύχεται. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση αερόψυκτου συμπυκνωτή, αποβάλλεται θερμική ισχύς $\dot{Q}_{\Sigma}$ στο χώρο γύρω από αυτόν (στον αέρα) και στην περίπτωση υδρόψυκτου συμπυκνωτή χρησιμοποιείται σαν μέσο αποβολής της θερμότητας το νερό. Επομένως, η ψυκτική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για ψύξη αλλά και για θέρμανση ενός χώρου με την αξιοποίηση της θερμότητας συμπύκνωσης. Αυτό σημαίνει πως η ψυκτική διάταξη λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας που αφαιρεί θερμότητα από τον χώρο του ατμοποιητή, και την αποβάλει στο περιβάλλον του συμπυκνωτή.

Σε μια ψυκτική διάταξη απορροφάται θερμότητα από έναν κρύο χώρο και αποβάλλεται σε χώρο που έχει υψηλότερη θερμοκρασία. Για αυτό το λόγο πρέπει να προσδοθεί μηχανική ισχύς $\dot{W}_{\mathrm{th}}$th στο συμπιεστή. Η μηχανική ισχύς $\dot{W}_{\mathrm{th}}$th και η ωφέλιμη ψυκτική ισχύς $\dot{Q}_{\psi}$ προσφέρονται στο ψυκτικό μέσο από το περιβάλλον, ενώ η θερμική ισχύς $\dot{Q}_{\Sigma}$ προσφέρεται στο περιβάλλον από το ψυκτικό μέσο. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ο ενεργειακός ισολογισμός ο οποίος είναι ο εξής:

$$\dot{Q}_{\sigma}=\dot{Q}_{\psi}+\dot{W}_{\mathrm{th}} \qquad 1.3.1$$

Στη συνέχεια ορίζουμε τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς COP_{th} (Coefficient of Performance) μια ψυκτικής διάταξης μηχανικής συμπίεσης, ο οποίος εκφράζει τη θεωρητική αποτελεσματικότητα της ψυκτικής διάταξης και ισούται με τον λόγο της ωφέλιμης προς τη δαπανούμενη ισχύ ανά κύκλο:

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_{\psi}}{\dot{W}_{\mathrm{th}}} \qquad 1.3.2$$

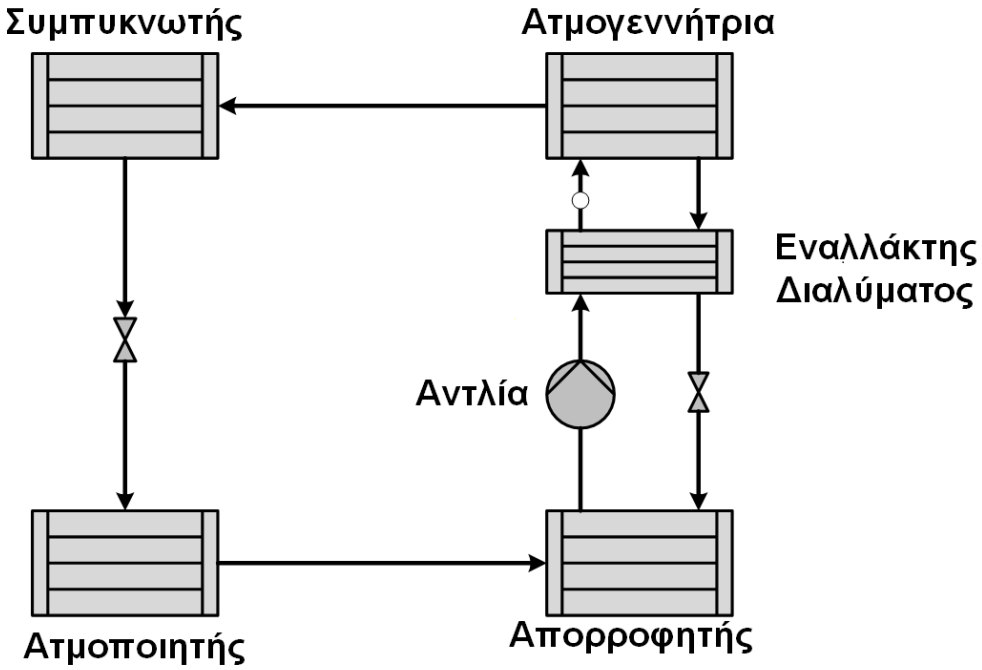
Ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς COP ισούται με το λόγο της πραγματικής αποδιδόμενης ψυκτικής ισχύος προς την πραγματική κατανάλωση μηχανικής ισχύος και λαμβάνει μικρότερες τιμές συγκριτικά με το θεωρητικό συντελεστή λόγω των απωλειών θερμότητας και ισχύος του συστήματος.

1.3.2 Ψύξη με απορρόφηση

Στον ψυκτικό κύκλο με απορρόφηση, το ψυκτικό αποτέλεσμα παράγεται μέσα από την χρήση δύο ρευστών και μιας ποσότητας θερμότητας σαν είσοδο στο σύστημα, αντί ηλεκτρικής ενέργειας που θα τροφοδοτούσε έναν μηχανικό συμπιεστή. Αυτή η θερμότητα παράγεται είτε άμεσα με καύση καυσίμου είτε έμμεσα, με χρήση ατμού, ζεστού νερού ή από ανάκτηση

θερμότητας. Γενικότερα, στην ψύξη με απορρόφηση απαιτείται παροχή θερμότητας σε θερμοκρασίες 70°C – 200°C[16]. Την τελευταία δεκαετία η παραγωγή της θερμότητας που απαιτείται για τη λειτουργία ψύκτη απορρόφησης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο από ηλιακούς συλλέκτες [18].

Το σύστημα απορρόφησης περιλαμβάνει έναν ατμοποιητή, έναν συμπυκνωτή, έναν απορροφητή, μια γεννήτρια και μια αντλία διαλύματος. Η συμπίεση του ατμού του ψυκτικού μέσου επιτυγχάνεται με το συνδυασμό του απορροφητή, της αντλίας διαλύματος και της ατμογεννήτριας.



Εικ. 1.11.Σχεδιάγραμμα ψυκτικής διάταξης με απορρόφηση

Στον ατμοποιητή της διάταξης απορροφάται θερμότητα, και έτσι παράγεται ψύξη ενώ παράλληλα ατμοποιείται το ψυκτικό μέσο. Στη συνέχεια, ο ατμός του ψυκτικού μέσου οδηγείται στον απορροφητή όπου απορροφάται εξώθερμα σε ένα απορροφητικό υγρό.. Το διάλυμα που προκύπτει στον απορροφητή διοχετεύεται με αντλίες στην ατμογεννήτρια όπου προσφέρεται θερμότητα από κάποια εξωτερική πηγή. Έτσι το ψυκτικό μέσο δεδομένης της πτητικότητάς του, αποδεσμεύεται ως ατμός υψηλής πίεσης. Δηλαδή παράγει ατμό ψυκτικού μέσου σε υψηλή πίεση. Το αναγεννημένο ή πυκνό απορροφητικό οδηγείται στη συνέχεια πίσω στον απορροφητή, για να συλλέξει εκ νέου ψυκτικό ατμό. Παράλληλα ο ατμός του ψυκτικού υψηλής πίεσης συμπυκνώνεται (υγροποιείται) στο συμπυκνωτή της διάταξης, στη συνέχεια εκτονώνεται σε εκτονωτική βαλβίδα προκειμένου να μειωθεί η πίεση του και οδηγείται στον ατμοποιητή έτσι

ώστε να ατμοποιηθεί και να παραχθεί ψύξη. Ο ατμός κατόπιν οδηγείται στον απορροφητή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται εκ νέου.

Το ψυκτικό και το απορροφητικό μέσο συγκροτούν το «ζεύγος εργασίας» σε έναν κύκλο απορρόφησης. Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός ψυκτικού κύκλου με απορρόφηση οι δύο ουσίες που συγκροτούν το ζεύγος εργασίας θα πρέπει να έχουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά [18]. Αρχικά, το ψυκτικό θα πρέπει να είναι περισσότερο πτητικό από τον απορροφητή έτσι ώστε να διαχωρίζεται εύκολα από το απορροφητικό μέσο. Ακόμη, το απορροφητικό μέσο δεν θα πρέπει να έχει συγγένεια με το ψυκτικό με το τελευταίο να έχει μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα. Επιπλέον, βασικό χαρακτηριστικό των δύο ουσιών είναι ο μικρός βαθμός διάβρωσης και καθόλου τοξικότητα για λόγους ασφαλείας.

Τα δύο ζεύγη εργασίας που βρίσκουν ιδιαίτερη συχνή εφαρμογή είναι τα εξής:

- διάλυμα βρωμιούχου λιθίου (LiBr)-νερού. Οι μηχανές αυτές λειτουργούν κατά κύριο λόγο σε μερικό κενό. Η πηγή θερμότητας πρέπει να είναι σε ελάχιστη θερμοκρασία των 70℃-90℃ για συστήματα μίας βαθμίδας. Χρησιμοποιείται για εφαρμογές ψύξης όπου απαιτούνται θερμοκρασίες άνω των 0°C.
- διάλυμα νερού- αμμωνία (NH_3).Η αμμωνία χρησιμοποιείται στη βιομηχανική ψύξη για πάνω από 120 χρόνια[19].Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για κατάψυξη σε χαμηλές θερμοκρασίες εξάτμισης, μικρότερες των 0℃.Ακόμη, σε συστήματα που χρησιμοποιούν αμμωνία, η θερμική ενέργεια παρέχεται σε θερμοκρασία 100℃-120℃ (μονού σταδίου) ενώ τις περισσότερες φορές τα επίπεδα πίεσης της μηχανής αμμωνίας-νερού είναι υψηλότερα της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Οι ψυκτικοί κύκλοι με απορρόφηση παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι των συμβατικών ψυκτικών συγκροτημάτων που βασίζονται σε κύκλο συμπίεσης. Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα, αρχικά απαιτούν πολύ χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα έχουν ελάχιστα κινούμενα τμήματα. Αυτό συνεπάγεται πως έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα, με χαμηλό κόστος συντήρησης. Ακόμη δεδομένου πως δεν εκπέμπονται ρυπογόνες ουσίες κατά τη λειτουργία τους, δεν προκαλούν ρύπανση στο περιβάλλον ενώ παράλληλα έχουν χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών. Από την άλλη πλευρά πρόκειται για ογκώδεις μονάδες με μεγάλο βάρος οι οποίες έχουν αρκετά υψηλό κόστος εγκατάστασης και απαιτούν την κατανάλωση νερού σε πύργους ψύξης. Επιπλέον, παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερο συντελεστή συμπεριφοράς σε σχέση με τους συμβατικούς κύκλους ψύξης, με την βασική υποσημείωση περί διαφορετικού ορισμού του συντελεστή συμπεριφοράς, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Συντελεστής Συμπεριφοράς

Στον κύκλο ψύξης με απορρόφηση διακρίνουμε τις εξής ροές θερμότητας:

• απορρόφηση θερμότητας $\dot{Q}_{\psi}$στον ατμοποιητή από τον κλιματιζόμενο χώρο και παραγωγή ψύξης

• αποβολή θερμότητας $\dot{Q}_\sigma$στο συμπυκνωτή • αποβολή θερμότητας $\dot{Q}_A$από τον απορροφητή

• παροχή θερμότητας $\dot{Q}_\gamma$στη γεννήτρια

Άρα ο ενεργειακός ισολογισμός γράφεται ως εξής:

$$\dot{Q}_\psi + \dot{Q}_\gamma = \dot{Q}_\sigma + \dot{Q}_A \qquad 1.3.2$$

Με βάση τα παραπάνω, σε ένα κύκλο απορρόφησης ορίζουμε το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς COP_{th} ως το λόγος της θερμικής ισχύος που απορρίπτεται στον ατμοποιητή, δηλαδή της ωφέλιμης ψυκτικής ισχύος $\dot{Q}_\Psi$, προς την απορροφούμενη θερμική ισχύ στη γεννήτρια $\dot{Q}_{th}$(αμελώντας την ισχύ της αντλίας):

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_\psi}{\dot{Q}_\gamma} \qquad 1.3.3$$

1.3.3 Ψύξη με προσρόφηση

Προσρόφηση ονομάζεται η εξώθερμη διαδικασία κατά την οποία οι στερεές ουσίες έχουν την ικανότητα να προσελκύουν στην επιφάνεια τους ιόντα ή μόρια μιας ουσίας (συνήθως αέριας φάσης). Η αντίστροφη διαδικασία, όπου απαιτείται πρόσδοση θερμότητας προκειμένου τα ιόντα ή μόρια της ουσίας να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του προσροφητή καλείται εκρόφηση.

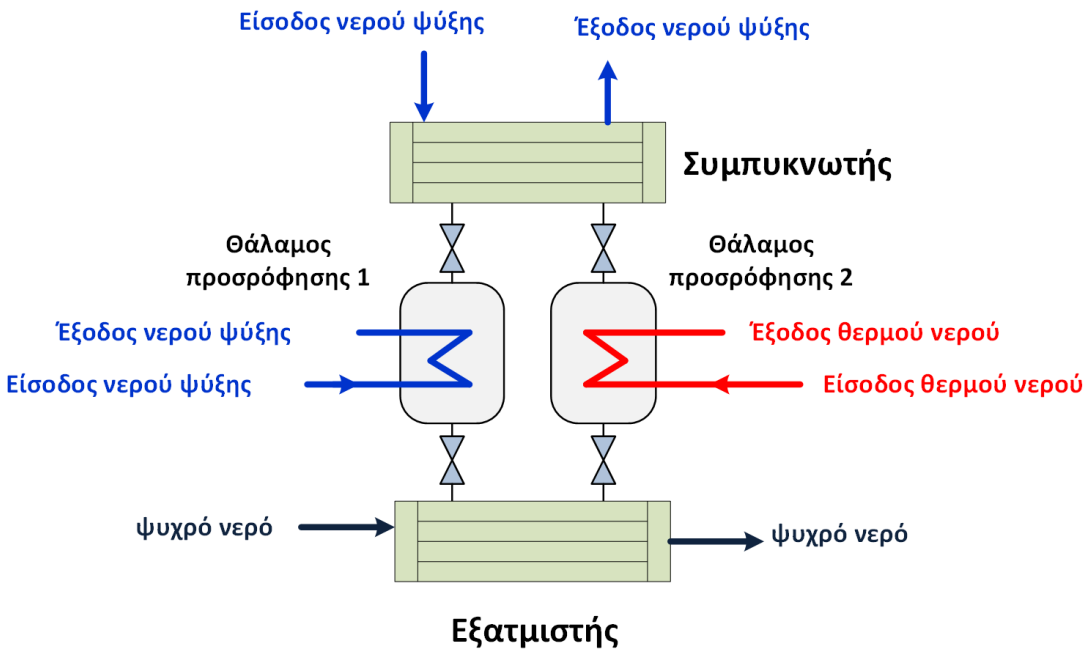
Ο κύκλος ψύξης με προσρόφηση μοιάζει αρκετά στον τρόπο λειτουργίας του με εκείνον της μηχανικής συμπίεσης ατμών. Πιο συγκεκριμένα, και στις δυο περιπτώσεις το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται εντός του συμπυκνωτή της διάταξης σε υψηλή πίεση αποβάλλοντας θερμότητα και ατμοποιείται στον ατμοποιητή της εγκατάστασης σε χαμηλή πίεση απορροφώντας θερμότητα κι έτσι λαμβάνει χώρα το ψυκτικό φαινόμενο. Τα δύο συστήματα διαφοροποιούνται ως προς την δημιουργία των δύο επιπέδων πίεσης, καθώς στην ψύξη με προσρόφηση ο θάλαμος προσρόφησης τροφοδοτούμενος με θερμική ισχύ λειτουργεί σαν συμπιεστής και ο θάλαμος εκρόφησης σαν εκτονωτική βαλβίδα.

Τα βασικότερα στάδια του ψυκτικού κύκλου προσρόφησης, είναι τα ακόλουθα:

- **Θέρμανση και συμπίεση (Heating and Pressurization):**Στο στάδιο αυτό, το οποίο ισοδυναμεί με εκείνο της συμπίεσης στη μηχανική συμπίεση ατμών, πηγή θερμότητας (νερό) υψηλής θερμοκρασίας θερμαίνει τον προσροφητή και παράλληλα αυξάνεται η πίεση του από την πίεση ατμοποίησης στην πίεση συμπύκνωσης.
- **Εκρόφηση και συμπύκνωση (desorption and condensation):** Σε αυτό το στάδιο, συνεχίζεται να παρέχεται θερμότητα στον προσροφητή με αποτέλεσμα η θερμοκρασία

του να συνεχίζει να αυξάνεται κι έτσι ο ατμός που υπάρχει μέσα στο προσροφητικό υλικό να διαφεύγει από αυτό (εκρόφηση). Στη συνέχεια, ο ατμός οδηγείται στο συμπυκνωτή, συμπυκνώνεται και αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον μέσω του δευτερεύοντος κυκλώματος νερού μέσης θερμοκρασίας.

- **Ψύξη και αποσυμπίεση (cooling and depressurization):**Στο στάδιο αυτό, το οποίο ισοδυναμεί με εκείνο της εκτόνωσης του ψυκτικού μέσου στο κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών, ο προσροφητής αποσυνδέεται από το συμπυκνωτή και ψύχεται από νερό μέσης θερμοκρασίας (MT), ενώ η πίεση του μειώνεται από την πίεση συμπύκνωσης στην πίεση ατμοποίησης.
- **Προσρόφηση και ατμοποίηση (adsorption and evaporation):**Είναι ισοδύναμο με την ατμοποίηση του ψυκτικού στο συμβατικό κύκλο συμπίεσης ατμών. Ο προσροφητής συνδέεται με τον ατμοποιητή, και συνεχίζει να ψύχεται από νερό μέσης θερμοκρασίας. Καθώς η θερμοκρασία του μειώνεται προσροφά τον παραγόμενο στον ατμοποιητή ατμό και έτσι επιτυγχάνεται η ψύξη. Η θερμότητα ατμοποίησης λαμβάνεται από νερό χαμηλής θερμοκρασίας.



Εικ. 1.12.Σχεδιάγραμμα ψυκτικής διάταξης με προσρόφηση

Δεδομένου πως ο κύκλος ψύξης με προσρόφηση είναι ένας διακοπτόμενος κύκλος, είναι απαραίτητη η χρήση τουλάχιστον δύο διαφορετικών θαλάμων με προσροφητικό υλικό όπως φαίνεται και στηνΕικ.1.12, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής παραγωγή ψύξης με τον έναν θάλαμο να βρίσκεται στη φάση προσρόφησης, και τον άλλον στη φάση εκρόφησης.

Στην παραγωγή ψύξης με προσρόφηση, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ζεύγη προσροφητικού υλικού-ψυκτικού μέσου είναι τα εξής:

- **Ζεόλιθος–Νερό**: Το όνομα του ζεόλιθου βασίζεται στις ιδιότητες του ορυκτού, το οποίο όταν θερμανθεί απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες νερού υπό τη μορφή ατμού. Πλέον ο όρος έχει καθιερωθεί για τα κρυσταλλικά πυριτικά αργίλια τα οποία έχουν υψηλές τιμές ειδικής επιφάνειας (800-1200 m^2/g), διακρίνονται για τα ισχυρά ηλεκτρικά πεδία στο κρυσταλλικό πλέγμα καθώς και τη φαινομενική πυκνότητα τους η οποία λαμβάνει την τιμή 750 kg/m^3[20]. Η βασικότερη ιδιότητα του ζεόλιθου είναι η δυνατότητα αντιστρεπτής αφυδάτωσης. Έχει την ικανότητα, υπό την προϋπόθεση πως η πίεση και η θερμοκρασία διατηρούνται εντός κάποιων ορίων, να μπορεί να διατηρεί πλήρως τη δομή του εντός του κρυσταλλικού πλέγματος, και μετά από πολλούς χιλιάδες κύκλους. Είναι μη τοξικός, μη εύφλεκτος και υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες στη φύση.
- **Silica gel-νερό**: Το silica gel είναι ένα άμορφο στερεό που παρασκευάζεται από διοξείδιο του πυριτίου SiO_2. Ακόμη, χαρακτηρίζεται από την υψηλή συγγένειά του με το νερό (αν και καταστρέφεται από το υγρό νερό), είναι φτηνό, και χρησιμοποιείται με τη μορφή κόκκων[21].Σε σύγκριση με άλλα προσροφητικά, το silica gel μπορεί να αναγεννηθεί σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Επιπλέον έχει μεγάλη χωρητικότητα απορρόφησης για το νερό που έχει υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης: σχεδόν έως 40% της ξηρής μάζας του. Ένας ψύκτης προσρόφησης που χρησιμοποιεί αυτό το ζεύγος είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την θερμότητα που αποβάλλεται από βιομηχανίες έτσι ώστε να παράγει ψύξη[22].
- **Ενεργός άνθρακας – Μεθανόλη:** Ο ενεργός άνθρακας έχει χαμηλό κόστος, ισχυρή τάση προσρόφησης οργανικών ουσιών και θεωρείται το πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενο προσροφητικό μέσο. Μπορεί να παραχθεί από σχεδόν κάθε ανθρακούχο υλικό (ξύλο, πριονίδι, γεωργικά παραπροϊόντα, λιγνίτης, διάφορα είδη ορυκτών ανθράκων, διάφορα κλάσματα πετρελαίου κ.τ.λ.).

Σημαντικά πλεονεκτήματα των ψυκτών προσρόφησης είναι η απλότητα κατασκευής τους και η μηχανική τους αντοχή. Επιπλέον δεν υπάρχει περιορισμός στη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας, καθώς δεν υφίσταται κανένας κίνδυνος κρυστάλλωσης. Δεδομένου πως δεν υπάρχει κάποια αντλία ή συμπιεστής, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται είναι ελάχιστη. Ωστόσο έχουν μεγάλο όγκο και βάρος, ενώ λόγω του μικρού αριθμού παραγόμενων μονάδων, η τιμή των ψυκτών προσρόφησης παραμένει υψηλή.

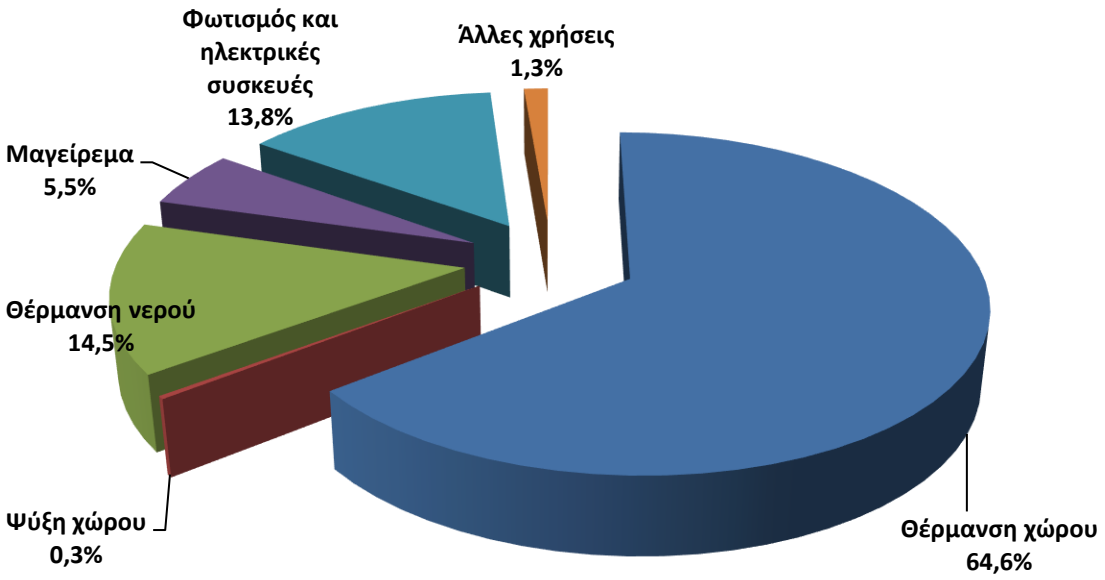
1.4 Ηλιακή ψύξη

Προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του πλανήτη και να μειωθεί η εσωτερική θερμοκρασία των κτηρίων κατά τη θερινή περίοδο, έχει γίνει χρήση διάφορων μεθόδων. Παράδειγμα αποτελεί η Μεσόγειος, όπου τα κτήρια είναι βαμμένα με ανοιχτά χρώματα, έτσι ώστε να αντανακλούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, ειδικά το καλοκαίρι. Άλλες μέθοδοι δροσισμού βασίζονται σε διάφορες τεχνικές παθητικής ψύξης και ψύξης χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (λήψη μέτρων στο σχεδιασμό του κτηρίου) που στοχεύουν στη μείωση των ψυκτικών φορτίων και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για κλιματισμό. Κατά τη θερινή

περίοδο, η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργειά αυξάνεται και αυτό έχει ως συνέπεια να αυξάνεται σημαντικά το ηλεκτρικό φορτίο αιχμής. Είναι προφανές λοιπόν πως η χρήση της ηλιακής ενέργειας για τη λειτουργία συστημάτων κλιματισμού των χώρων είναι ιδιαίτερα ελκυστική, καθώς τους καλοκαιρινούς μήνες οι υψηλές απαιτήσεις σε ψύξη συμπίπτουν με την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία.

Στην Ευρώπη, οι ενεργειακές καταναλώσεις στα κτίρια είναι υπεύθυνες για το 33% περίπου των εκπομπών CO_2. Μέχρι το 2050 ο τομέας αυτός θα πρέπει να καταστεί απαλλαγμένος από εκπομπέςCO_2[24]. Αυτό συνεπάγεται πως η ζήτηση για θέρμανση πρέπει να μειωθεί μέσα από τη βελτίωση των κτιρίων, ενώ η υπόλοιπη ζήτηση για θέρμανση και ψύξη πρέπει να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης το μεγαλύτερο μέρος της ενέργεια που καταναλώνουν τα νοικοκυριά αξιοποιείται για τη θέρμανση τους (64.7% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα).Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τον φωτισμό και για τη λειτουργία των περισσότερων ηλεκτρικών συσκευών αντιπροσωπεύει το 13.8% (σε αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται η χρήση ηλεκτρισμού για την τροφοδοσία των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης ή μαγειρέματος), ενώ για τη θέρμανση του νερού καταναλώνεται ποσοστό ενέργειας 14.5%. Οι βασικές συσκευές μαγειρέματος απαιτούν το 5.4% της ενέργειας που καταναλώνουν τα νοικοκυριά, ενώ η ψύξη χώρου και άλλες τελικές χρήσεις καλύπτουν το 0.3% και το 1.3% αντίστοιχα[25]. Συνεπώς η θέρμανση του χώρου και του νερού αντιπροσωπεύει το 79.2% της τελικής ενέργειας που καταναλώνουν τα νοικοκυριά.



Εικ. 1.13.Καταμερισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας των νοικοκυριών σε χώρες τις Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τα χαμηλότερα ποσοστά ενέργειας που καταναλώνονται για τη θέρμανση χώρων παρατηρούνται στη Μάλτα (16.0%) και στην Πορτογαλία (21.1%), ενώ τα υψηλότερα στο Λουξεμβούργο (79.9 %), στην Ουγγαρία (74.0 %), το Βέλγιο (73.3%) και τη Λιθουανία (70.8%)[26].

Κατά κύριο λόγο η ηλιακή ψύξη διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Έτσι έχουμε την ηλιακή ψύξη με φωτοβολταϊκά τα οποία τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια μια συμβατική αντλία θερμότητας κι έτσι επιτυγχάνεται η ψύξη, και την ηλιακή ψύξη με ηλιοθερμικούς συλλέκτες. Μολονότι παλαιότερα επιλέγονταν κατά κύριο λόγο οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, τα τελευταία χρόνια η σημαντική μείωση τους αρχικού κόστους των ΦΒ καθώς και η βελτίωση της απόδοσης τους, καθιστούν την επένδυση ιδιαίτερα ανταγωνιστική απέναντι στα ηλιοθερμικά συστήματα. Ακόμη σε πολλές χώρες όπως στην Κίνα, έρευνες δείχνουν ότι το 30,7% και το 30,2% της πρωτογενούς ενέργειας μπορούν να εξοικονομηθούν χρησιμοποιώντας ΦΒ και το θερμικό σύστημα, αντίστοιχα ενώ ο χρόνος αποπληρωμής είναι 6-7 χρόνια για το φωτοβολταϊκό σύστημα, αλλά περισσότερο από 20 χρόνια για το θερμικό σύστημα με βάση τις τρέχουσες συνθήκες στην Κίνα[27]. Για αυτό το λόγο στην παρούσα έρευνα επιλέχθηκε να μελετηθεί η ηλιακή ψύξη με ΦΒ-αντλία θερμότητας, για διάφορες πόλεις της Ευρώπης.

1.5 Επιστημονικό Ερώτημα

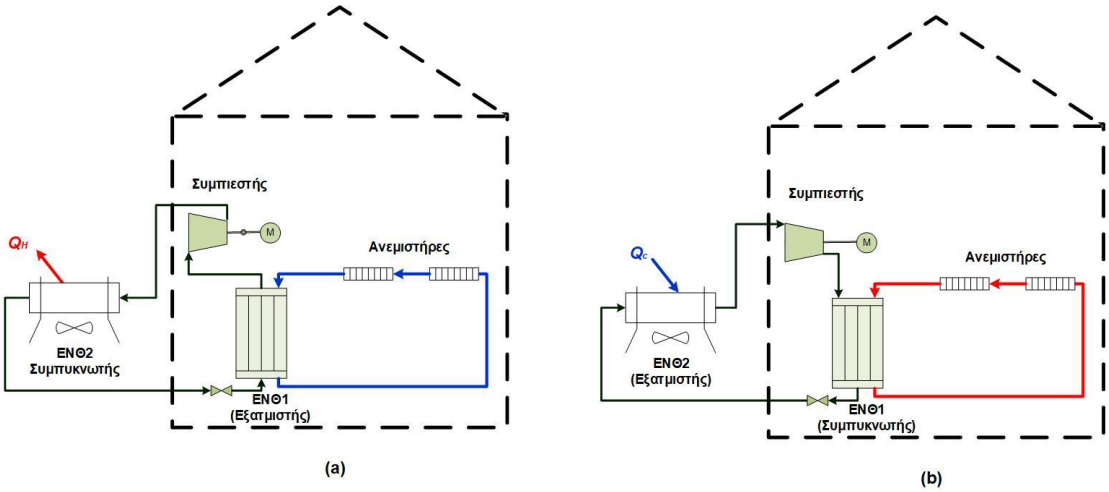
Όπως προκύπτει και από τις προηγούμενες ενότητες, για την αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος και την εναρμόνιση με τους στόχους της ΕΕ για το 2030 και το 2050, απαιτείται ιδιαίτερη φροντίδα για τη βελτίωση των συστημάτων ψύξης/θέρμανσης τόσο των υπαρχόντων όσο και των νεόδμητων κτηρίων ώστε να μειωθούν δραστικά οι καταναλώσεις αυτών. Στα πλαίσια αυτών των δράσεων, η συγκεκριμένη εργασία μελετά την ανταγωνιστικότητα ενός συστήματος συμβατικής αντλίας θερμότητας συζευγμένο με μία συστοιχία φωτοβολταϊκών.
Προς αυτή την κατεύθυνση, τα κύρια ερωτήματα που θα κληθεί στα επόμενα κεφάλαια να απαντήσει η παρούσα διπλωματική είναι τα ακόλουθα:

- Ποιες είναι οι τυπικές αποδόσεις των επιμέρους συστημάτων;
- Ποια η μεταβολή της εκτίμησης των θερμικών απαιτήσεων του υπό μελέτη κτηρίου ανάλογα με την τοποθεσία;
- Πόσο ανταγωνιστικές είναι οι επενδύσεις του προτεινόμενου συστήματος ανάλογα με τη χώρα που μελετάται;
- Πόση είναι η εξοικονόμηση ρύπων ανά περιοχή από τη χρήση του προτεινόμενου συστήματος;

Κεφάλαιο 2. Επεξεργασία

2.1 Κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σύστημα συμπίεσης ατμών, το οποίο λειτουργεί με ένα τυπικό υγρό ως εργαζόμενο μέσο, το R410A. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται και οι δύο τρόποι λειτουργίας της αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας.



Εικ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση των δύο τρόπων λειτουργίας αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας (α) κατά την ψυχρή και (β) τη θερμή λειτουργία

Από τον κατασκευαστή του συστήματος παρέχονται ορισμένα δεδομένα όπως η μέτρηση της θερμικής ισχύος, του συντελεστή COP καθώς και της παροχής μάζας νερού για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος και θερμοκρασίες εξερχόμενου από την αντλία θερμότητας νερού. Χρησιμοποιήθηκε μια αντλία θερμότητας 30AWτης εταιρείας Carrier[28]με ονομαστική θερμική ισχύ 4-15kWκαι ονομαστική ψυκτική ισχύ 3-16 kWη οποία αλληλεπιδρά με το περιβάλλον μέσω ενός αερόψυκτου εναλλάκτη θερμότητας, ενώ το εργαζόμενο μέσο του δευτερεύοντος κυκλώματος στον εναλλάκτη θερμότητας 1 είναι νερό.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά για τη λειτουργία ψύξης, της αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Αναλυτικότερα τα στοιχεία που απεικονίζονται είναι τα εξής: LWT (Leaving Water Temperature) η θερμοκρασία του νερού που ψύχει το σπίτι σε ^{o}C, Qc η ψυκτική ισχύς σε kW, EER (Energy Efficiency Ratio) ο λόγος μέσης παραγόμενης ψύξης προς τη μέση καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε kW/kW και q ο ρυθμός της ροής νερού στον εξατμιστή σε l/s.

Πιν. 2.1.Χαρακτηριστικά για τη λειτουργία ψύξης, της εξεταζόμενης αντλίας θερμότητας [28]

		Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, ^{o}C													
		35							45						
	LWT	Qc			EER			q	Qc			EER			q
	^{o}C	kW			kW/kW			l/s	kW			kW/kW			l/s
		Nom	Min	Max	Nom	Min	Max	Nom	Nom	Min	Max	Nom	Min	Max	Nom
30AWH004H--	5	3.01	0.80	3.13	2.70	4.56	2.66	0.144	2.67	0.66	2.81	2.09	3.45	2.00	0.127
30AWH006H--		4.28	0.65	4.94	2.78	5.66	2.53	0.205	3.78	0.51	4.36	2.11	4.28	1.92	0.18
30AWH008H--		4.50	0.42	5.32	2.84	3.41	2.74	0.215	3.91	0.36	4.63	2.03	2.44	1.96	0.187
30AWH012H--		9.60	3.46	10.85	2.78	3.16	2.56	0.459	8.38	2.95	9.49	2.02	2.31	1.89	0.401
30AWH015H--		12.45	3.40	12.87	2.75	3.29	2.68	0.595	9.24	2.90	9.45	2.20	2.41	2.16	0.441
30AWH012H--9		9.60	3.33	13.00	2.79	3.22	2.63	0.459	8.88	2.84	9.55	2.38	2.36	2.12	0.424
30AWH015H--9		12.45	3.40	12.87	2.75	3.29	2.68	0.595	9.24	2.90	9.45	2.20	2.41	2.16	0.441
30AWH004H--	7	3.33	0.89	3.45	3.02	4.92	2.84	0.158	2.91	0.75	3.05	2.23	3.70	2.16	0.139
30AWH006H--		4.73	0.73	5.33	3.00	5.96	2.66	0.225	4.15	0.59	4.69	2.21	4.47	2.05	0.198
30AWH008H--		5.84	0.50	5.80	2.98	3.85	2.91	0.239	4.37	0.44	5.06	2.17	2.77	2.09	0.209
30AWH012H--		10.24	3.83	11.67	2.96	3.43	2.66	0.487	8.68	3.26	9.93	2.14	2.48	1.98	0.415
30AWH015H--		13.04	3.75	13.55	2.95	3.67	2.83	0.621	9.82	3.20	10.09	2.30	2.64	2.27	0.469
30AWH012H--9		10.20	3.68	13.69	3.00	3.59	2.77	0.487	9.33	3.13	10.19	2.56	2.59	2.22	0.446
30AWH015H--9		13.00	3.75	13.55	2.91	3.67	2.83	0.621	9.82	3.20	10.09	2.30	2.64	2.27	0.469
30AWH004H--	10	3.74	1.03	3.93	3.22	5.46	3.12	0.179	3.28	0.87	3.41	2.45	4.06	2.40	0.157
30AWH006H--		5.33	0.86	5.92	3.10	6.40	2.85	0.255	4.71	0.70	5.18	2.35	4.76	2.24	0.225
30AWH008H--		5.77	0.63	6.52	3.25	4.50	3.15	0.276	5.04	0.55	5.70	2.37	3.28	2.29	0.241
30AWH012H--		11.10	4.39	12.88	3.10	3.85	2.81	0.53	9.14	3.73	10.59	2.31	2.73	2.11	0.437
30AWH015H--		13.82	4.29	14.58	3.16	4.23	3.04	0.66	10.70	3.65	11.04	2.45	3.00	2.43	0.511
30AWH012H--9		11.10	4.20	14.72	3.31	4.15	2.98	0.53	10.00	3.57	11.15	2.84	2.94	2.38	0.478
30AWH015H--9		13.82	4.29	14.58	3.16	4.23	3.04	0.66	10.70	3.65	11.04	2.45	3.00	2.43	0.511
30AWH004H--	15	4.46	1.26	4.73	3.74	6.36	3.59	0.213	3.88	1.08	4.00	2.82	4.67	2.80	0.186
30AWH006H--		6.37	1.07	6.90	3.42	7.14	3.16	0.304	5.64	0.89	6.01	2.60	5.25	2.55	0.27
30AWH008H--		7.04	0.84	7.72	3.66	5.58	3.56	0.336	6.17	0.74	6.77	2.70	4.12	2.62	0.295
30AWH012H--		12.60	5.32	14.91	3.42	4.53	3.06	0.602	9.89	4.52	11.69	2.59	3.15	2.32	0.473
30AWH015H--		15.18	5.18	16.28	3.56	5.18	3.39	0.725	12.16	4.40	12.62	2.70	3.59	2.70	0.581
30AWH012H--9		12.60	5.08	16.45	3.84	5.08	3.32	0.602	11.12	4.31	12.75	3.30	3.52	2.64	0.531
30AWH015H--9		15.18	5.18	16.28	3.56	5.18	3.39	0.725	12.16	4.40	12.62	2.70	3.59	2.70	0.581
30AWH004H--	18	4.93	1.40	5.22	4.20	6.89	3.86	0.234	4.25	1.20	4.36	3.03	5.04	3.03	0.203
30AWH006H--		7.04	1.20	7.49	3.70	7.58	3.35	0.334	6.20	1.00	6.50	2.74	5.54	2.74	0.296
30AWH008H--		7.84	0.97	8.44	3.99	6.24	3.80	0.373	0.85	0.85	0.85	4.62	4.62	4.62	0.041
30AWH012H--		13.54	5.88	16.12	3.66	4.95	3.21	0.645	10.34	4.99	12.35	2.76	3.40	2.45	0.494
30AWH015H--		16.04	5.72	17.31	3.85	5.75	3.60	0.764	13.03	4.85	13.57	2.86	3.94	2.86	0.623
30AWH012H--9		13.50	5.60	17.48	4.15	5.63	3.53	0.645	11.80	4.75	13.70	3.58	3.86	2.80	0.564
30AWH015H--9		16.00	5.72	17.31	3.81	5.75	3.60	0.764	13.03	4.85	13.57	2.86	3.94	2.86	0.623

2.2 Θερμικά και ψυκτικά φορτία

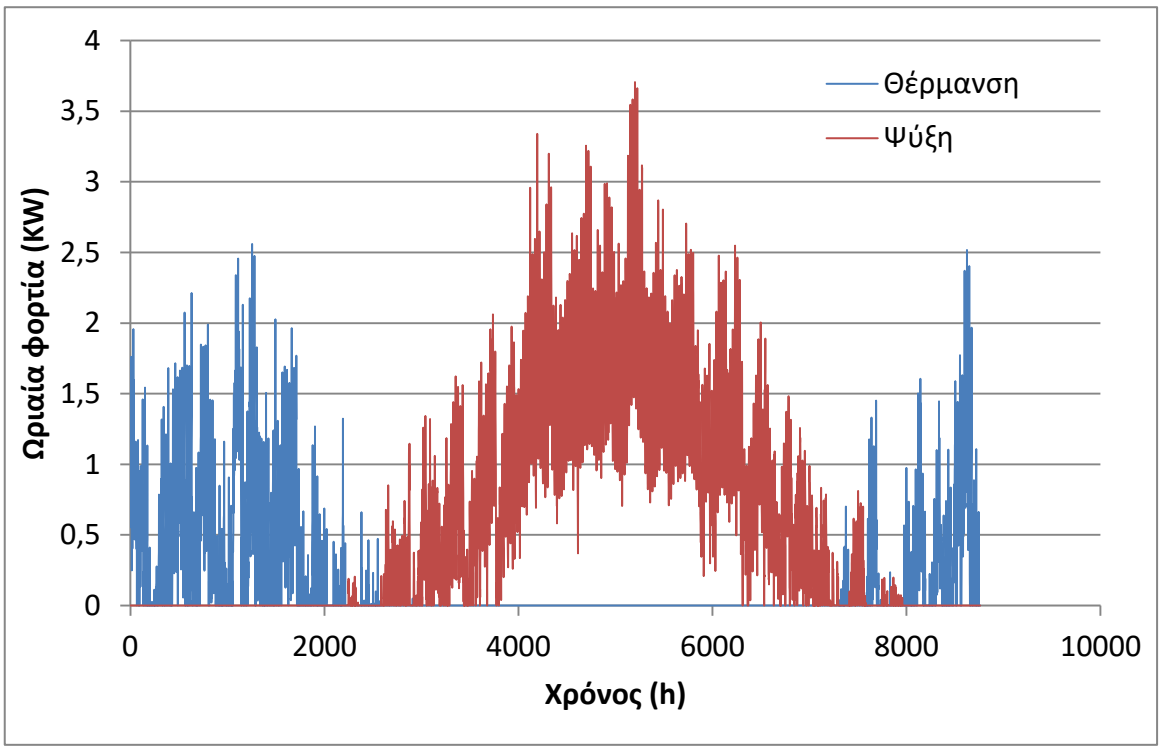
Ο υπολογισμός των θερμικών και ψυκτικών φορτίων πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος Energyplus[29], και ως κτίριο αναφοράς επιλέχθηκε μία κατοικία συνολικής επιφάνειας 80m^2, σε διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις. Τα δεδομένα που εισήχθησαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Ο προσανατολισμός της οικίας βρισκόταν στο νότο. Όσον αφορά τα παρακείμενα κτήρια, τοποθετήθηκαν και στις δύο πλευρές σε απόσταση 4,57 m (15 ft). Για τις θερμικές ιδιότητες των τοίχων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από το ENISO 6946[30], ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων του EnergyPlus. Οι βασικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πιν. 2.2. Θερμικές ιδιότητες των δομικών υλικών βάσει του EN ISO 6946[30]

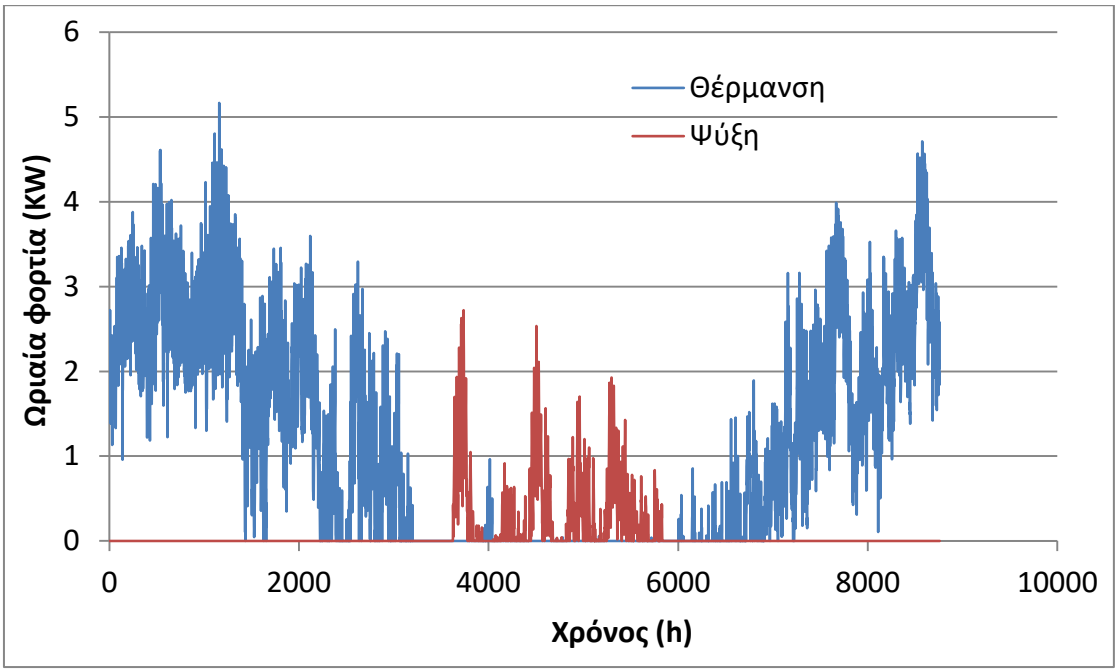
Υλικό	**Πάχος (mm)**	**Θερμική αγωγιμότητα (W m^{-1} K^{-1})**	**Πυκνότητα (kg/m^3)**	**Ειδική θερμότητα (J kg^{-1} K^{-1})**
Τοίχοι				
Κονιάματα (Επίπεδο 1/5)	20	0.870	1800	1000
Αργυλικό τούβλο (Επίπεδο 2)	90	0.51 (0.45)	1500	1000
Αφρός πολυουρεθάνης (Επίπεδο 3)	50	0.05 (0.033)	70	1500
Τούβλο από κοίλο πηλό (Επίπεδο 4)	60	0.51 (0.45)	1500	1000
Εξωτερικό φινίρισμα				
Στόκος	25.4	0.65	1280	488.5
Επιφάνεια δαπέδου				
Ξύλο (για οικιστικά κτίρια)	15.875	0.115	544.6	1215

Ως υλικό στέγης επιλέχθηκε ελαφρύ πλακόστρωτο αστάρι, από την βάση δεδομένων του EnergyPlus, με απορροφητικότητα 0,8 και ικανότητα εκπομπής 0,91. Όσον αφορά τα παράθυρα επιλέχθηκαν διπλά τζάμια με θερμική θραύση που προστέθηκε στο πλαίσιο (συντελεστής μεταφοράς θερμότητας 3,78 W m^{-1} K^{-1}) ενώ η εσωτερική σκίαση επιλέχθηκε να είναι 0,7. Τέλος επιλέχθηκε ξύλινη πόρτα με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 2,72 Wm^{-2}K^{-1}, της οποίας η επιφάνεια ισούται με 2,87 m^2 (30 ft^2).

Από τη βάση δεδομένων του EnergyPlusη διαρροή αέρα ρυθμίστηκε σε 8 αλλαγές αέρα ανά ώρα και ορίστηκε ο φυσικός αερισμός ως 3 ημέρες την εβδομάδα. Για να καλυφθούν τα ψυκτικά φορτία επιλέχθηκε ένα κεντρικό κλιματιστικό με COP 3,28ενώ οι ανάγκες θέρμανσης - συμπεριλαμβανομένης της θέρμανσης νερού - καλύφθηκαν από έναν λέβητα φυσικού αερίου με θερμική απόδοση 95%. Επιπλέον, για τα κτήρια κατοικιών το σημείο ρύθμισης θέρμανσης επιλέχθηκε να είναι 21,1 ° C (70 ° F), ενώ το σημείο ρύθμισης ψύξης ρυθμίστηκε στους 24,4 ° C (76 ° F). Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το EnergyPlusμε βάση τα καιρικά δεδομένα της Αθήνας. Ομοίως προέκυψαν και τα αποτελέσματα για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.

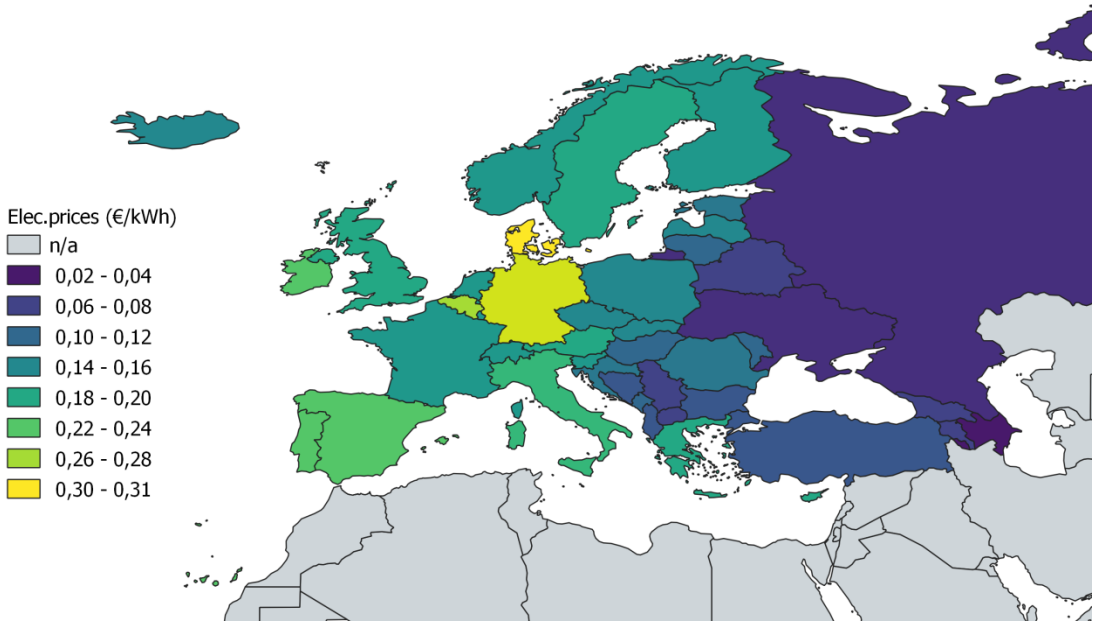


Εικ. 2.2 Θερμικά και ψυκτικά φορτία για κτήριο αναφοράς μια κατοικία, όπως αυτά προέκυψαν από το πρόγραμμα EnergyPlus με βάση τα καιρικά δεδομένα της Αθήνας.

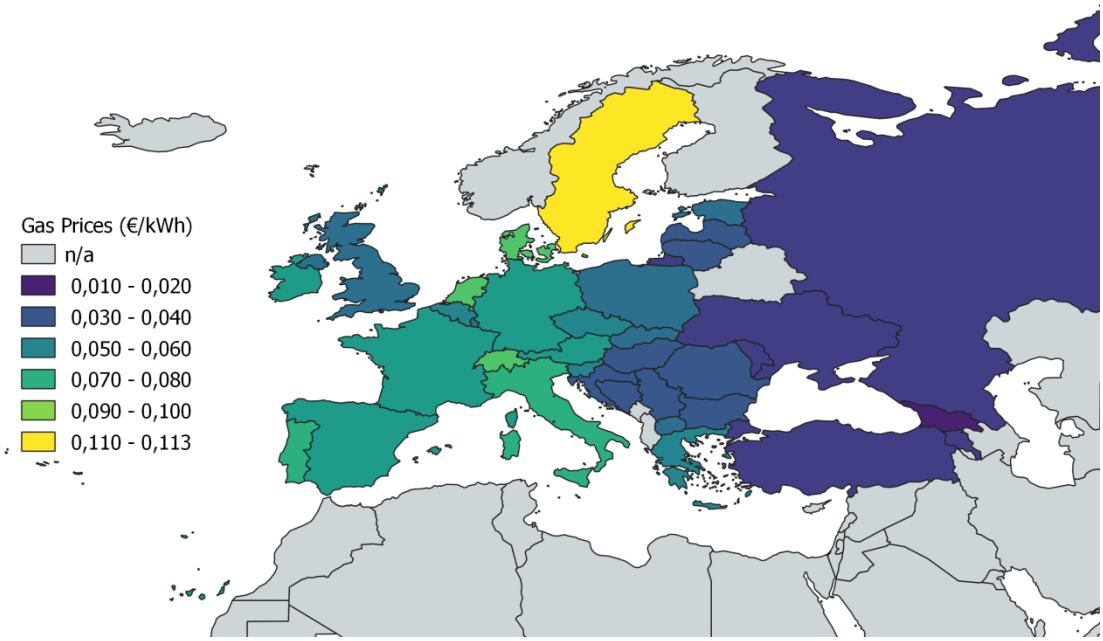


Εικ. 2.3 Θερμικά και ψυκτικά φορτία για κτήριο αναφοράς μια κατοικία, όπως αυτά προέκυψαν από το πρόγραμμα EnergyPlus με βάση τα καιρικά δεδομένα του Βερολίνου.

Στη συνέχεια, για κάθε πόλη υπολογίστηκε το ετήσιο θερμικό και ψυκτικό φορτίο έτσι ώστε δεδομένης της τιμής του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα (Εικ 2.4-2.5) για κάθε χώρα, να υπολογισθεί το ετήσιο συνολικό κόστος.



Εικ. 2.4Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις για το έτος 2018



Εικ. 2.5Τιμές φυσικού αερίου για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις για το έτος 2018 (Για την Ελλάδα λήφθηκε η τιμή του φυσικού αερίου για το έτος 2017).

Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιείται η διαδικασία που προτάθηκε από τον Bellia et al. **[31].** Εξειδικεύοντας, εφαρμόζοντας μια σειρά διαφορετικών τιμών για την τάση από 0 έως την τάση ανοικτού κυκλώματος, υπολογίζονται τα αντίστοιχα ρεύματα εξόδου για διάφορες τιμές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας. Τελικά η πραγματική τάση και το ρεύμα της φωτοβολταϊκής μονάδας προσδιορίζεται μέσα από την εύρεση μιας σειράς τάσεων και ρεύματος όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου.

Αρχικά, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί, με βάση τις συνθήκες περιβάλλοντος η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων, Tcell, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Faiman[32]:

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{I_{sol}}{c_o + c_1 u_w} \qquad 2.2.1$$

Όπου u_w η ταχύτητα ανέμου, και c_o, c_1 σταθερές που εξαρτώνται από τη θέση της φωτοβολταϊκής μονάδας. Για την Αθήνα, ισχύει $c_o = 41.86(\mathrm{W\,K^{-1}}m^{-2})$και $c_1 = 3.95(\mathrm{W\,s\ K^{-1}}m^{-3})$[33].

Λαμβάνοντας υπόψιν την αντίσταση σειράς, Rs, και της αντίσταση διακλάδωσης, Rp, για ένα μοντέλο διόδου, το ρεύμα εξόδου, IPv, mod, υπολογίζεται με βάση την παρακάτω έκφραση:

$$I_{PV,mod} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{PV,mod} + I_{PV,mod} \cdot R_s}{a_v}\right) - 1\right] - \frac{V_{PV,mod} + I_{PV,mod} \cdot R_s}{R_p} \qquad 2.2.2$$

Η ποσότητα a_vυπολογίζεται ως εξής:

$$a_v = N_s \cdot c_{ideal} \cdot k \frac{T_{cell}}{q} \qquad 2.2.3$$

Όπου Ns ο αριθμός φωτοβολταϊκών κυττάρων, c_{ideal} συντελεστής ιδανικότητας, k η σταθερά Boltzmann ($k = 1.3806 \cdot 10^{-23}\, J/K$) και q το φορτίο των ηλεκτρονίων ($q = 1.602 \cdot 10^{-19}\, C$) . Ακόμη για το φωτόρευμα ισχύει:

$$I_{ph} = \frac{I_{sol}}{I_{sol,\mathrm{STC}}} \cdot \left[I_{sc,\mathrm{STC}} + \mu_{sc} \cdot \left(T_{cell} - T_{cell,\mathrm{STC}}\right)\right] \qquad 2.2.4$$

Όπου:$I_{sol,STC}$ είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε τυπικές συνθήκες δοκιμής (STC) και είναι ίση με 1000 W / m^2, το $I_{sc,STC}$είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε τυπικές συνθήκες δοκιμής (STC), $T_{cell,STC}$ η θερμοκρασία του κυττάρου στο STC ($T_{cell,STC}$= 298 K) και μ_{sc} είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκυκλώματος.

Το ρεύμα κορεσμού διόδου υπολογίζεται με βάση την εξής σχέση:

$$I_o = I_{sc,\mathrm{STC}} \cdot \exp\left(\frac{-V_{oc,\mathrm{STC}}}{a_v}\right) \cdot \left(\frac{T_{cell}}{T_{cell,\mathrm{STC}}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot \varepsilon_g}{c_{ideal} \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{cell}} - \frac{1}{T_{cell,\mathrm{STC}}}\right)\right] \qquad 2.2.5$$

Όπου $V_{oc,\mathrm{STC}}$η τάση ανοιχτού κυκλώματος σε τυπικές συνθήκες δοκιμής και ε_g το ενεργειακό χάσμα. Για την αντίσταση Rp ισχύει η σχέση που ακολουθεί:

$$R_p = \frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC} \cdot R_S}{I_{sc,\mathrm{STC}}\left[1 - \exp\left(\frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC} \cdot R_S - V_{oc,STC}}{a_v}\right) + \exp\left(\frac{-V_{oc,\mathrm{STC}}}{a_v}\right)\right] - \frac{P_{mp,STC}}{V_{mp,STC}}} \qquad 2.2.6$$

Ο δείκτης mp αναφέρεται στις αντίστοιχες ιδιότητες στη λειτουργία μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας.

Η επιφάνεια φωτοβολταϊκών αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό Φ/Β συνδεδεμένων παράλληλα ($N_{PV,p}$) ή σε σειρά ($N_{PV,s}$), αντίστοιχα. Η ολική τάση και το ολικό ρεύμα μπορούν να υπολογιστούν λαμβάνοντας υπόψιν τις επιμέρους τάσεις και ρεύματα:

$$I_{PV,arr} = I_{PV,mod} \cdot N_{PV,p} \qquad 2.2.7$$

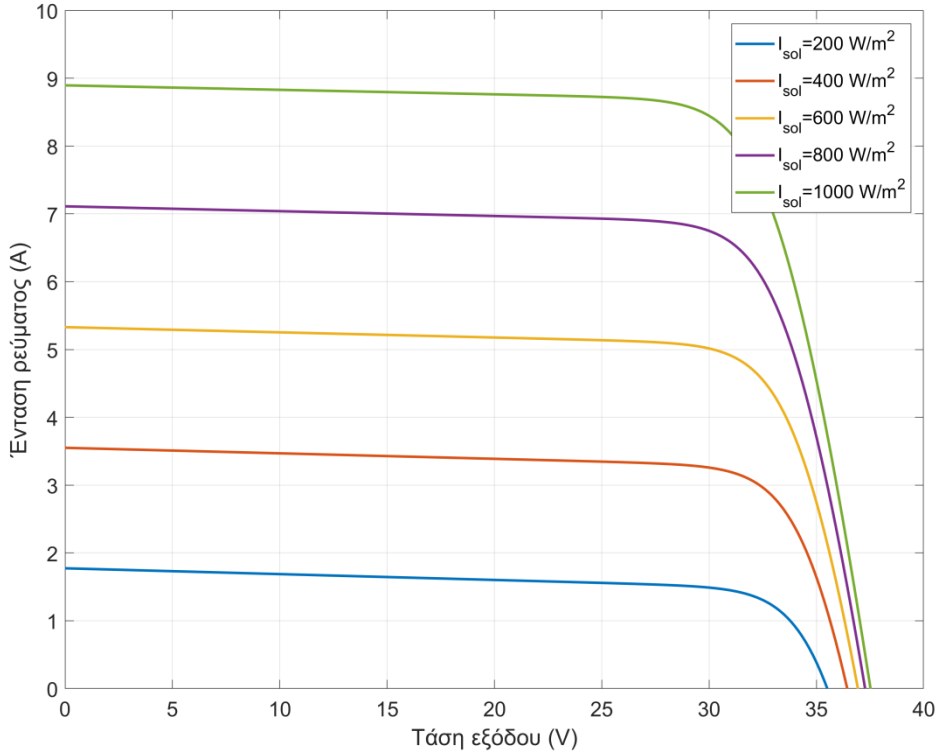
$$V_{PV,arr} = V_{PV,mod} \cdot N_{PV,s} \qquad 2.2.8$$

Οι σταθερές και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

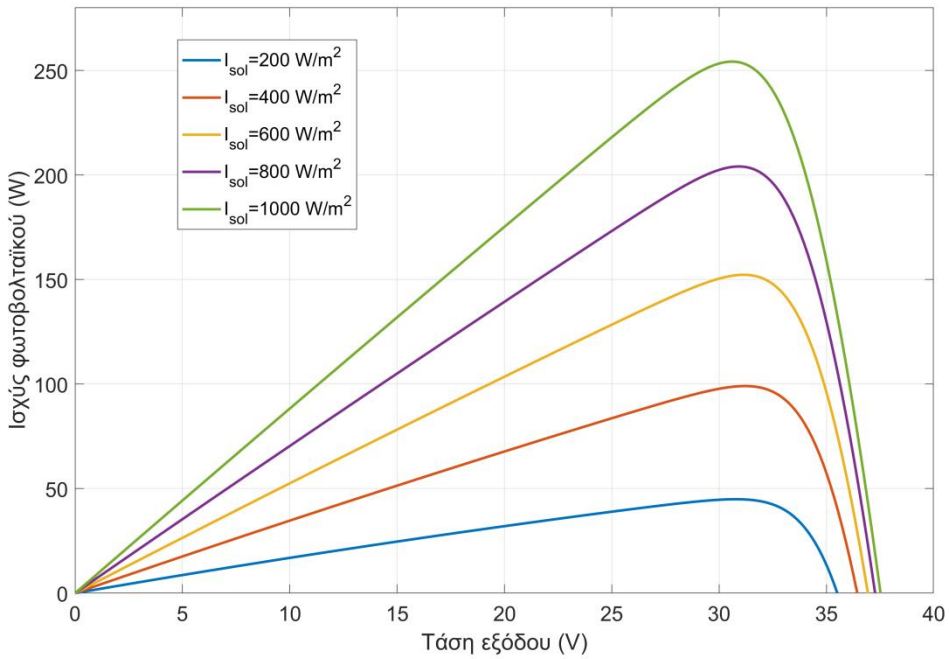
Πιν. 2.3. Χαρακτηριστικά μεγέθη για το Φ/Β-MLU255HC[34]

Παράμετρος	**Τιμή**
Αριθμός φωτοβολταϊκών κυττάτων Ns	40
c_{ideal} (-)	1.3
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}(A)	8.89
μ_{sc}(AK^{-1})	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc}(V)	37.8
ε_g(J)	$1.79444 \cdot 10^{-19}$
Αντίσταση απωλειών R_s (Ω)	0.34
Μέγιστη τάση V_{mp}(V)	31.2
Μέγιστο ρεύμα $I_{mp,STC}$(A)	8.18
Μέγιστη ισχύς P_{mp}(W)	255.2
Διαστάσεις (mm)	1625 x 1019 x 46

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της έντασης του ρεύματος και της ισχύος συναρτήσει της τάσης, για κάθε σειρά μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικ. 2.6 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για το Φ/Β - MLU255HC για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}=25 °C, ταχύτητα ανέμου u_w=2.5 m/s)



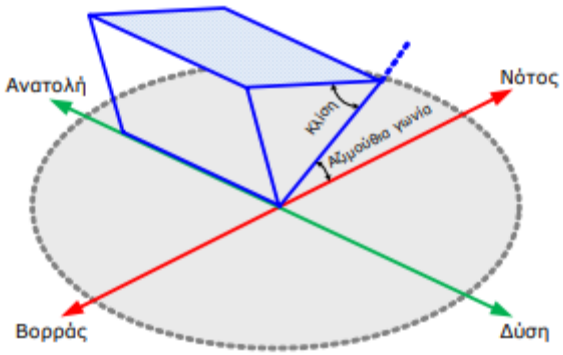
Εικ. 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για το Φ/Β - MLU255HC για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}=25 °C, ταχύτητα ανέμου u_w=2.5 m/s)

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση αποτελεσμάτων

3.1 Προσδιορισμός γωνίας κλίσης και προσανατολισμού των φβ για μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Η αποδοτικότητα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης εξαρτάται σημαντικά από την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η ποσότητα αυτή έχει σχέση με την θέση που είναι τοποθετημένο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, δηλαδή με την θέση του ως προς τον ήλιο και τον προσανατολισμό του.

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να αυξηθεί αρκετά με τον κατάλληλο προσανατολισμό του. Απώτερος σκοπός είναι η εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερης ηλιακής ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι η πορεία του ήλιου αλλάζει με την ώρα της ημέρας καθώς και με την ημέρα του έτους, θα έπρεπε το πλαίσιο να περιστρέφεται προκειμένου να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι πάντα κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Ωστόσο, ένας τέτοιος μηχανισμός συνεχούς παρακολούθησης του ήλιου δεν είναι οικονομικά αποδοτικός σε φωτοβολταϊκά συστήματα οικιακής κλίμακας και για αυτό το λόγο δεν βρίσκει ιδιαίτερα συχνή εφαρμογή. Έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγεται σταθερός και κατάλληλος προσανατολισμός των πλαισίων και βέλτιστη κλίση. Ως κλίση του πλαισίου ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου. Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος που λαμβάνεται υπόψιν είναι η αζιμούθια γωνία, η οποία σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κεκλιμένης πλευράς του πλαισίου και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου [35].



Εικ. 3.1Γραφική απεικόνιση της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας ενός Φ/Β πλαισίου που βρίσκεται στο Βόρειο ημισφαίριο.

Η βέλτιστη κλίση του φ/β πλαισίου για την μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους για το βόρειο ημισφαίριο είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου με κατεύθυνση προς νότο, και η αζιμούθια γωνία είναι περίπου 0° . Όσον αφορά την Ελλάδα, η συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης μεγιστοποιείται για Νότιο προσανατολισμό και γωνία κλίσης περίπου ίση με 30°. Επειδή υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί για τις διαθέσιμες επιφάνειες του εκάστοτε κτηρίου και για αυτόν τον λόγο οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού των φβ ενδέχεται να μην είναι υλοποιήσιμες. Έτσι, επιλέγονται κατά βάση επιφάνειες νότιου προσανατολισμού με απόκλιση έως 70° από την κατεύθυνση του Νότου, και κλίσης στο εύρος 0° -50°. Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί πως η επιλογή γωνιών κλίσης άνω των 10- 15° διευκολύνει τον αυτοκαθαρισμό των πλαισίων από σωματίδια σκόνης και άλλους ρύπους μέσω της βροχής.

Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	30°	0°	90°
Ανατολικός - Δυτικός	85%kWh(max)	90%kWh(max)	50%kWh(max)
Νότιοανατολικός - Δυτικός	95%kWh(max)	90%kWh(max)	60%kWh(max)
Νότιος	kWh(max)	90%kWh(max)	60%kWh(max)
Βόρειοανατολικός - Δυτικός	95%kWh(max)	90%kWh(max)	30%kWh(max)
Βόρειος	60%kWh(max)	90%kWh(max)	20%kWh(max)

Εικ. 3.2Επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος (σε επί τοις εκατό ποσοστά) [35].

Σε πρώτη φάση, για την εύρεση της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φ/β, η οποία μεγιστοποιεί την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα για τη διάρκεια ενός έτους από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος EnergyPlus[29]. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μεγέθη για κάθε μία ώρα του έτους:

- η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος Θ_{amb} σε ºC
- η μέση άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου I_{bn} σε W/m^2
- η μέση διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου I_d σε W/m^2
- η μέση ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου I_{glob} σε W/m^2

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρείς συνιστώσες : την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη. Έτσι η ολική ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου I_T προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_T = I_{nb} \cdot cos\theta + I_d \cdot \frac{1 + cos\beta}{2} + I_{glob} \cdot \xi \cdot \frac{1 - cos\beta}{2} \qquad 3.1.1$$

Οι τρεις όροι της εξίσωσης αποτελούν τις τρεις διαφορετικές συνιστώσες που συνθέτουν την ολική ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα:

- η άμεση ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου:

$$I_{bT} = I_{bn} \cdot cos\theta \qquad 3.1.2$$

η διάχυτη ωριαία ακτινοβολία προερχόμενη από τον ουρανό:

$$I_{dT} = I_d \cdot \frac{1 + cos\beta}{2} \qquad 3.1.3$$

και

- η ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής:

$$I_{rT} = I_{glob} \cdot \xi \cdot \frac{1-cos\beta}{2} . \qquad 3.1.4$$

Άμεση ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου

Άμεση ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν τρία είδη αμέσου ακτινοβολίας, η άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου I_b , κεκλιμένου επιπέδου I_{bT} και κάθετου επιπέδου I_{bn} . Αυτές οι επιμέρους ακτινοβολίες ικανοποιούν τις εξής σχέσεις:

$$I_b = I_{bn} \cdot cos\theta_Z \qquad 3.1.5$$

$$I_{bT} = I_{bn} \cdot cos\theta \qquad 3.1.6$$

Όπου η γωνία πρόσπτωσης, θ, της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών που προσπίπτουν επάνω στην επιφάνεια και της κάθετου στην επιφάνεια. Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και έχουν νότιο προσανατολισμό η γωνία θ υπολογίζεται ως εξής:

$$cos\theta = sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot cos\omega \qquad 3.1.7$$

Η γωνία ζενίθ, θ_Z, είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου και προσδιορίζεται ως εξής:

$$cos\theta z = sin\delta \cdot sin\varphi + cos\delta \cdot cos\varphi \cdot cos\omega \qquad 3.1.8$$

Στη συνέχεια για να υπολογιστούν οι γωνίες θ και θ_z, πρέπει αρχικά να προσδιοριστούν οι γωνίες *β, δ, φ, ω* .

- Η γωνία β ονομάζεται κλίση της επιφάνειας. Πρόκειται για τη γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι δηλαδή η κλίση υπό την οποία τοποθετείται το φ/β και άρα η γωνία που πρέπει να προσδιοριστεί στην ενότητα αυτή.

- Η ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \qquad 3.1.9$$

  Όπου n είναι ο αύξων αριθμός για κάθε μέρα του έτους και παίρνει τιμές από 1 έως 365 (n=1 για την 1η Ιανουαρίου).

- φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που εξετάζεται κάθε φορά

- Η ωριαία γωνία ω αποτελεί τη γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό 0,25 $\frac{deg}{min}$ και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = 0{,}25 \cdot \Delta t \qquad 3.1.10$$

  όπου Δt η χρονική απόσταση σε λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι ή αλλιώς $\Delta t = t_{ηλιακός} - 12h$ ώστε να υπολογιστουν τα λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι δηλαδή τη δωδεκάτη μεσημβρινή.

  Πιο συγκεκριμένα, ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο δηλαδή τον χρόνο που δείχνει το ρολόι. Η σχέση που συνδέει τους δύο προαναφερθέντες χρόνους είναι η ακόλουθη:

$$t_{ηλιακός} = t_{ρολογιού} - 4(L_{st} - L_{loc}) + E \qquad 3.1.11$$

  Όπου:

L_{st}:το γεωγραφικό πλάτος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος του εξεταζόμενου τόπου,

L_{loc}:το γεωγραφικό μήκος του εξεταζόμενου τόπου . Όσον αφορά το πρόσημο πλην (–), αυτό ισχύει μόνο για δυτικά γεωγραφικά μήκη. Για ανατολικά γεωγραφικά μήκη το πρόσημο αλλάζει σε συν (+).

Ε (σε min) :η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται για κάθε μέρα του έτους από την παρακάτω σχέση:

$$E = 9.87 \cdot sin(2B) - 7.53 \cdot cos(B) - 1.5 \cdot sin(B) \qquad 3.1.12$$

$$B = \frac{360\ (n - 81)}{364} \qquad 3.1.13$$

Διάχυτη ωριαία ακτινοβολία προερχόμενη από τον ουρανό

Προκειμένου να βρεθεί η διάχυτη ωριαία ακτινοβολία προερχόμενη από τον ουρανό, πολλαπλασιάζεται η μέση διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου I_d με τον συντελεστή $\frac{1+cos(\beta)}{2}$,ο οποίος ονομάζεται παράγοντας όρασης ουρανού του κεκλιμένου επιπέδου.

Διάχυτη ωριαία ακτινοβολία προερχόμενη από την ανάκλαση της ολικής στο έδαφος

Προκειμένου να βρεθεί η ωριαία ακτινοβολία προερχόμενη από την ανάκλαση της ολικής στο έδαφος ,πολλαπλασιάζεται η μέση ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου I_{glob} με τον συντελεστή $\frac{1-cos(\beta)}{2}$,ο οποίος ονομάζεται παράγοντας όρασης εδάφους του κεκλιμένου επιπέδου, και με την ανακλαστικότητα του εδάφους η οποία για συνηθισμένο έδαφος λαμβάνει την τιμή 0,2 [36].

Κατά αυτό τον τρόπο, λαμβάνοντας υπ΄ όψιν όλα τα παραπάνω δημιουργήθηκε κώδικας στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab όπου, έχοντας ως παράμετρο την γωνία τοποθέτησης του συλλέκτη, β, και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της βιβλιοθήκης του EnergyPlus υπολογίζονται όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη μέχρι τελικά να υπολογιστεί η ολική ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου I_T. Κατά αυτόν τον τρόπο προέκυψε μία μονοπαραμετρική σχέση της μορφής $I_T = I_T(\beta)$ και κατόπιν υπολογίστηκε για ποια τιμή της παραμέτρου β μεγιστοποιείται η τιμή της ακτινοβολίας I_T κατά περίπτωση.

3.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης για το εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης - ψύξης.

Σε αυτήν την ενότητα, το μοντέλο της αντλίας θερμότητας συνδυάζεται με τα θερμικά φορτία της εξεταζόμενης κατοικίας που προέκυψαν από το EnergyPlus, προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Για να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης COP του κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών τόσο για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας κατά την ψύξη όσο και κατά τη θέρμανση, θεωρείται γνωστή η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα γίνεται μια εκτίμηση για τη θερμοκρασία του νερού που τροφοδοτεί το κτίριο σε κάθε περίπτωση. Έτσι θεωρείται θερμοκρασία 15 ºCγια την λειτουργία κατά την ψύξη τους καλοκαιρινούς μήνες και θερμοκρασία 40 ºC για την λειτουργία κατά την θέρμανση τους ψυχρούς μήνες. Με βάση τις παρακάτω σχέσεις υπολογίζεται η εξέργεια στην έξοδο από την αντλία θερμότητας για κάθε ώρα. Έτσι για ένα έτος, η παραγωγή της εξέργειας υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$Ex_{out} = Ex_{heat} + Ex_{cool} \qquad 3.2.1$$

ΌπουEx_{heat} η εξέργεια κατά την περίοδο θέρμανσης και Ex_{cool} η αντίστοιχη εξέργεια κατά την περίοδο ψύξης. Η ποσότητα Ex_{heat} υπολογίζεται ως εξής:

$$Ex_{heat} = Q_{heat,an} \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{zone}}\right) \qquad 3.2.2$$

Από την άλλη πλευρά, η εξέργεια κατά την ψύξη, υπολογίζεται μέσα από την απόδοση εξέργειας για έναν κύκλο ψύξης χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που ακολουθούν.

$$COP_{vcc,rev} = \frac{\bar{T}low}{\bar{T}high - \bar{T}low} \qquad 3.2.3$$

$$\bar{T}low = \frac{5}{\ln\left(\frac{T_{zone}-5}{T_{zone}-10}\right)} \qquad 3.2.4$$

$$\bar{T}high = \frac{5}{\ln\left(\frac{T_{amb}+5}{T_{amb}}\right)} \qquad 3.2.5$$

$$n_{ex,VCC} = \frac{COP}{COP_{VCC,rev}} \qquad 3.2.6$$

$$n_{ex,VCC} = \frac{Ex_{cool}}{W_{el}} \Rightarrow Ex_{cool} = n_{ex,VCC} \cdot W_{el} \qquad 3.2.7$$

Ωστόσο ο συντελεστής απόδοσης COP της αντλίας θερμότητας δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$COP_{HP,rev} = \frac{\bar{T}high}{\bar{T}high - \bar{T}low} \qquad 3.2.8$$

Για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος αριθμός φ/β μονάδων με βάση τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης και το κόστος, σε συνδυασμό με την αντλία θερμότητας, σχεδιάστηκε ένας κώδικας ο οποίος αξιολογεί την τοποθέτηση μιας φβ μονάδας μέχρι και την πλήρη κάλυψη της στέγης ($40m^2$) από φ/β μονάδες. Δεδομένων των διαστάσεων κάθε φ/β μονάδας, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πιν. 2.3, προκύπτει ότι η καθαρή επιφάνεια κάθε φ/β κελιού είναι ίση με $1,66m^2$.Για να προσδιοριστεί ο μέγιστος αριθμός φ/β μονάδων που μπορούν να τοποθετηθούν στην στέγη, έγινε η παραδοχή ότι η συνολική επιφάνεια κάθε μονάδας, δηλαδή η επιφάνεια κάθε φ/β κελιού μαζί με την μη αξιοποιήσιμη επιφάνεια του φβ, είναι σχεδόν 25% μεγαλύτερη από την καθαρή επιφάνεια. Ο μέγιστος ρυθμός ηλιακής εξέργειας υπολογίζεται από την σχέση που φαίνεται παρακάτω:

$$\dot{Ex}_{sol} = \left(1 - \frac{\dot{T}_{amb}}{T_{sol}}\right) \cdot I_{sol} \cdot A_{PV} \qquad 3.2.9$$

Όπου T_{sol} η θερμοκρασία του ήλιου η οποία λήφθηκε ίση με 5770K. Τελικά ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος φ/β- αντλίας θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος της εξαγόμενης εξέργειας από την αντλία θερμότητας προς το άθροισμα της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το δίκτυο και της ηλιακής εξέργειας για κάθε προστιθέμενη φ/β μονάδα.

$$n_{ex} = \frac{\dot{Ex}_{HP,out}}{\dot{Ex}_{sol} + P_{el}} \qquad 3.2.10$$

Όπως διαπιστώνεται από τις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται καθώς αυξάνεται η επιφάνεια των φ/β δηλαδή ο αριθμός των εγκατεστημένων φ/β μονάδων. Αυτό συμβαίνει διότι τα φ/β συστήματα έχουν χαμηλή ικανότητα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.

3.3 Οικονομικοί δείκτες (Καθαρή Παρούσα Αξία-Περίοδος αποπληρωμής Κεφαλαίου)

Για την αξιολόγηση του επενδυτικού σχεδίου της εγκατάστασης φβ και αντλίας θερμότητας εξετάζεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, η εξοικονόμηση ενέργειας, η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value- Npv), καθώς και η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου.

Όσον αφορά το αρχικό συνολικό κόστος της επένδυσης, το κόστος της αντλίας θερμότητας καθορίστηκε από τον πίνακα που φαίνεται παρακάτω ενώ για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών θεωρήθηκε ότι το κόστος ανέρχεται στα 1400€/kWp.

Πιν. 3.1. Κόστος μονάδας (€) και ειδικό κόστος (€/kW)για την αντλία θερμότητας σε συνάρτηση με την ισχύ [37]

Ισχύς αντλίας θερμότητας (kW)	**5.27**	**7.03**	**8.78**	**10.54**	**12.29**	**14.05**	**17.56**
Κόστος μονάδας(€)	1.833	1.944	2.089	2.259	2.609	2.856	3.239
Ειδικό κόστος(€/kW)	347,85	276,66	237,83	214,37	212,18	203,25	184,44

Η καθαρή παρούσα αξία μιας επένδυσης στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας, ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$K\Pi A = -K_o + \sum_{t=1}^{n} \frac{KTP_t}{(1+k)^t} \qquad 3.3.1$$

Όπου

K_o: το κόστος της επένδυσης

k: η ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων που επενδύονται, η οποία λήφθηκε ίση με 3%

n: η διάρκεια ζωής της επένδυσης

KTP_t: οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους t. Για τις καθαρές ταμειακές ροές ισχύει:

$$KTP_t = (E - \Lambda\Delta - A) \cdot (1 - \Phi\Sigma) + A \qquad 3.3.2$$

όπου

Ε: τα έσοδα από τις πωλήσεις,

ΛΔ: οι λειτουργικές δαπάνες,

Α: οι προβλεπόμενες αποσβέσεις για την επένδυση,

ΦΣ: ο φορολογικός συντελεστής για τον υπολογισμό του φόρου εισοδήματος.

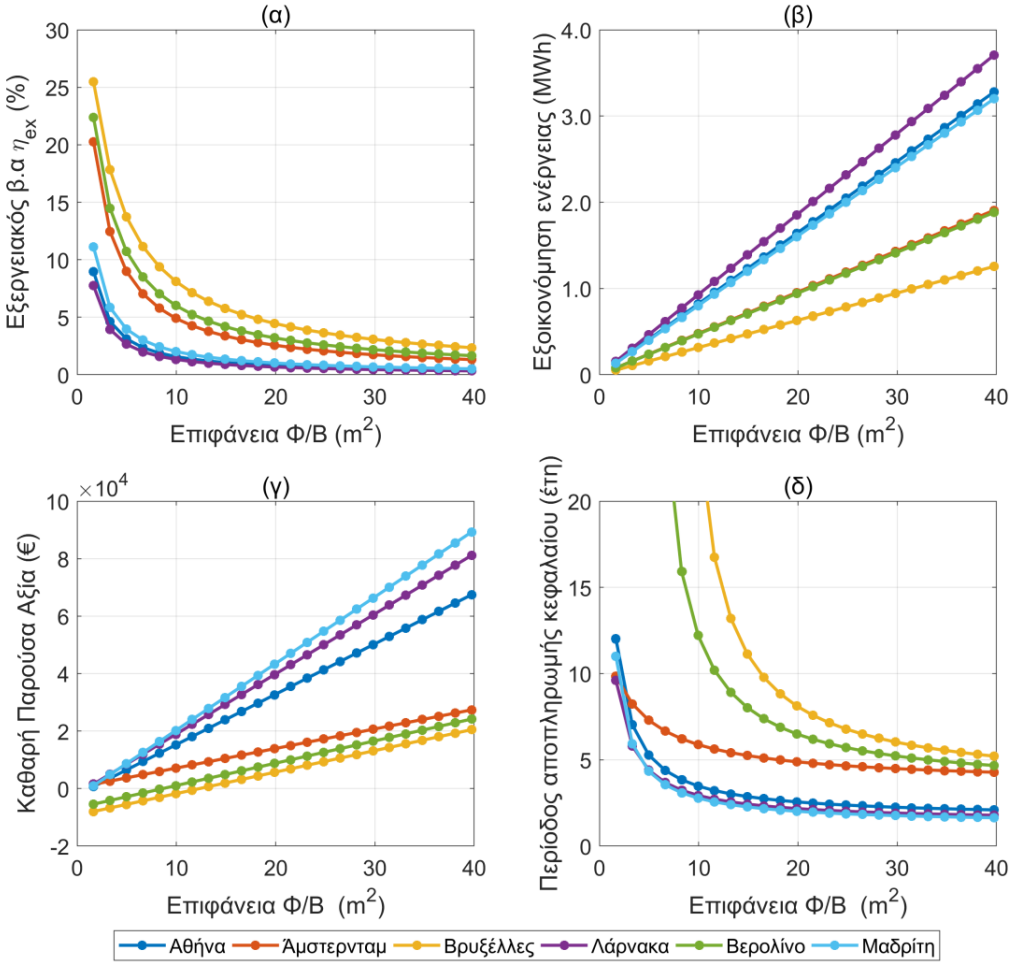
Εάν ΚΠΑ>0 έχουμε επιλογή του επενδυτικού σχεδίου, ενώ αν ΚΠΑ<0 έχουμε απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου. Σε περιπτώσεις όπου ΚΠΑ=0 υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή απόρριψη (οριακή κατάσταση).

Όσον αφορά την περίοδο αποπληρωμής κεφαλαίου ΠΑ (pay-backperiod), υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\Pi A = \frac{K_o}{KTP_t} \qquad 3.3.3$$

3.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

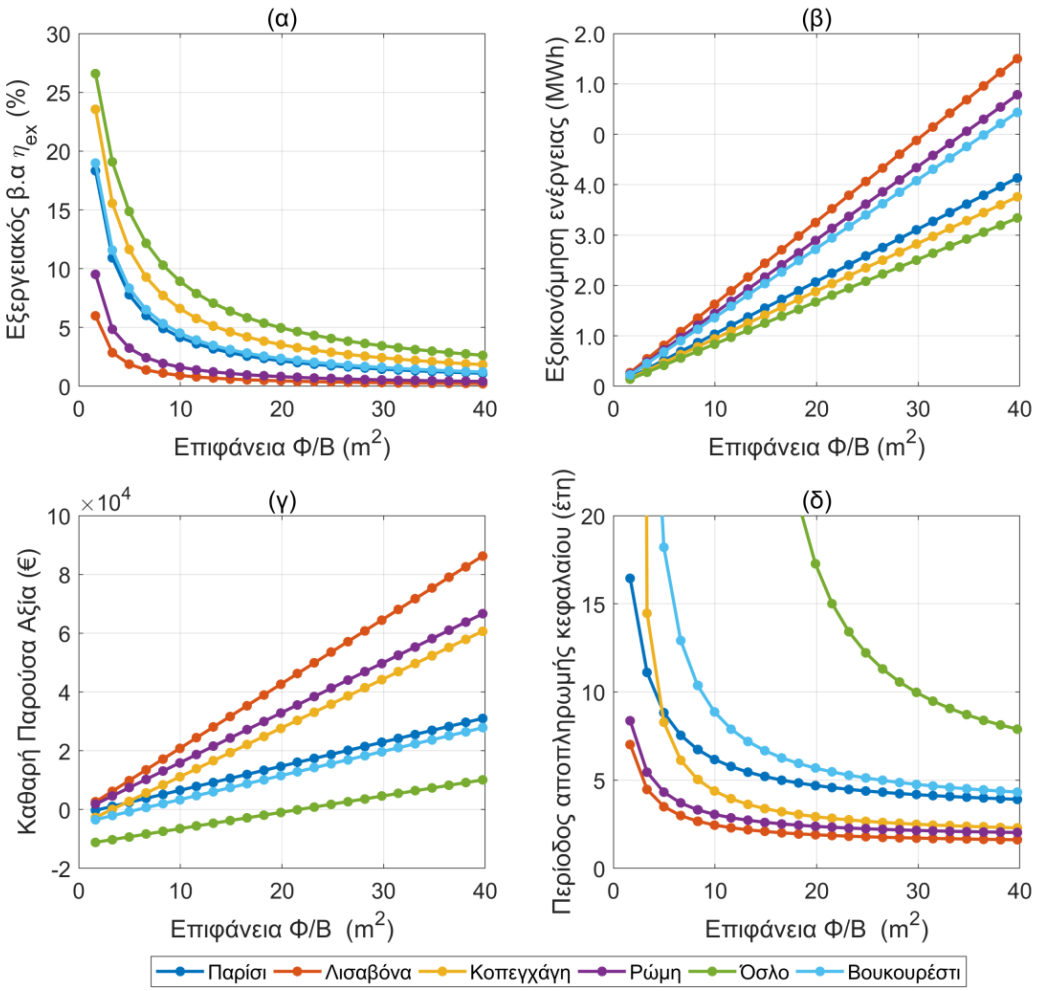
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, της εξοικονόμησης ενέργειας, της καθαρής παρούσας αξίας καθώς και της περιόδου αποπληρωμής κεφαλαίου σε συνάρτηση με την επιφάνεια των φ/β όπως αυτές προέκυψαν από το προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab.



Εικ. 3.3 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης.

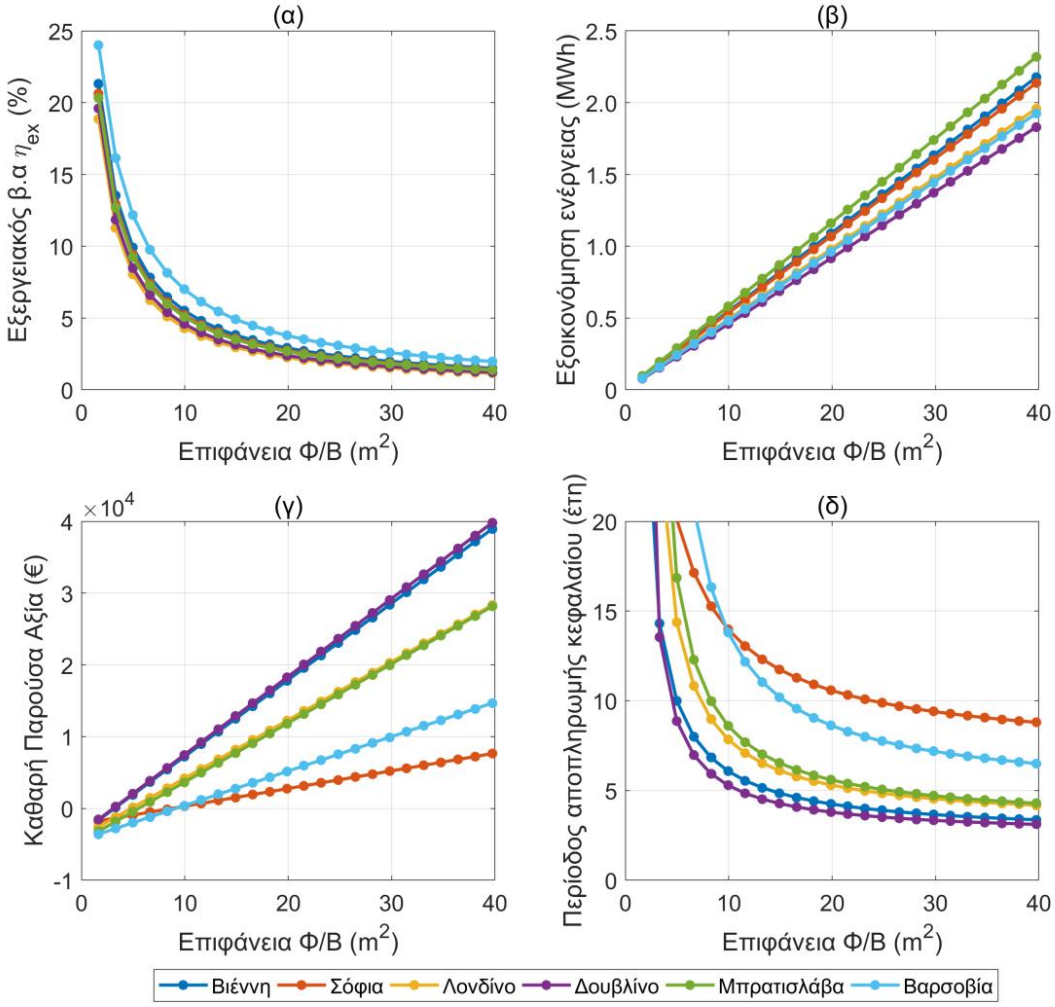
Η καθαρή παρούσα αξία καθορίστηκε για μια περίοδο 20 ετών. Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα, η εξεταζόμενη επένδυση είναι συμφέρουσα για όλες τις χώρες που απεικονίζονται. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το Βερολίνο και τις Βρυξέλλες, παρατηρούμε πως η εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας χωρίς καθόλου ή με λίγα φωτοβολταϊκά δεν συμφέρει αφού για επιφάνειες φ/β μικρότερες των 15m^2, η καθαρή παρούσα αξία λαμβάνει αρνητικές τιμές και η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερη από δέκα έτη. Αυτό σημαίνει πως για τις χώρες αυτές οι οποίες έχουν μεγαλύτερη ανάγκη σε θέρμανση από ότι σε ψύξη, ένα

σύστημα θέρμανσης που απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσει, δεν είναι αποδοτικό αν αυτή η ενέργεια αγοράζεται από το δίκτυο, δεδομένου πως έχουν υψηλή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες που απεικονίζονται στο παραπάνω διάγραμμα και σχετικά χαμηλή τιμή φυσικού αερίου. Ωστόσο, για μεγαλύτερες επιφάνειες, η επένδυση μπορεί να προκριθεί χωρίς κανένα πρόβλημα. Για τις υπόλοιπες χώρες που απεικονίζονται παραπάνω (Αθήνα, Άμστερνταμ, Λάρνακα, Μαδρίτη), η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου είναι μικρότερη από δέκα έτη σχεδόν για όλες τις επιφάνειες φ/β. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το ότι η αντλία θερμότητας στις χώρες αυτές χρησιμοποιείται περισσότερο για θέρμανση, με αποτέλεσμα να έχει καλύτερη απόδοση και άρα να μειώνεται το λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, στην περίπτωση της Λάρνακας έχουμε την μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι το ήδη υπάρχον σύστημα θέρμανσης σε αυτήν είναι ένας λέβητας πετρελαίου κι όχι φυσικού αερίου όπως στις περισσότερες εξεταζόμενες χώρες.



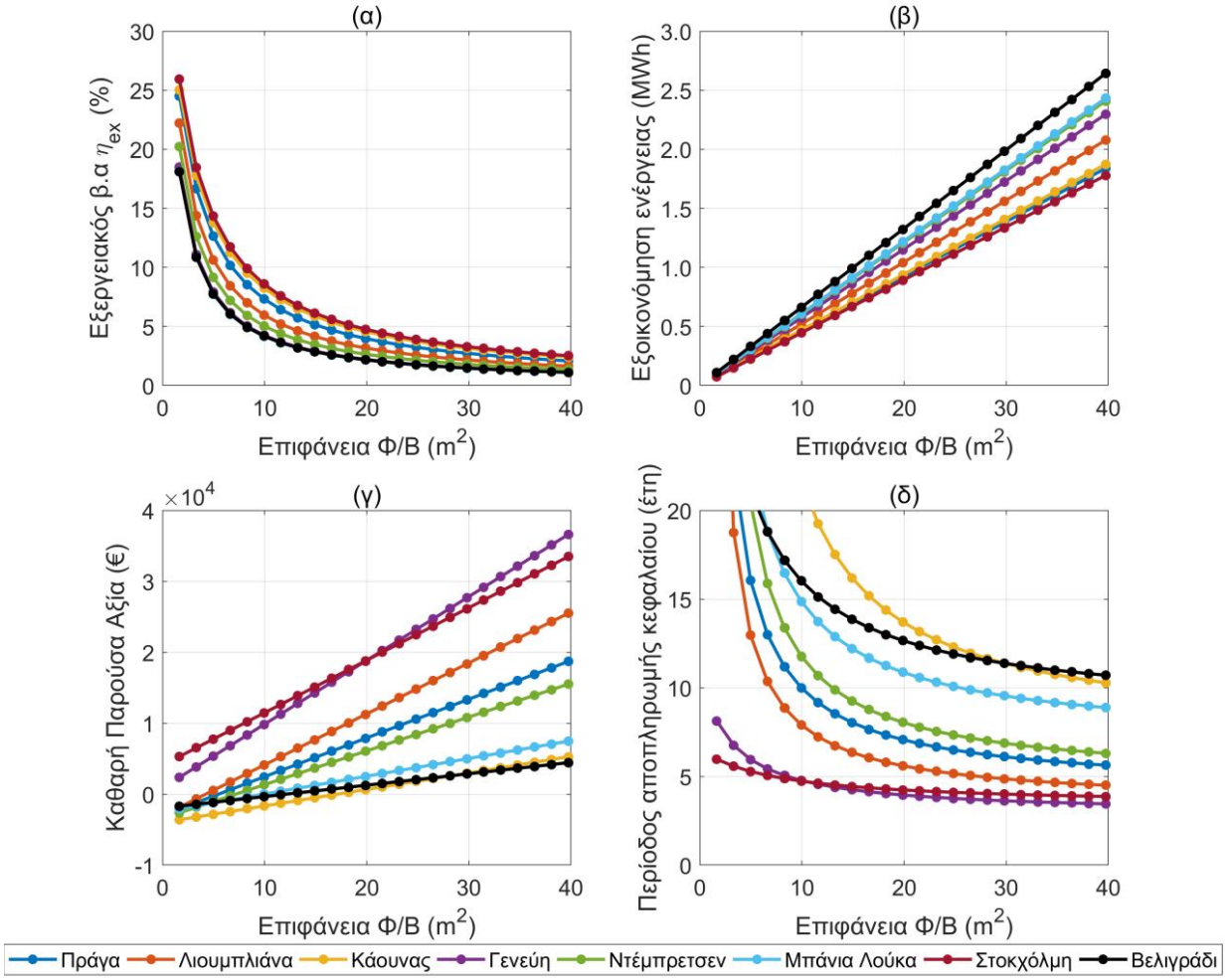
Εικ. 3.4 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης.

Η επένδυση σε γενικές γραμμές συμφέρει και για τις χώρες της παραπάνω εικόνας. Παρατηρούμε για το Όσλο, πως η επένδυση είναι αποδοτική μόνο για μεγάλες επιφάνειες φ/β (πάνω από 30m^2). Αυτό συμβαίνει διότι στη Νορβηγία διαθέτουν δικές τους πηγές φυσικού αερίου και έτσι η τιμή του είναι ιδιαίτερα χαμηλή (0,0169€/KWh), με αποτέλεσμα δεδομένης της μεγαλύτερης ανάγκης για θέρμανση από ότι για ψύξη, ένας λέβητας φυσικού αερίου να αποτελεί μια οικονομική λύση. Από την άλλη πλευρά, για την Λισαβόνα και την Ρώμη, παρατηρείται πως και μόνο η εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα, πόσο μάλλον σε συνδυασμό με τα φωτοβολταϊκά, αφού η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου είναι από την αρχή μικρότερη από 9 έτη και η καθαρή παρούσα αξία εξαρχής θετική, καθιστώντας την επένδυση ιδιαίτερα ανταγωνιστική. Για Παρίσι, Κοπεγχάγη και Βουκουρέστι, για μικρές επιφάνειες φ/β η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος θέρμανσης ψύξης δεν συμφέρει ιδιαίτερα.



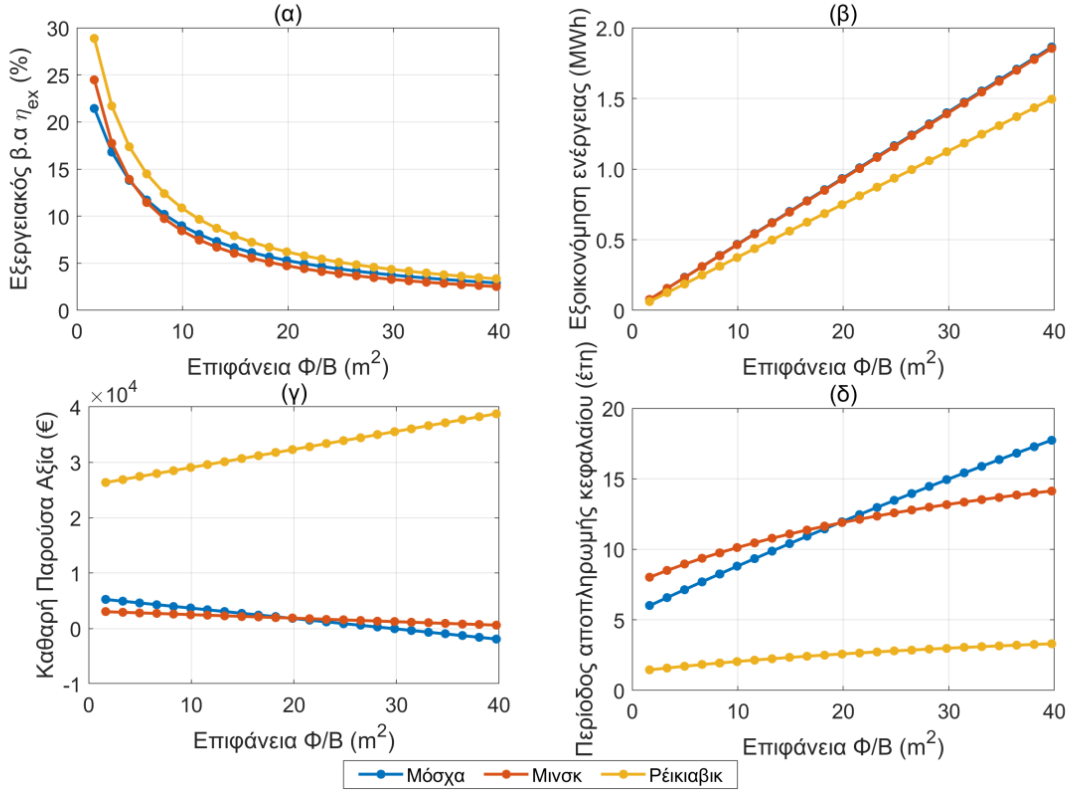
Εικ. 3.5 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης.

Αρχικά, από την παραπάνω εικόνα παρατηρείται πως η εγκατάσταση αντλίας θερμότητας χωρίς τα φωτοβολταϊκά δεν συμφέρει οικονομικά για καμία από τις χώρες που εξετάστηκαν καθώς η περίοδος αποπληρωμής λαμβάνει υψηλές τιμές και η καθαρή παρούσα αξία αρνητικές. Όσον αφορά την Σόφια, φαίνεται πως είναι η χώρα η οποία συγκριτικά με τις υπόλοιπες που απεικονίζονται στην εικόνα έχει την μεγαλύτερη περίοδο αποπληρωμής κεφαλαίου ακόμα και για το μέγιστο δυνατό αριθμό εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών. Αυτό δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι έχει χαμηλή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Ωστόσο, αναμφίβολα η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με αντλία θερμότητας συμφέρει σε κάθε περίπτωση.



Εικ. 3.6 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης.

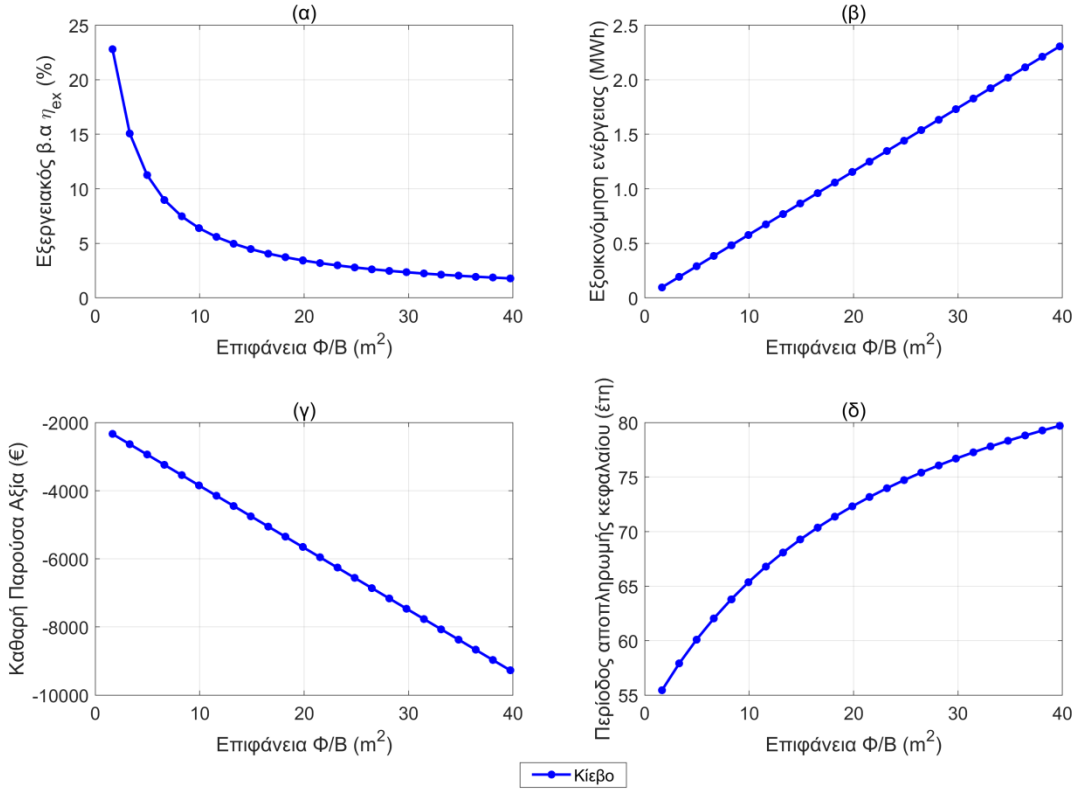
Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως η επένδυση στην περίπτωση της Στοκχόλμης και της Γενεύης είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική, με περίοδο αποπληρωμής κεφαλαίου μικρότερη από 5 έτη για μεγάλη επιφάνεια φωτοβολταϊκών. Πρόκειται για χώρες με μεγάλες απαιτήσεις θέρμανσης, στις οποίες οι τιμές φυσικού αερίου είναι υψηλές σε σχέση με την πληθώρα των υπόλοιπων χωρών. Ωστόσο, και για τις περιπτώσεις των άλλων χωρών που απεικονίζονται παραπάνω, η επένδυση είναι συμφέρουσα αυξανόμενης της επιφάνειας των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών.



Εικ. 3.7 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με αντλία θερμότητας αποτελεί μια αμφίβολη επένδυση όσον αφορά τη Μόσχα και το Μινσκ. Αναλυτικότερα, η Ρωσία είναι ο μεγαλύτερος προμηθευτής φυσικού αερίου στην Ευρώπη με τον ρωσικό κολοσσό Gazprom να αποτελεί τον μεγαλύτερο εξαγωγέα φυσικού αερίου στην Ευρωπαϊκή αγορά και κατά τη διάρκεια του έτους 2018 να πούλησε 243,3 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου στην Ευρώπη [38]. Επομένως, πρόκειται για μια χώρα στην οποία η κατανάλωση φυσικού αερίου συμφέρει ιδιαίτερα. Έτσι η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος θέρμανσης/ψύξης είναι αμφίβολης αξίας καθώς όπως παρατηρείται παραπάνω, αυξανόμενης της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών αυξάνεται και η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου ενώ παράλληλα η καθαρή παρούσα αξία τείνει να λάβει μηδενική τιμή. Για το Ρέικιαβικ, το ήδη υπάρχον σύστημα είναι ένας λέβητας πετρελαίου. Όπως

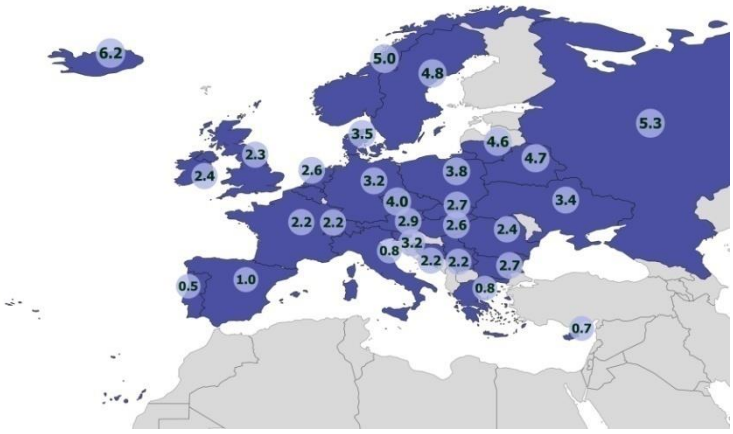
φαίνεται στο σχετικό διάγραμμα, η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου είναι μικρότερη από 5 έτη για όλες τις επιφάνειες φωτοβολταϊκών. Αυτό συμβαίνει διότι η αντλία θερμότητας λειτουργεί κατά κύριο λόγο για θέρμανση στο Ρέικιαβικ, με αποτέλεσμα υψηλότερη αποδοτικότητα και χαμηλότερα λειτουργικά κόστη. Ακόμη, η ήπια αύξηση στην περίοδο αποπληρωμής κεφαλαίου για το Ρέικιαβικ οφείλεται στη χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία που έχει ως συνέπεια τη χαμηλή απόδοση των φωτοβολταϊκών.



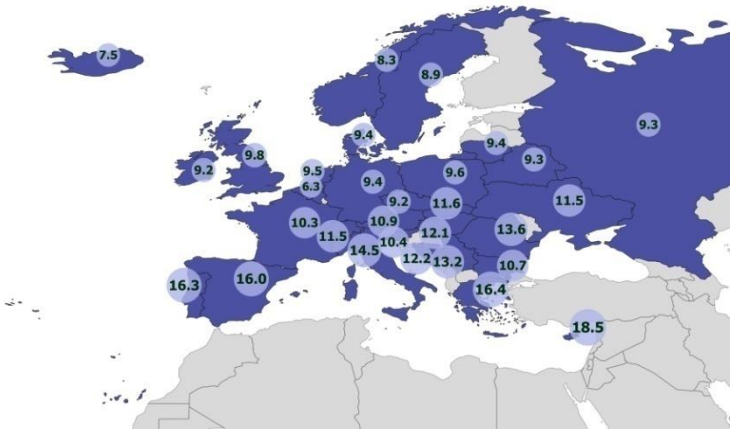
Εικ. 3.8 Αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος Φ/Β- αντλία θερμότητας, για τον αυξανόμενο αριθμό Φ/Β στοιχείων σε συνάρτηση με (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, (β) την εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) την Καθαρή παρούσα αξία, (δ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου, για το Κίεβο.

Με βάση τα απεικονιζόμενα διαγράμματα στην παραπάνω εικόνα είναι προφανές πως η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος δεν συμφέρει για το Κίεβο. Στην Ουκρανία, η τιμή του φυσικού αερίου είναι ιδιαίτερα χαμηλή (0,0209€/KWh) με αποτέλεσμα η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος θέρμανσης ψύξης να μην συμφέρει για τη συγκεκριμένη χώρα.

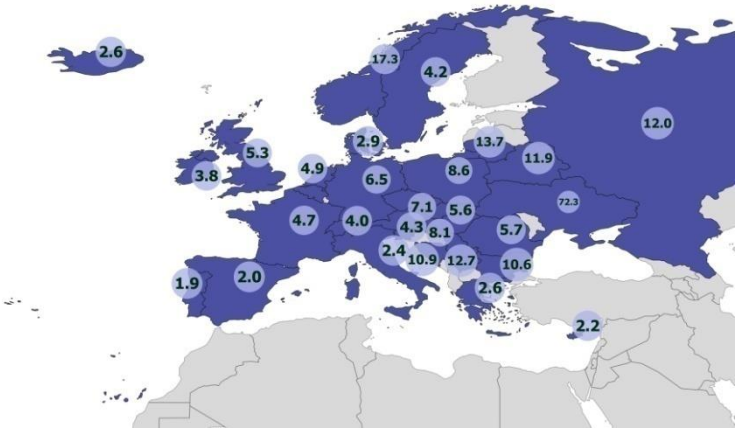
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις χώρες για εγκατεστημένη επιφάνεια φωτοβολταϊκών 19,9 m^2 τα αποτελέσματα του εξεργειακού βαθμού απόδοσης (%), της ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας (MWh) και της περιόδου αποπληρωμής (έτη), για το εξεταζόμενο σύστημα μέσα από τρεις διαφορετικούς ευρωπαϊκούς χάρτες.



(α)



(β)



(γ)

Εικ. 3.9 Συγκεντρωτικοί ευρωπαϊκοί χάρτες για (α) τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης (%), (β) την εξοικονόμηση ενέργειας (MWh/έτος), (γ) την Περίοδο Αποπληρωμής Κεφαλαίου (έτη).

Κεφάλαιο 4. Εξοικονόμηση ρύπων

Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον. Στην Ευρώπη, τις τελευταίες δεκαετίες οι εκπομπές πολλών ρύπων μειώθηκαν σημαντικά[39]. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην ατμόσφαιρα παραμένουν σε υψηλά επίπεδα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ακόμα αρνητικά η ποιότητα του αέρα. Βασική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης ανθρωπογενούς προέλευσης αποτελεί η καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πολιτικές της ΕΕ αποσκοπούν στη μείωση της έκθεσης σε ατμοσφαιρική ρύπανση με μείωση των εκπομπών και καθορισμό ορίων και στοχοθετημένων τιμών για την ποιότητα του αέρα.

Η ανάλυση των εκπεμπόμενων ρύπων από το εκάστοτε εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης/ψύξης πραγματοποιείται με την βοήθεια του λογισμικού SimaPro v.8.5.2.0. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε χώρα λαμβάνονται οι τιμές των εκπεμπόμενων ρύπων που παρουσιάζονται παρακάτω σε kg ανά KWh με χρήση φυσικού αερίου ή πετρελαίου και με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)
- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)
- Μεθάνιο(CH_4)
- Οξείδια του αζώτου (NOx)
- Πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός του μεθανίου (NMVOC)
- Σωματίδια με διάμετρο d< 2.5 um
- Σωματίδια με διάμετρο d> 10 um
- Σωματίδια με διάμετρο 2.5 um<d<10 um
- Διοξείδιο του θείου (SO_2)
- Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC)

Όσον αφορά το συμβατικό σύστημα θέρμανσης/ψύξης, αφού έχει υπολογισθεί εξαρχής με την βοήθεια του προγράμματος EnergyPlus, για κάθε χώρα, η συνολική ετήσια ενέργεια σε kWhπου απαιτεί ο λέβητας για την θέρμανση και το κλιματιστικό για την ψύξη αντίστοιχα, υπολογίζεται συνολική ετήσια εκπεμπόμενη ποσότητα σε kg, καθενός από τους παραπάνω ρύπους. Στη συνέχεια, για κάθε χώρα υπολογίζεται η ηλεκτρική ενέργεια σε kWh που απαιτεί η αντλία θερμότητας κατά τη διάρκεια ενός έτους, με χρήση κατάλληλου κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab. Κατά αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι συνολικοί εκπεμπόμενοι ρύποι σε Kgγια τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2.Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που δημιουργήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) είναι το βασικό αέριο θερμοκηπίου με κύρια πηγή εκπομπής του την καύση ανθρακούχων καυσίμων. Όπως παρατηρείται από Εικ. 4.1, για όλες τις χώρες η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος, έχει ως συνέπεια σημαντική μείωση στη

συγκέντρωση του CO_2που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, όπως φαίνεται στην Ρωσία και σε ορισμένες άλλες χώρες (Πολωνία, Λιθουανία κ.α.), η εγκατάσταση μόνο της αντλίας θερμότητας χωρίς τα φ/β, έχει ως συνέπεια την αύξηση του εκμπεμπόμενου ρύπου. Εξειδικεύοντας, στη Μόσχα κατά τη διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο ο λέβητας φυσικού αερίου από το κλιματιστικό (δεδομένης της πολύ μεγαλύτερης ανάγκης για θέρμανση από ότι για ψύξη), με την τιμή εκπεμπόμενου CO_2 από τη χρήση φυσικού αερίου (0,23kg/kWh)να είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με εκείνη από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (0,72 kg/kWh). Έτσι, στην περίπτωση εγκατάστασης μιας αντλίας θερμότητας όπου για τη Ρωσία συναντάται η υψηλότερη ποσότητα απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (8,68 MWhετησίως), είναι αναμενόμενο να υπάρχει σημαντική αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με το συμβατικό σύστημα. Επιπλέον, στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου όπου μελετάται η μέγιστη επιφάνεια φ/β ($10m^2$),για τις περισσότερος χώρες, με το φαινόμενο να παρατηρείται πιο έντονα στην Κύπρο, η συγκέντρωση του εκπεμπόμενου ρύπου λαμβάνει αρνητικές τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση αυτή η ενέργεια που παράγουν τα φ/β είναι περισσότερη από αυτήν που απαιτεί η αντλία θερμότητας για να λειτουργήσει.

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα από τα προϊόντα (ατελούς) καύσης οργανικών υλικών. Οξειδώνεται σταδιακά σε CO_2και έτσι θεωρείται πρόδρομος αερίου θερμοκηπίου. Κατά κύριο λόγο παράγεται κατά την ατελή καύση, όταν υπάρχει έλλειψη οξυγόνου, όταν το καύσιμο καίγεται δύσκολα (π.χ. λιγνίτης) ή όταν η καύση είναι πολύ γρήγορη[40].Η κύρια πηγή παραγωγής COείναι η οδική κυκλοφορία (και σχεδόν αποκλειστικά τα βενζινοκίνητα οχήματα). Όπως φαίνεται στην Εικ. 4.2, σε σχέση με το CO_2, οι εκπομπές COείναι ελάχιστες.

Το μεθάνιο (CH_4) είναι και αυτό αέριο του θερμοκηπίου το οποίο εκπέμπεται κυρίως κατά την παραγωγή και τη μεταφορά άνθρακα, φυσικού αερίου και πετρελαίου[41]. Στην Εικ. 4.3 συνοψίζονται οι αντίστοιχοι υπολογισμοί για τις εκπομπές μεθανίου ανά χώρα.

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) δηλαδή το άθροισμα μονοξειδίου και διοξειδίου του αζώτου. Συγκριτικά με τα SO_x, τα NO_x θεωρούνται ένας μικρότερος αλλά σημαντικός συντελεστής όξινων αποθέσεων. Έχουν σημαντικές αρνητικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και βασική πηγή τους είναι οι οδικές μεταφορές. Στην Εικ. 4.4 συνοψίζονται οι αντίστοιχοι υπολογισμοί για τις εκπομπές NO_x ανά χώρα.

Στη συνέχεια στην Εικ. 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός του μεθανίου (NMVOC).

Τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται από διεργασίες καύσης είναι, συνήθως, μικροσκοπικά σωματίδια (Εικ. 4.6-4.8). Το μέγεθός τους κυμαίνεται από 0.1 έως 50μm. Η προέλευσή τους είναι, είτε από σωματίδια που συμπαρασύρονται μαζί με τα συστατικά του καυσίμου και του οξειδωτικού, είτε από τη γένεσή τους από την ίδια τη διεργασία της καύσης, είτε από άκαυστα στοιχεία στερεών καυσίμων [42].

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) είναι ένας από τους κύριους ρύπους των αστικών περιοχών. Είναι αέριο, άχρωμο, με χαρακτηριστική δυσάρεστη οσμή. Κυρίως, προέρχεται από τις καύσεις, όταν

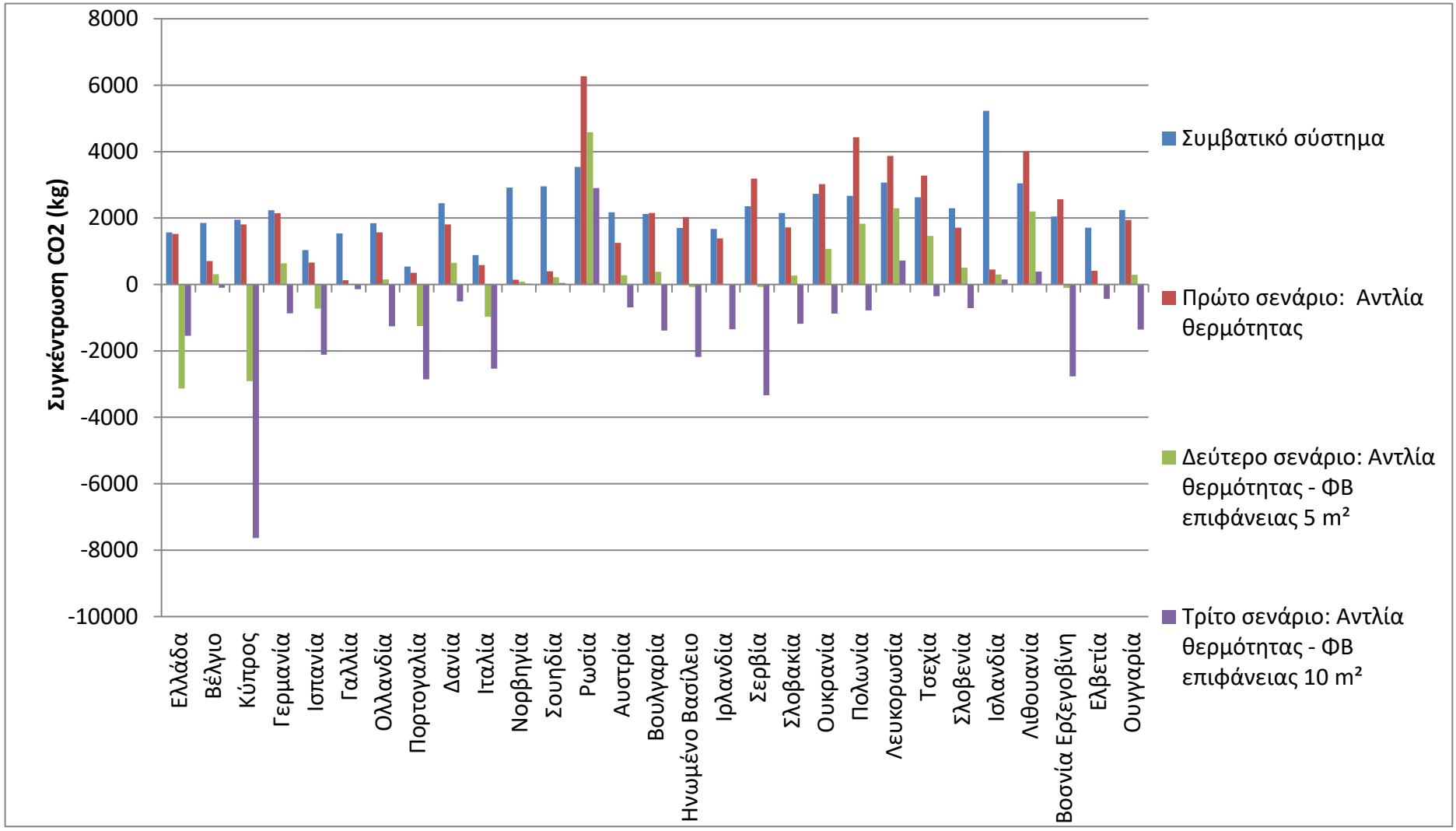
το καύσιμο (στερεό ή υγρό) περιέχει θείο και επιδρά αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, συνδυασμός SO_2 και NOx αποτελεί τον πρόδρομο εμφάνισης της όξινης βροχής.

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) είναι υπεύθυνες για το φωτοχημικό νέφος και για την καταστροφή του στρώματος του όζοντος στην ατμόσφαιρα, ενώ κάποιες τέτοιες ενώσεις ενδέχεται να σχηματίσουν αιωρούμενα σωματίδια. Επιπροσθέτως, ορισμένες οργανικές πτητικές ουσίες απορροφούν έντονα υπέρυθρη ενέργεια και κατά αυτόν τον τρόπο συνεισφέρουν στην υπερθέρμανση του περιβάλλοντος.

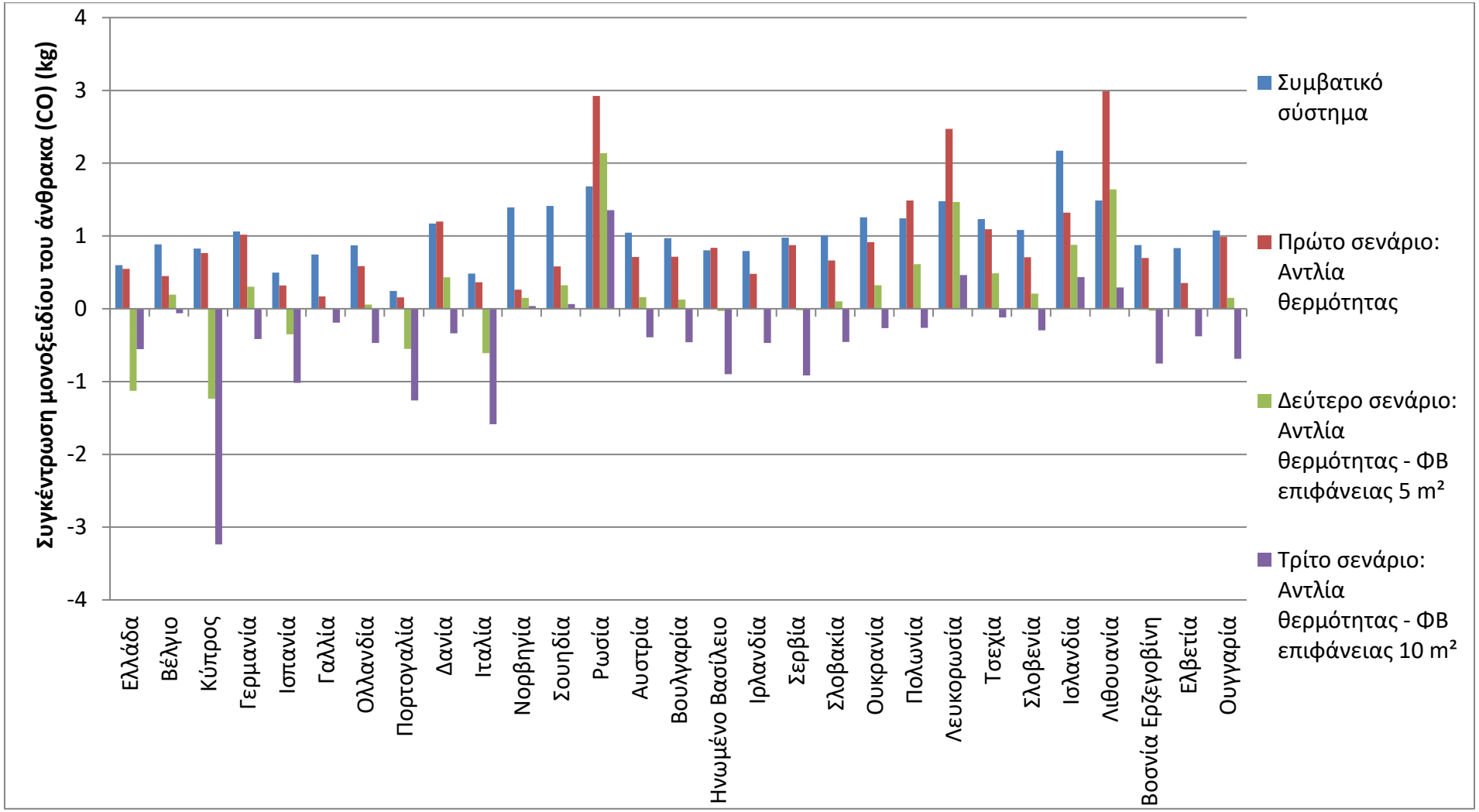
Στη συνέχεια, για κάθε χώρα πραγματοποιήθηκε κατά τον ίδιο τρόπο εξαγωγή ισοδύναμων εκπομπών ανόργανων ουσιών (kg pm2,5), kg CFC-11 που συμβάλουν στην εξάντληση της στιβάδας του όζοντος και kg CO2e που συντελούν στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις Εικ.4.11-4.13.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρούμε πως το εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης ψύξης είναι φιλικότερο περιβαλλοντικά από ότι το συμβατικό. Ακόμη φαίνεται πως όσο αυξάνεται η επιφάνεια των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών, τόσο περισσότερο μειώνονται οι εκπομπές των παραπάνω ρύπων για όλες τις χώρες. Όσον αφορά το μεθάνιο, για την περίπτωση της Γερμανίας, η εγκατάσταση και λειτουργία μόνο της αντλίας θερμότητας χωρίς τα ΦΒ, έχει ως συνέπεια την αύξηση της συγκέντρωσης του ρύπου στην ατμόσφαιρα, γεγονός που καθιστά την εγκατάσταση ΦΒ απαραίτητη προκειμένου να μειωθεί όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για τα αιωρούμενα σωματίδια, ως επί το πλείστον για PM>10μm και PM<2.5μm (εικόνες 4.7, 4.8) για σχεδόν όλες τις χώρες. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί πως στην περίπτωση των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) (Εικόνα 4.10), για τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια εγκατεστημένων ΦΒ ($10m^2$) η συγκέντρωση του ρύπου λαμβάνει υψηλές αρνητικές τιμές για τις περισσότερες χώρες, και κυρίως για την Κύπρο και την Ιταλία. Αυτό σημαίνει πως στις χώρες αυτές η περίσσεια ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά θα μπορούσε να αντικαταστήσει μέρος της ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες, οδηγώντας κατά αυτόν τον τρόπο σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του ρύπου.

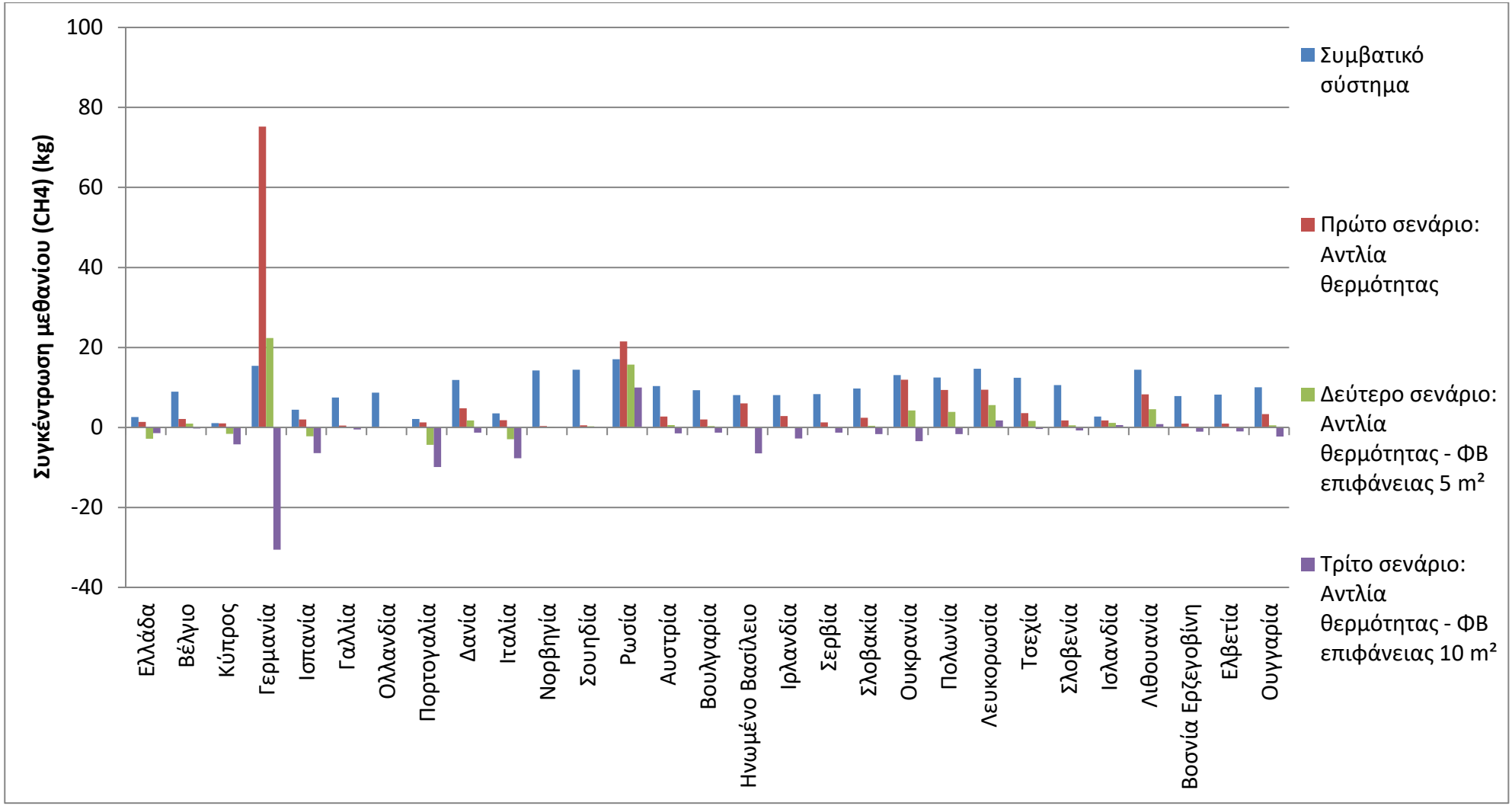
Το ανθρακικό αποτύπωμα υπολογίζει το σύνολο των εκπομπών των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου (Green House Gases – GHG) που παράγονται άμεσα ή έμμεσα κατά τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής (lifecycle) ενός προϊόντος – δηλαδή την παραγωγή, επεξεργασία, μεταφορά, πώληση, χρήση από τον καταναλωτή και απόρριψη. Στον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος λαμβάνονται υπόψιν και τα έξι αέρια του θερμοκηπίου του Πρωτοκόλλου του Κιότο: το Διοξείδιο του άνθρακα (CO2), το Μεθάνιο (CH4), το Μονοξείδιο του Αζώτου (N2O), οι Υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι Υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το Εξαφθοριούχο θείο (SF6). Για λόγους απλοποίησης, το αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών εκφράζεται σε μια μονάδα μέτρησης, το ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα (CO2e).



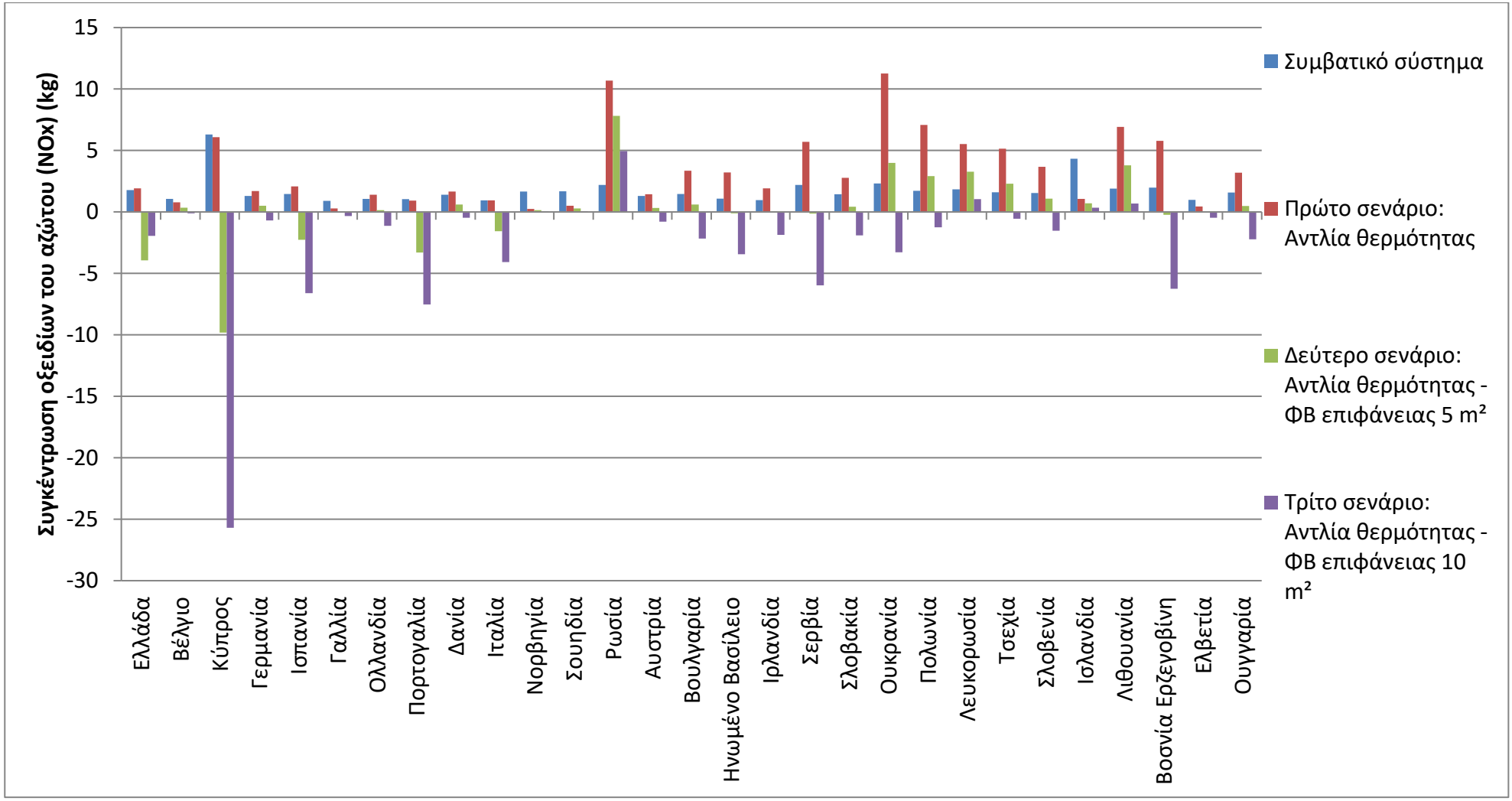
Εικ. 4.1 Ετήσια συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



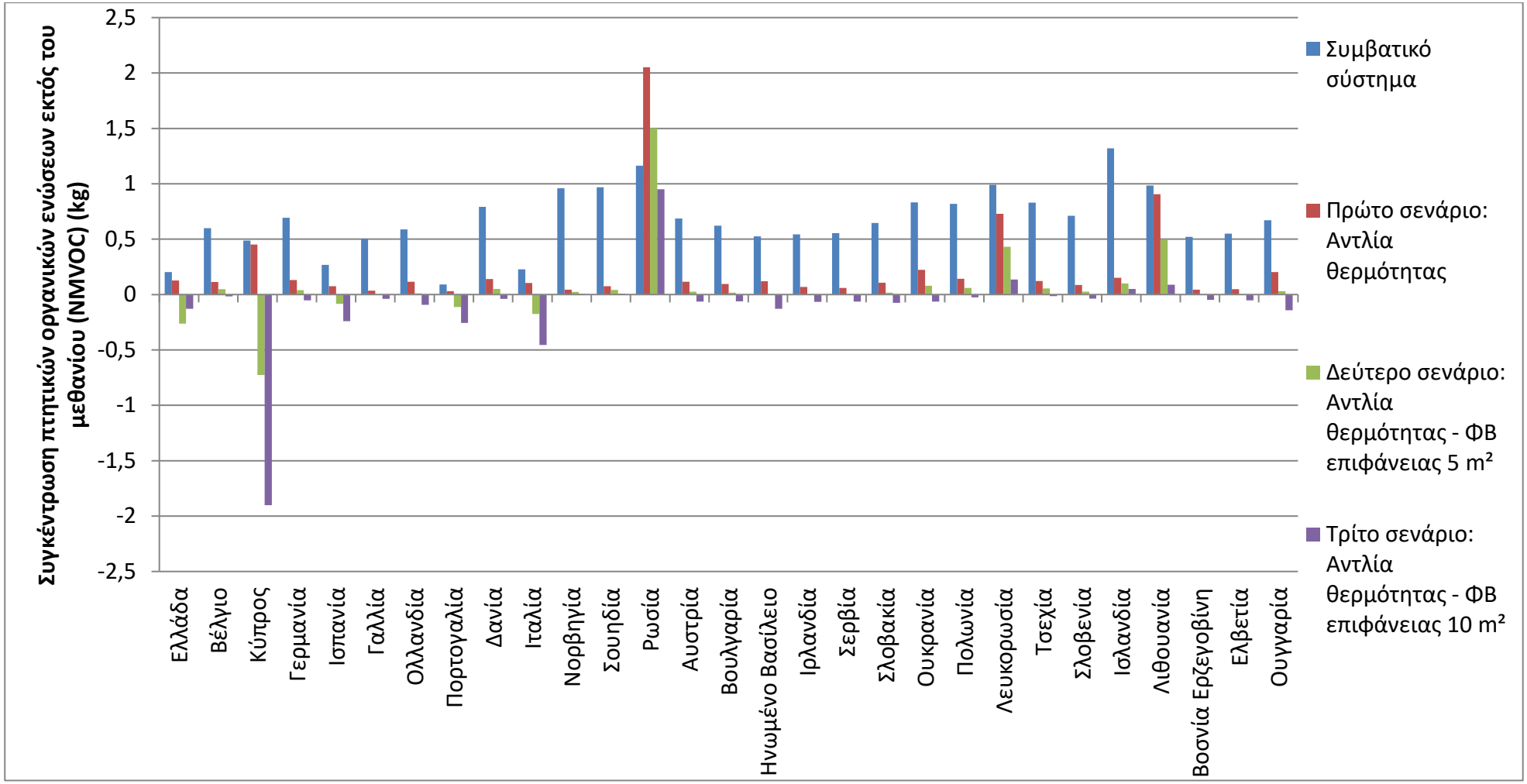
Εικ. 4.2 Ετήσια συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



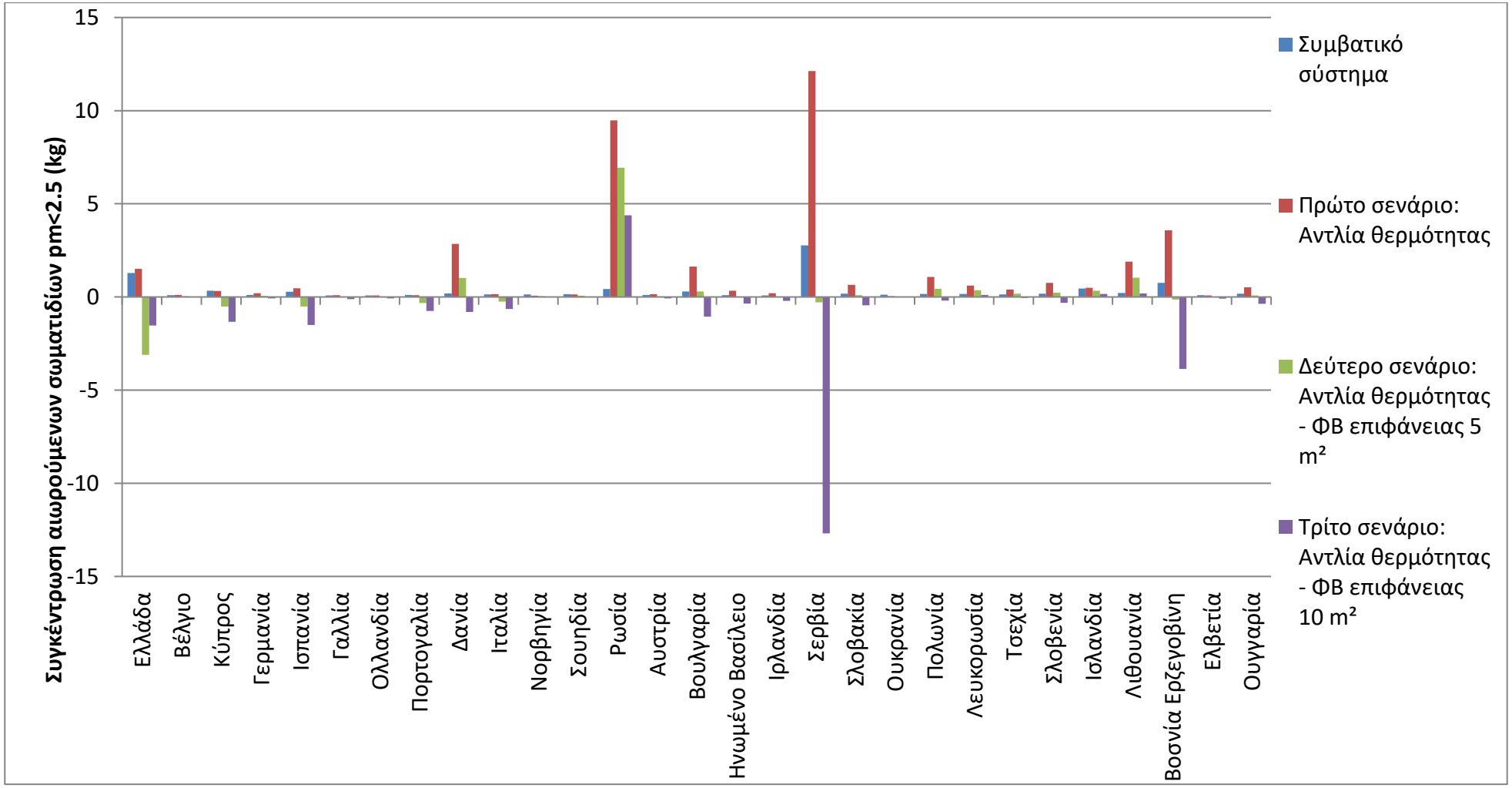
Εικ. 4.3 Ετήσια συγκέντρωση μεθανίου (CH_4) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



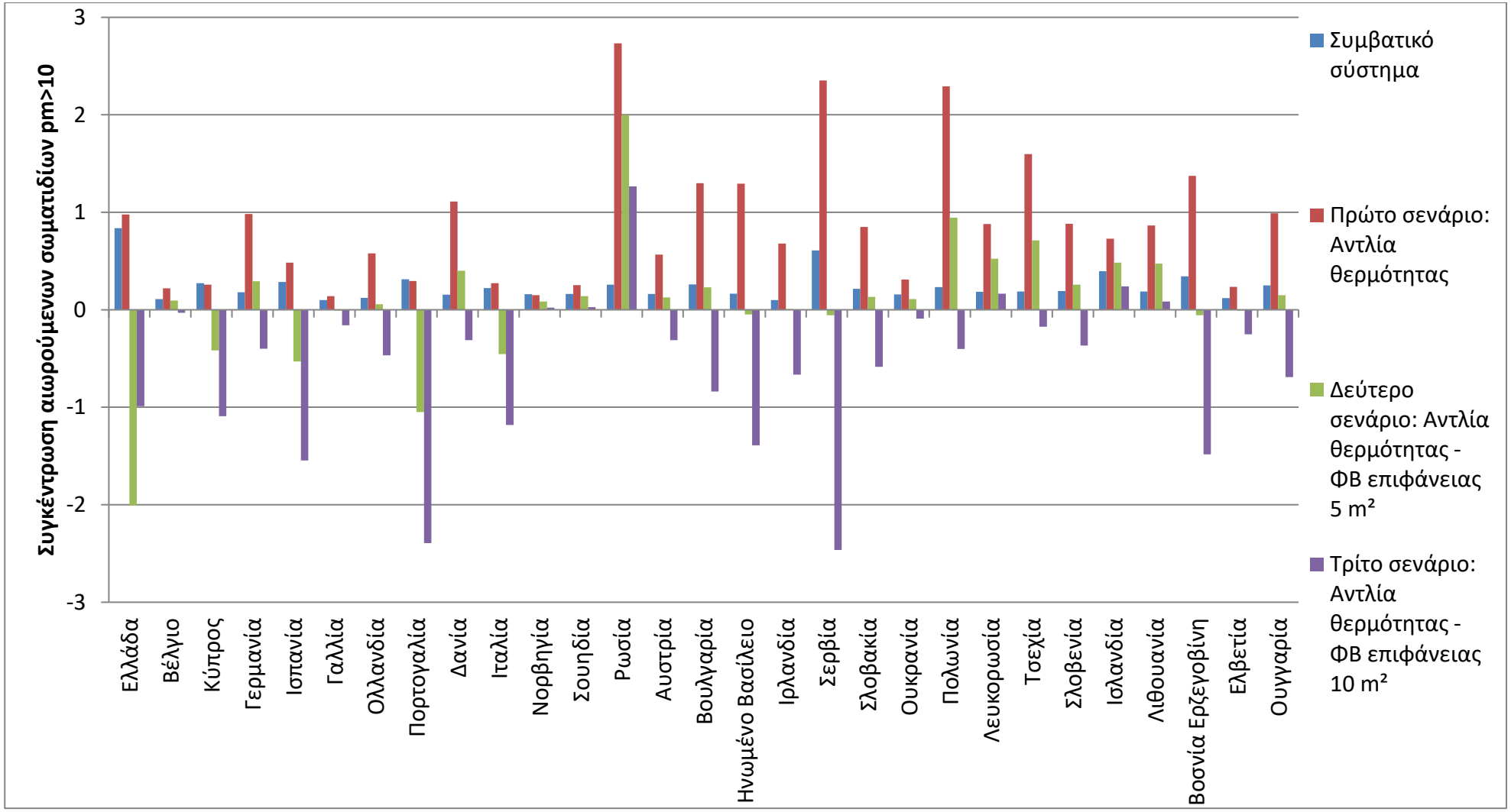
Εικ. 4.4 Ετήσια συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



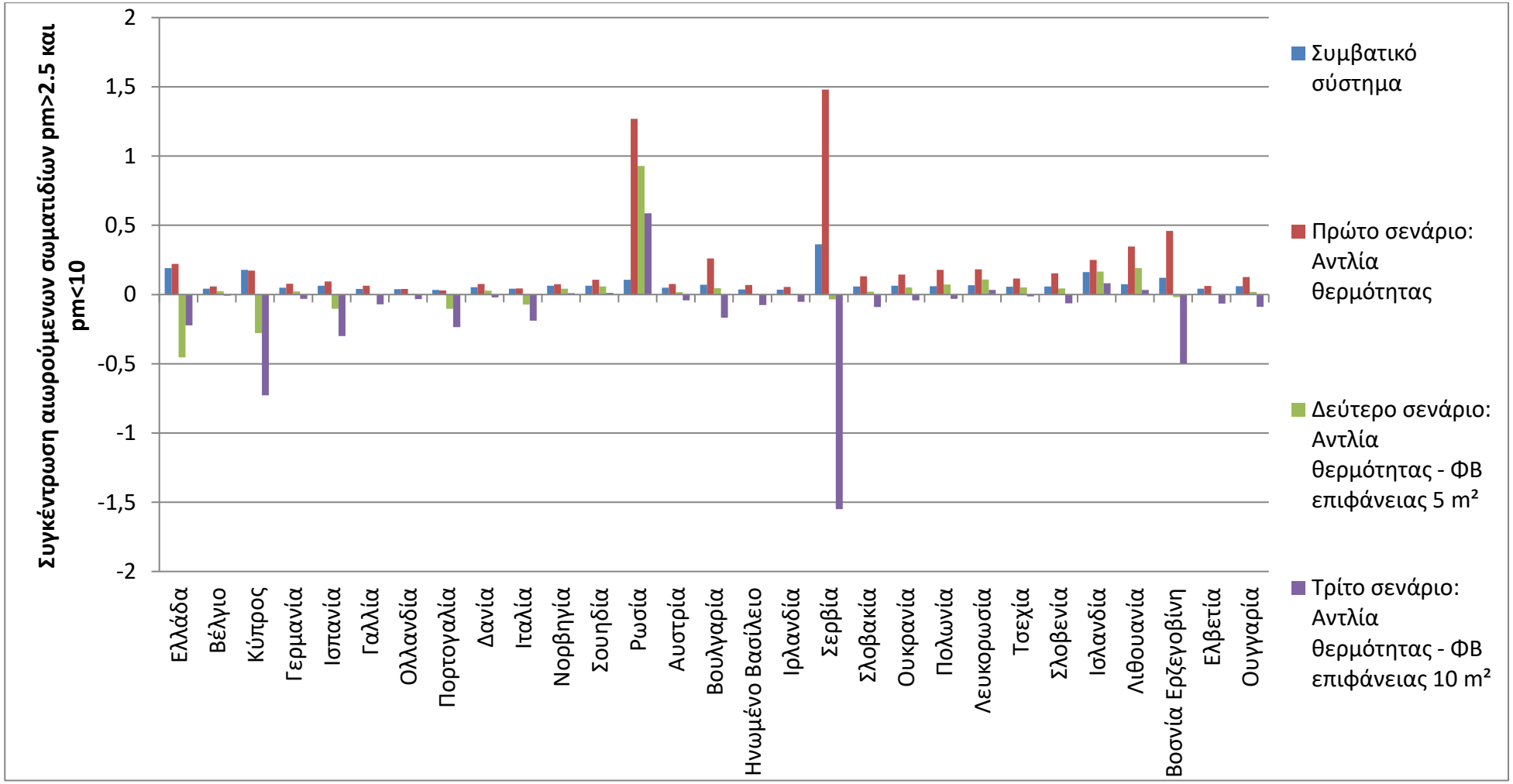
Εικ. 4.5 Ετήσια συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



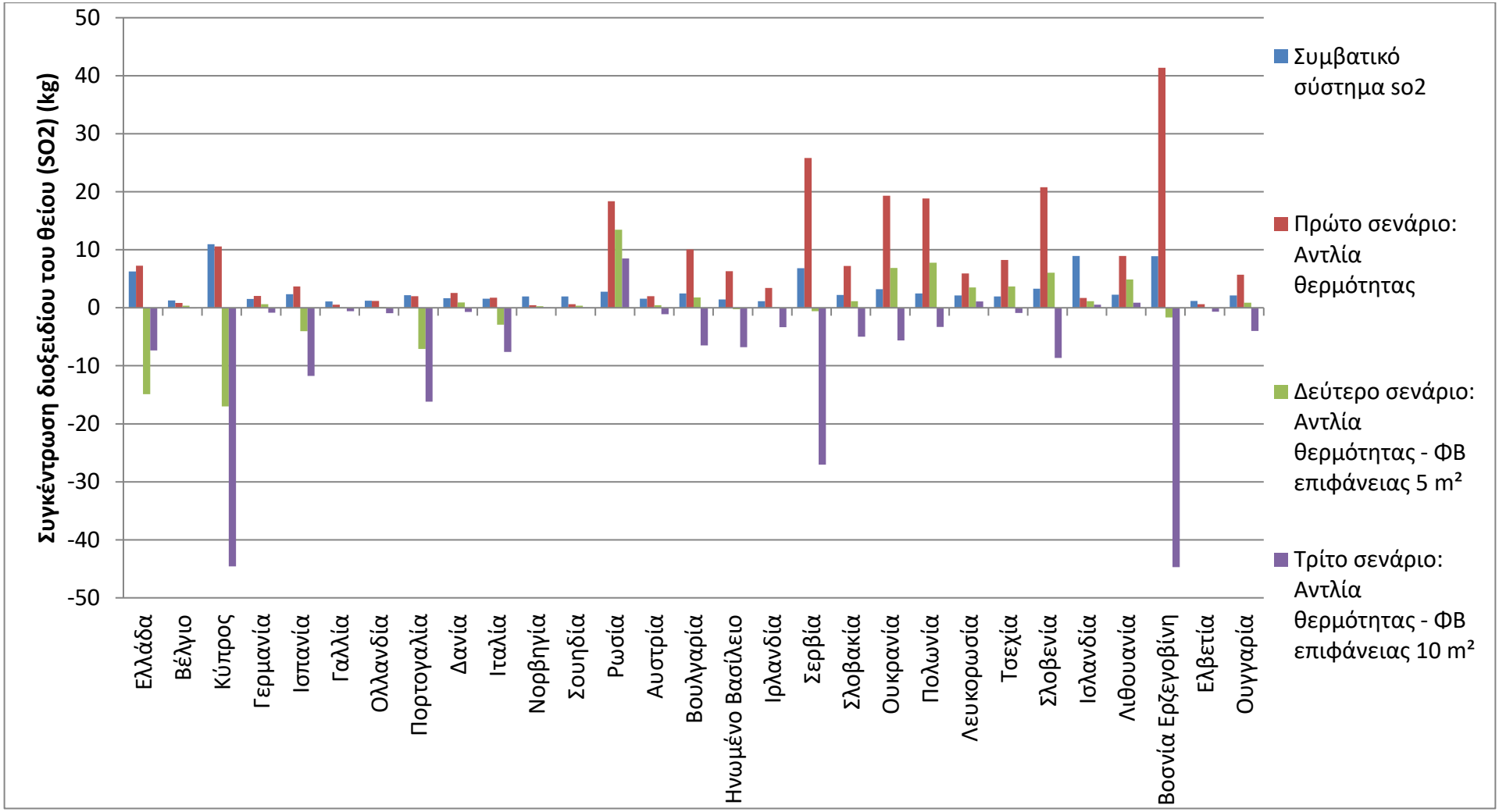
Εικ. 4.6 Ετήσια συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM<2.5μm στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



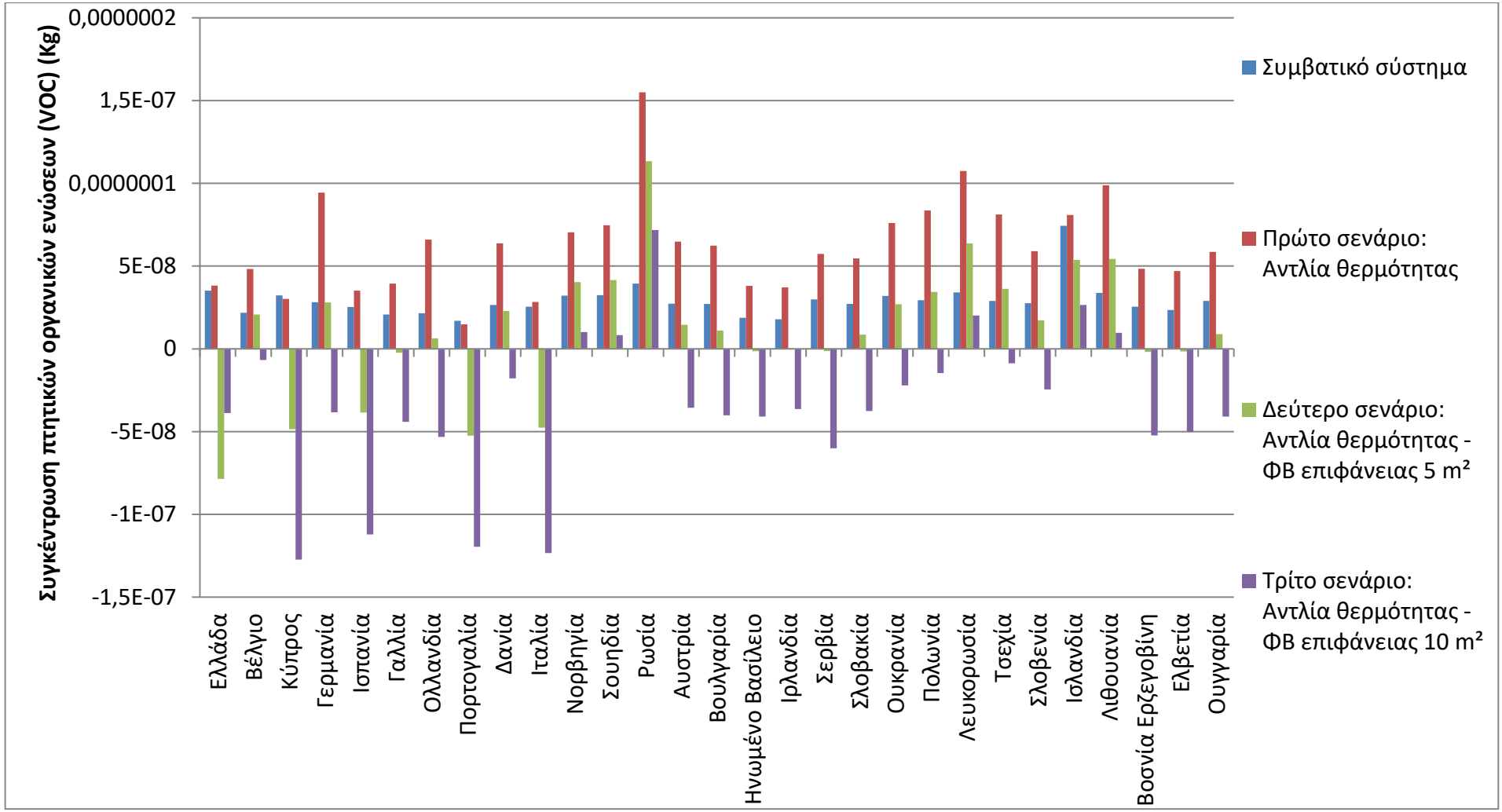
Εικ. 4.7 Ετήσια συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM>10μm στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



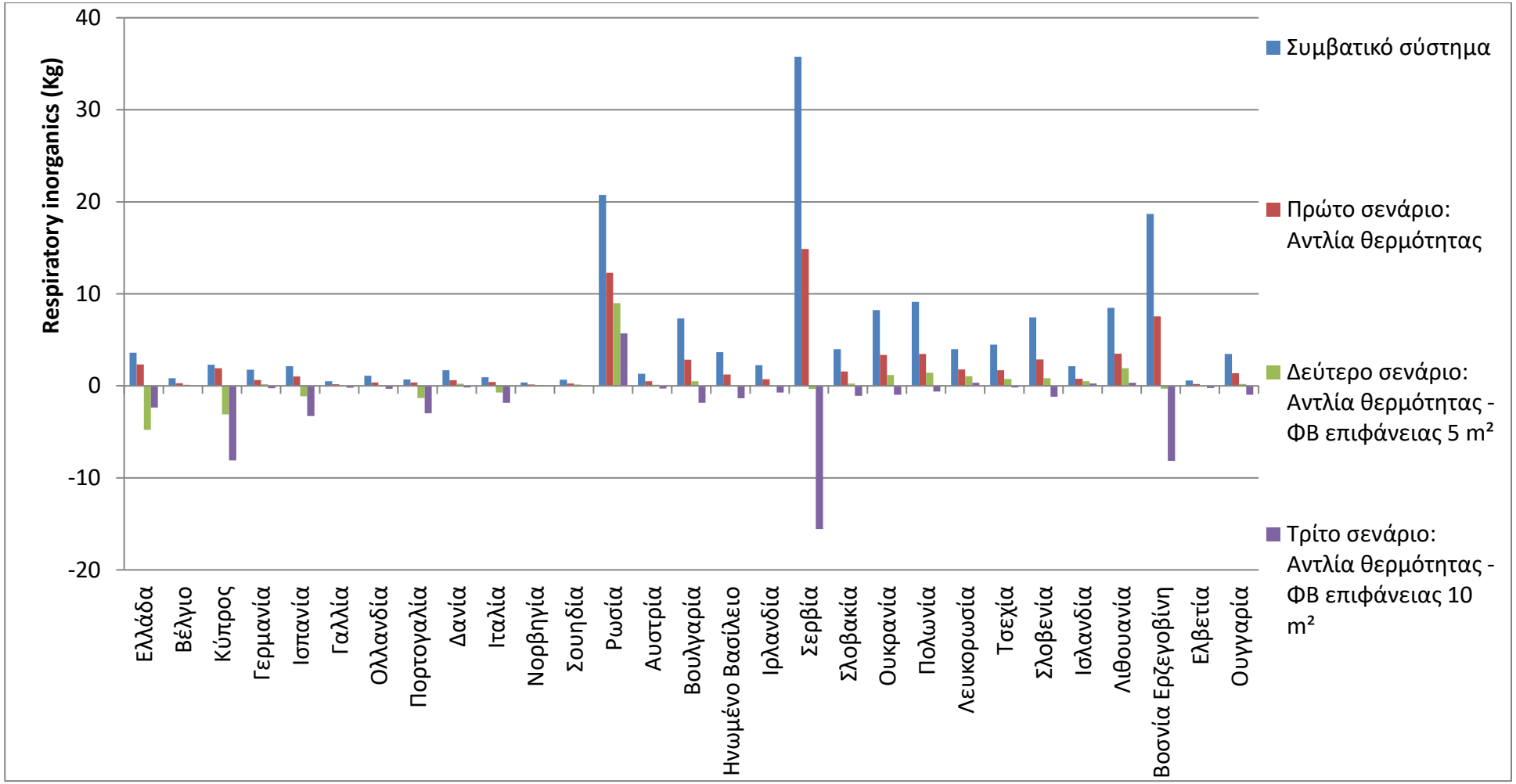
Εικ. 4.8 Ετήσια συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM>2.5μmκαι PM<10μm στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



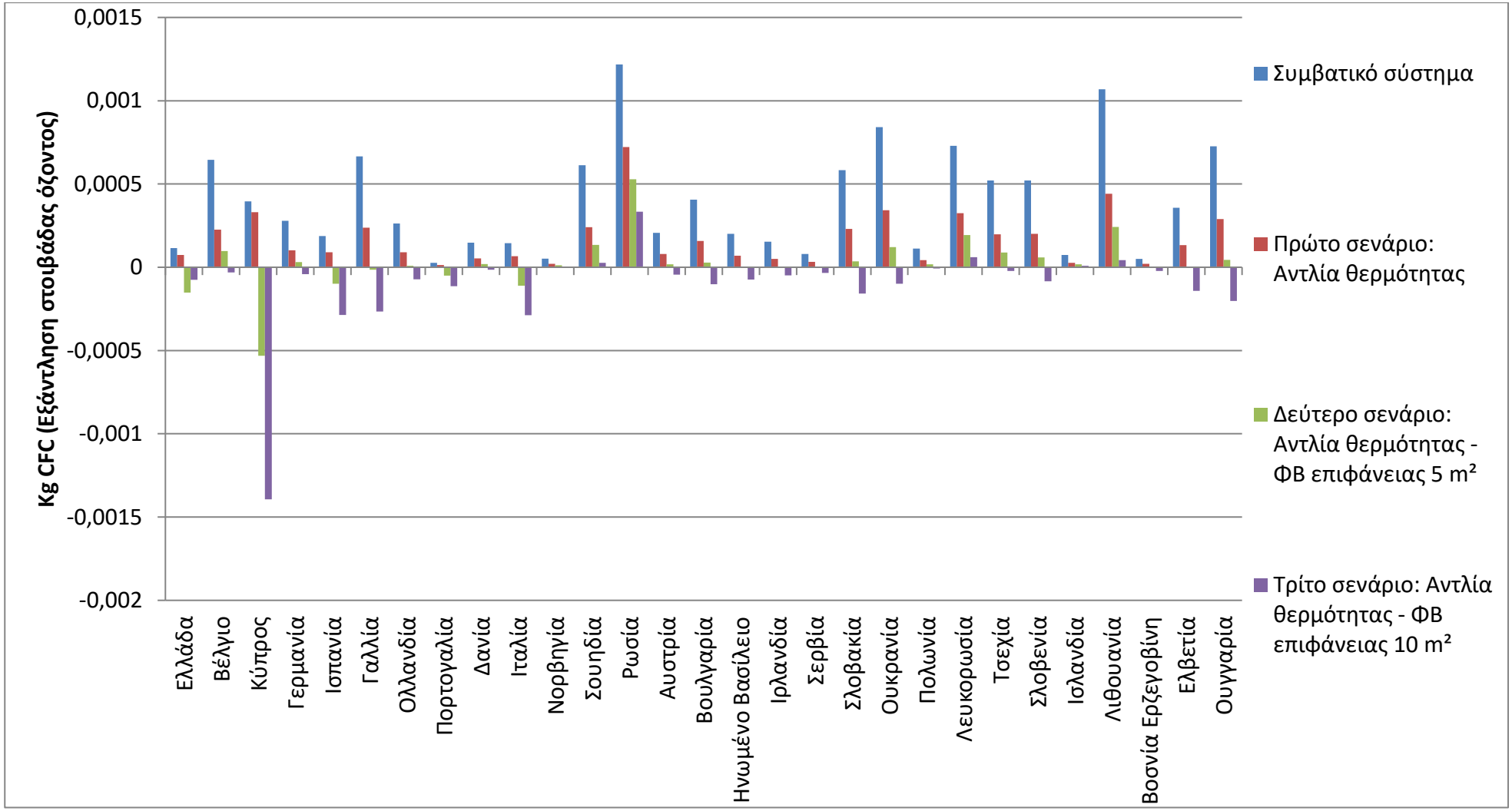
Εικ. 4.9 Ετήσια συγκέντρωση διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



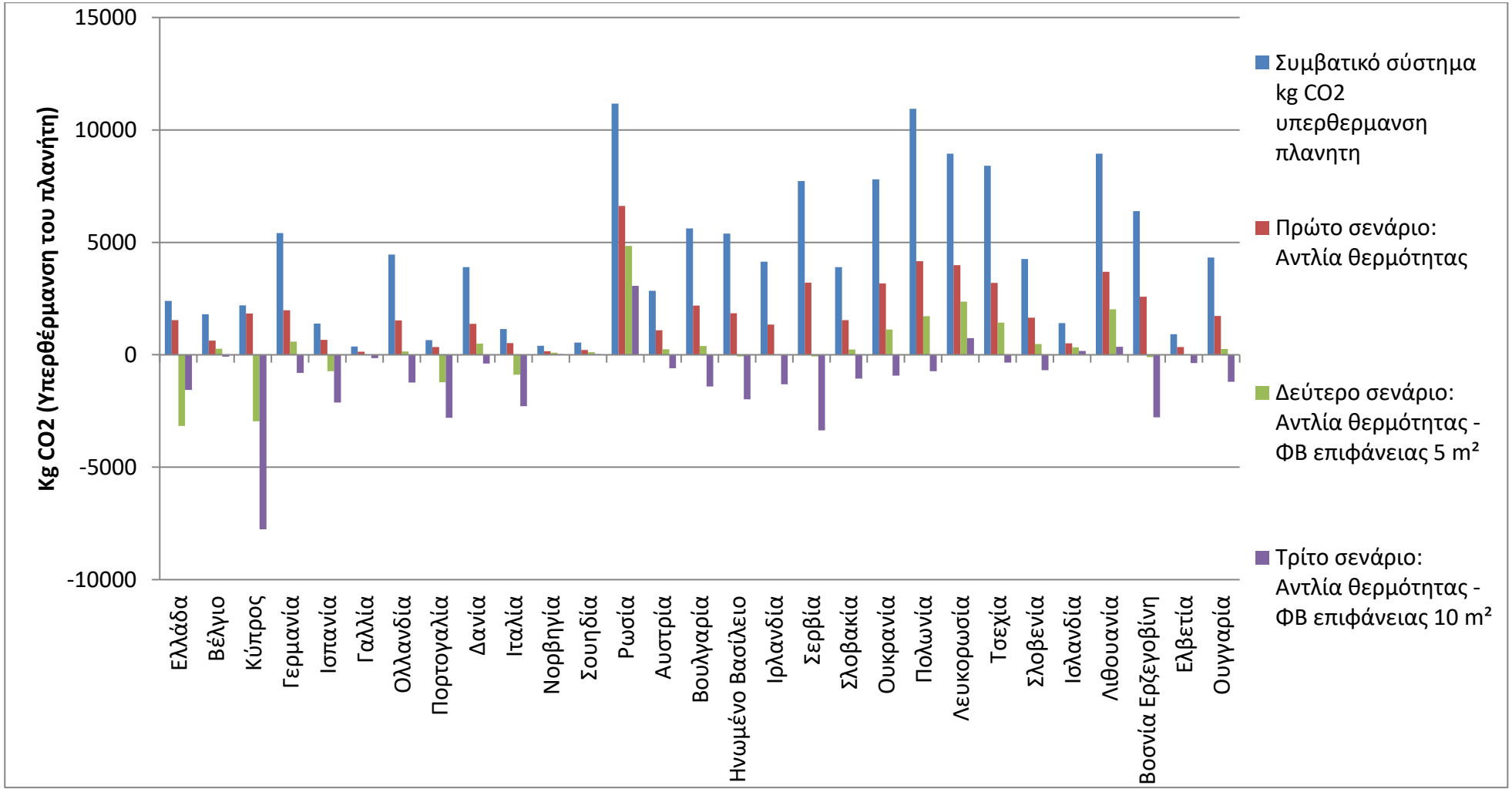
Εικ. 4.10 Ετήσια συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις



Εικ. 4.11Ετήσια συγκέντρωση ισοδύναμων εκπομπών ανόργανων ουσιών PM2.5 στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m² και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m², για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.



Εικ. 4.12 Ετήσια συγκέντρωση ισοδύναμων εκπομπών CFC-11 στην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.



Εικ. 4.13 Ετήσια συγκέντρωση ισοδύναμων εκπομπών CO_2εστην ατμόσφαιρα σε kg, για τρία διαφορετικά σενάρια: αντλία θερμότητας χωρίς φ/β, αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 5m^2 και αντλία θερμότητας με συνολική επιφάνεια φ/β 10m^2, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις.

Σύγκριση συνολικών αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία

Προκειμένου να αξιολογηθεί περαιτέρω η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται παρακάτω αντίστοιχες μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι Li Huang και Rongyue Zheng[43] πραγματοποίησαν μια μελέτη για συστήματα ηλιακής ψύξης και θέρμανσης που περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά και θερμικούς συλλέκτες αντίστοιχα για την Κίνα. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, 30,7% της πρωτογενούς ενέργειας μπορεί να εξοικονομηθεί από τη χρήση Φ/Β και 30,2% από τη χρήση θερμικών συλλεκτών συγκριτικά με ένα σύστημα που περιλαμβάνει μόνο μια ανλία θερμότητας. Για την περίπτωση των Φ/Β η περίοδος αποπληρωμής βρέθηκε ίση με 6-7 έτη, ενώ για το θερμικό σύστημα μεγαλύτερη από 20 έτη. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο υψηλό αρχικό κόστος του θερμικού συστήματος και στην ελάχιστη οικονομική υποστήριξη από την κυβέρνηση. Συνεπώς, το σύστημα που περιλαμβάνει τα Φ/Β φαίνεται να είναι πιο κατάλληλο για την Κίνα στην παρούσα φάση.

Οι Stefano Poppi κ.α.[44] μεταξύ άλλων, μελέτησαν ένα σύστημα Φ/Β – αντλίας θερμότητας και προέκυψε ότι ο χρόνος αποπληρωμής μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και ανάλογα με τις βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης. Πιο συγκεκριμένα, η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερη των 30 ετών στα βόρεια κλίματα (ηλιακή ακτινοβολία 850-1200 kWh / m^2 ανά έτος βαθμοημερών άνω των 3000), ενώ είναι μικρότερη από 21 έτη στα νότια κλίματα (ηλιακή ακτινοβολία άνω των 1500 kWh / m^2 ανά έτος και βαθμοημέρες λιγότερες από 700).

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα- Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα σύστημα θέρμανσης ψύξης που αποτελείται από μια αντλία θερμότητας και φωτοβολταϊκά, με κτήριο αναφοράς μια κατοικία, για διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις. Πιο συγκεκριμένα, αξιολογήθηκε η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος σε σχέση με ένα υπάρχον συμβατικό σύστημα θέρμανσης ψύξης αποτελούμενο από έναν λέβητα φυσικού αερίου (πετρελαίου για κάποιες πόλεις), και ένα κλιματιστικό. Η παραπάνω μελέτη διεξήχθη με βάση τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ορισμένους ενεργειακούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται παρακάτω:

- Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος για όλες τις πόλεις είναι σχετικά χαμηλός. Ωστόσο, αυτό δικαιολογείται από τον ορισμό της ηλιακής εξέργειας, καθώς τελικά ένα μικρό τμήμα της ηλιακής ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Έτσι μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης εμφανίζουν οι πόλεις στις οποίες έχουμε την ελάχιστη συμβολή των φωτοβολταϊκών με την μέγιστη τιμή (6.2%) να αντιστοιχεί στο Ρέικιαβικ.
- Όπως αναμενόταν, η ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι περισσότερη στις πόλεις της νότιας Ευρώπης, με την μεγαλύτερη τιμή να αντιστοιχεί στη Λάρνακα (18,5MWh/έτος). Αυτό οφείλεται στην υψηλή ετήσια μέση ηλιακή ακτινοβολία στις νότιες Ευρωπαϊκές χώρες, παρά τις υψηλές θερμοκρασίες των περιοχών αυτών που τείνουν να μειώσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών.
- Για τη Μόσχα και το Μινσκ, η εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος αποτελεί μια αμφίβολη επένδυση όπως αναμέναμε καθώς η Ρωσία είναι ο μεγαλύτερος προμηθευτής φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Επομένως, πρόκειται για μια χώρα στην οποία η κατανάλωση φυσικού αερίου συμφέρει ιδιαίτερα.
- Για το Ρέικιαβικ, το ήδη υπάρχον σύστημα είναι ένας λέβητας πετρελαίου. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου είναι μικρότερη από 5 έτη για όλες τις επιφάνειες φωτοβολταϊκών. Αυτό συμβαίνει διότι η αντλία θερμότητας λειτουργεί κατά κύριο λόγο για θέρμανση στο Ρέικιαβικ, με αποτέλεσμα υψηλότερη αποδοτικότητα και χαμηλότερα λειτουργικά κόστη. Ωστόσο, η ήπια αύξηση στην περίοδο αποπληρωμής κεφαλαίου οφείλεται στη χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία που έχει ως συνέπεια τη χαμηλή απόδοση των φωτοβολταϊκών.
- Η επένδυση δεν συμφέρει σε καμία περίπτωση για το Κίεβο, δεδομένου πως στην Ουκρανία, η τιμή του φυσικού αερίου είναι ιδιαίτερα χαμηλή (0,0209 €/KWh).
- Τέλος, όσον αφορά τους εκπεμπόμενους ρύπους, αποδεικνύεται ότι το εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης/ ψύξης είναι φιλικότερο προς το περιβάλλον. Εξειδικεύοντας, για όλες τις πόλεις παρατηρείται σημαντική ελάττωση των ρύπων και ιδιαίτερα στην περίπτωση του τρίτου εξεταζόμενου σεναρίου με τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών ($10m^2$), η συγκέντρωση των περισσότερων εκπεμπόμενων ρύπων για την πλειοψηφία των χωρών λαμβάνει αρνητικές τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση αυτή η ενέργεια που παράγουν τα φ/β είναι περισσότερη από αυτήν που απαιτεί η αντλία θερμότητας για να λειτουργήσει. Η περίσσεια ενέργεια

διοχετεύεται στο δίκτυο και θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να αντικαταστήσει μέρος της ενέργειας που παράγεται από συμβατικές μονάδες και επομένως να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Εν κατακλείδι, τα ενεργειακά και οικονομικά κέρδη από το υπό εξέταση σύστημα είναι υψηλότερα στη νότια Ευρώπη χάρη στην υψηλή ετήσια μέση ηλιακή ακτινοβολία και το σχετικά υψηλό κόστος αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας.

Προκειμένου να επεκταθεί η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνονται τα εξής θέματα προς μελέτη:

- Εξέταση ενός συστήματος ηλιακής ψύξης/ θέρμανσης με προσρόφηση και απορρόφηση για τις ίδιες Ευρωπαϊκές πόλεις που επιλέχθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη, με απώτερο σκοπό τη μετέπειτα σύγκριση των εκάστοτε συστημάτων.
- Τοποθέτηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνδυαστικά με τα φωτοβολταϊκά και την αντλία θερμότητας προκειμένου να μελετηθεί αν η προσθήκη αυτού καθιστά την επένδυση ακόμα πιο ανταγωνιστική ή αντιθέτως μη συμφέρουσα λόγω του αυξημένου κόστους.
- Εξέταση του υπό μελέτη συστήματος για διαφορετικές πόλεις ανά τον κόσμο, προκειμένου να ερευνηθεί εκτενέστερα πως τα διαφορετικά κλίματα επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

Βιβλιογραφία

1. (ΙΤΕΣΚ), Ι.Τ.Ε.Σ.Κ. *Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*. Available from: http://www.allaboutenergy.gr/Piges22.html.

2. Sthitapragyan Mohanty, P.K.P., Sudhansu S. Sahoo, Asit Mohanty, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*

2017, ScienceDirect.

3. Α. Αργυρίου, Μ.Γ., *Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Φυσική*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Αρακυνθος.

4. European Commission, E., *Energy*.

5. Eurostat. *Energy production and imports*. 2018; Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports#Production_of_primary_energy_decreased_between_2006_and_2016.

6. Commission, E. *Energy 2020 strategy for competitive, sustainable and secure energy.*; Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0024.

7. Commission, E. *2030 Energy Strategy*. 2019; Available from: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy.

8. Commission, E. *2050 Energy Strategy*. 2019; Available from: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2050-energy-strategy.

9. Kalogirou, S.A. *Solar Energy Engineering*. 2009.

10. Dimroth, D.F.; Available from: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html.

11. Α. Μπαλαρας, Α.Α., Φ. Καραγιάννης, *Συμβατικές και ήπιες μορφές ενέργειας.* 2006.

12. Europe, S.P. *Global Market Outlook for Solar Power / 2018 - 2022*. Available from: http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/09/Global-Market-Outlook-2018-2022.pdf.

13. *ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. Available from: http://www.cres.gr/kape/present/present.htm.

14. Wang, L., X. Bu, and W. Ma, *Experimental study of an Adsorption Refrigeration Test Unit.* Energy Procedia, 2018. **152**: p. 895-903.

15. Eurostat. *Energy consumption and use by households*. 2018; Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180322-1?inheritRedirect=true.

16. Katsaprakakis, D. and M. Moniakis, *Ψύξη και συστήματα διανομής ψύξης*. 2015, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε., ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ.

17. ΙΑΤΡΙΔΗΣ, Μ., *Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας στη βιομηχανική ψύξη*. 1996: ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

18. ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΑΣ, Μ., *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ*. 2008, ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ ΕΒΗΕ.

19. ΧΑΡΙΤΩΝΙΔΗΣ, Ν. *Ψύξη με αμμωνία*. Available from: http://www.cryologic.gr/library/downloads/Docs/Documents/%CE%A8%CE%A5%CE%9E%CE%97%20%CE%9C%CE%95%20%CE%91%CE%9C%CE%9C%CE%A9%CE%9D%CE%99%CE%91.pdf.

20. Κακαράς, Ε., Καρέλλας, Σ., *Αποκεντρωμένα Συστήματα* 2016.

21. *Προσρόφηση*.

22. Najeh, G., et al., *Performance of silica gel-water solar adsorption cooling system.* Case Studies in Thermal Engineering, 2016. **8**: p. 337-345.

23. Chen, G., et al., *Performance analysis of a two-stage mechanical compression–ejector cooling cycle intended for micro-trigeneration system.* International Journal of Refrigeration, 2017. **81**: p. 33-40.

24. Halozan, H., *The Role of Heat Pumps in Renewable Heating and Cooling*, in *12th IEA heat pump conference*. 2017: Ρότερνταμ.

25. *Energy consumption in households*. 2018; Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#cite_note-1.

26. Eurostat. *Share of final energy consumption in the residential sector by type of end-use*. 2016; Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Share_of_final_energy_consumption_in_the_residential_sector_by_type_of_end-use,_2016_(%25).png.

27. Huang, L., Zheng,.R, *Energy and Economic Performance of Solar Cooling Systems in the Hot-Summer and Cold-Winter Zone*. 2018, Faculty of Architecture, Civil Engineering College, Ningbo University, China.

28. Carrier, *Reversible Air to Water Heat Pump:30AW*. 2013.

29. EnergyPlus Development Team, *EnergyPlus engineering reference: The reference to EnergyPlus calculations. EnergyPlus Version 8.8.*, U.D.o. Energy, Editor. 2017.

30. EN ISO, *6946: 2017 "Building Components and Building Elements*. 2017.

31. Bellia, H., R. Youcef, and M. Fatima, *A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB.* NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2014. **3**(1): p. 53-61.

32. Faiman, D., *Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008. **16**(4): p. 307-315.

33. Barykina, E. and A. Hammer, *Modeling of photovoltaic module temperature using Faiman model: Sensitivity analysis for different climates.* Solar Energy, 2017. **146**: p. 401-416.

34. Mitsubishi Electric & Electronics USA Inc, *MLU Series Photovoltaic Module*. 2018.

35. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Κ.Α.Π.Κ.Ε. *ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ*. 2009.

36. Foster, R., M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy : renewable energy and the environment*. 2010, CRC Press: Boca Raton :.

37. Roumpedakis, T., *Techno-economic investigations of a solar driven ORC-sorption system for combined cooling, heating and power*. 2018, TU Delft.

38. Gazprom. *Gas marketing in Europe*. 2019; Available from: https://www.gazprom.com/about/marketing/europe/.

39. Agency, E.E. *Total greenhouse gas emission trends and projections*. 2018.

40. Τσιλιγκιρίδης, Γ., *Πηγές ρύπανσης*. 2015: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ -ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

41. (EPA), U.S.E.P.A. *Greenhouse Gas Emissions*. Available from: https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases.

42. *Επίπτωση των Διεργασιών Καύσης στο Περιβάλλον –*

Εκπομπή Ρύπων. Κάλλιπος.

43. Zheng, L.H.a.R., *Energy and Economic Performance of Solar Cooling*

Systems in the Hot-Summer and Cold-Winter Zone. 2018.

44. Stefano Poppi, N.S., Chris Bales, Hatef Madani, Per Lundqvist, *Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications*.