



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καινοτόμου
Συστήματος Ηλιακής Ψύξης με Προσρόφηση*

Του Φοιτητή

Κάλλη Γεωργίου

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός συστήματος ψύξης με προσρόφηση τροφοδοτούμενο από ηλιακούς συλλέκτες κενού. Η μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού SimaPro περιελάμβανε την κατά το δυνατόν αναλυτική καταγραφή των πρώτων υλών, των διαδικασιών επεξεργασίας αυτών, των μεταφορών, των καταναλώσεων (πρώτων υλών και ενέργειας) και των διεργασιών που συνδέονται με τη διαχείριση των αποβλήτων στο τέλος ζωής του συστήματος, με σκοπό την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για την πόλη της Αθήνας. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου ReCiPe 2016. Παρατηρήθηκε ότι το σύστημα υπερτερεί σε δείκτες όπως αυτός της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της εξάντλησης του όζοντος αλλά υστερεί σε άλλους όπως σχετικά με την οικοτοξικότητα των οικοσυστημάτων και την εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων. Στα βασικά συμπεράσματα της ανάλυσης προέκυψε η σημαντική αρνητική συνεισφορά της εκτεταμένης χρήσης χαλκού στο εν γένει σύστημα.

Επιπρόσθετα, το σύστημα αξιολογήθηκε και για μια σειρά από μελέτες περιπτώσεων. Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της διάταξης που έχει η αλλαγή των διεργασιών που σχετίζονται με το τέλος ζωής της διάταξης. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε “endpoint” ήταν μικρότερες του 5%. Επιπλέον, μελετήθηκε το σενάριο εγκατάστασης του συστήματος σε τέσσερις πόλεις της νότιας Ευρώπης (Λάρνακα, Νάπολη, Μαδρίτη και Λισαβόνα). Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η περίπτωση της Λάρνακας εμφάνιζε το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος. Τέλος, εξετάστηκε το σενάριο μεταβολής της επιφάνειας του ηλιακού πεδίου. Ενδεικτικά, για την υπερθέρμανση του πλανήτη παρατηρήθηκε μειωμένη περιβαλλοντική επίπτωση κατά 51%, 45% και 27% ως προς τη συμβατική αντλία θερμότητας για επιφάνεια συλλεκτών ίση με 40 30 και 15 m² αντίστοιχα.

Abstract

In the current thesis a life cycle was conducted for a solar driven adsorption chiller. The study carried out, using SimaPro software, included the detailed listing of the raw materials, their transformation processes, the involved transportations, the consumptions and all the processes relevant to the waste management in order to assess the environmental impact of the considered system in respect to a conventional heat pump installed in Athens. The analysis was conducted using ReCiPe 2016 method. The results indicated that the system advantages in terms of global warming and ozone depletion but is worse in performance in respect to the ecotoxicity and minerals consumption. Among the main conclusions of the study is the malevolent impact of copper's use in the system's performance.

Furthermore, the system was evaluated for a number of case studies. The first part of the case studies involved the investigation of the different end use policies for the system. The differences that were observed using both a midpoint level and an endpoint level analysis were smaller than 5%. Moreover, the system was assessed for use in four different cities in Southern Europe (namely Larnaca, Napoli, Madrid and Lisbon). Key conclusion of the aforementioned investigation was that the biggest environmental profit was recorded in the case of Larnaca. Finally, an investigation towards the influence of the solar field's area was conducted. The results indicated that higher areas resulted in better results. For instance, in terms of global warming a reduction of 51%, 45% and 27% was reported in respect to the reference heat pump for a solar field surface of 40, 30 and 15 m², respectively.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα, ο οποίος με εμπιστεύθηκε και μου την ανέθεσε, δίνοντάς μου την ευκαιρία να εργαστώ σε αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης και συγγραφής της εργασίας, καθώς και την υποψήφια διδάκτορα Δέσποινα Μαγκίρη – Σκουλούδη, για τις χρήσιμες συμβουλές της, χωρίς τις οποίες δε θα ήταν δυνατή η διεκπεραίωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθιές μου ευχαριστίες στην οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	ii
Πρόλογος.....	iii
Περιεχόμενα.....	iv
Περιεχόμενα Σχημάτων.....	vi
Περιεχόμενα Πινάκων.....	ix
Πίνακας Συμβόλων.....	xi
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1. Τεχνολογίες Ψύξης.....	1
1.1.1 Ο Ψυκτικός Κύκλος Μηχανικής Συμπύεσης.....	1
1.1.2 Ο Ψυκτικός Κύκλος Προσρόφησης.....	3
1.2. Ηλιακοί Συλλέκτες	8
1.2.1 Επίπεδοι Συλλέκτες	9
1.2.2 Συλλέκτες κενού	10
1.2.3 Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου	12
1.3. Ηλιακή ψύξη.....	14
Κεφάλαιο 2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ).....	16
2.1. Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	16
2.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	16
2.2.1 Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής της μελέτης.....	17
2.2.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα.....	18
2.2.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	19
2.2.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος ..	20
2.3. Βάσεις δεδομένων και λογισμικά	21
2.4. Η μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe 2016.....	22
Κεφάλαιο 3. Περιγραφή της εγκατάστασης.....	27
3.1. Εισαγωγή.....	27
3.2. Αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης	27
3.3. Ψύκτης προσρόφησης.....	28
3.4. Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.....	30
3.5. Ηλιακοί συλλέκτες κενού	31
3.6. Βοηθητική αντλία θερμότητας.....	32
3.7. Ξηρός πύργος ψύξης	33
Κεφάλαιο 4. AKZ για το εξεταζόμενο σύστημα.....	35

4.1.	Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης.....	35
4.1.1	Στόχος της μελέτης	35
4.1.2	Πεδίο Εφαρμογής της μελέτης	35
4.2.	Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα.....	38
4.2.1	Εξαγωγή πρώτων υλών/Κατασκευή.....	39
4.2.2	Μεταφορά.....	43
4.2.3	Φάση Χρήσης.....	44
4.2.4	Τέλος κύκλου ζωής	44
Κεφάλαιο 5.	Αποτελέσματα	46
5.1.	Αποτελέσματα για το υπό εξέταση σύστημα στην Ελλάδα	46
5.2.	Μελέτη σεναρίων.....	51
5.2.1	Σύγκριση δύο διαφορετικών σεναρίων για τη διαχείριση των αποβλήτων ...	51
5.2.2	Επίδραση της τοποθεσίας της εγκατάστασης.....	54
5.2.3	Επίδραση της αλλαγής της επιφάνειας του πεδίου των συλλεκτών	59
Κεφάλαιο 6.	Συμπεράσματα και βελτιώσεις στο σύστημα.....	62
6.1.	Συμπεράσματα	62
6.2.	Αξιοπιστία δεδομένων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	62
Παράρτημα Α.	Πίνακες εισόδου του συστήματος	64
Παράρτημα Β.	Υπολογισμός ηλεκτρικής κατανάλωσης.....	67
Παράρτημα Γ.	Πίνακες αποτελεσμάτων ΑΚΖ.....	77
Βιβλιογραφία		97

Περιεχόμενα Σχημάτων

Εικ. 1.1. Κύκλος ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών [4].....	2
Εικ. 1.2. Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών της προσρόφησης και της εκρόφησης [7]....	4
Εικ. 1.3. Σχηματική απεικόνιση ψύκτη προσρόφησης δύο θαλάμων ρόφησης	5
Εικ. 1.4. Συντελεστής συμπεριφοράς θερμικά εκκινούμενων τεχνολογιών ψύξης[20]	8
Εικ. 1.5. Σχεδιάγραμμα επίπεδου συλλέκτη [23].....	9
Εικ. 1.6 Συλλέκτης κενού [24].....	10
Εικ. 1.7 Σωλήνας κενού άμεσης ροής. α. ομοαξονικός β. τύπου “U”.....	11
Εικ. 1.8 Σωλήνας κενού με heat-ripe [26].....	12
Εικ. 1.9 Σχεδιάγραμμα συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου [27]	13
Εικ. 1.10. Σχηματικές απεικονίσεις διατάξεων ηλιακής ψύξης (α) με ηλιοθερμικούς συλλέκτες και ψύκτη απορρόφησης και (β) με Φ/Β και συμβατική αντλία θερμότητας [30] 14	
Εικ. 1.11. Τάσεις του κόστους συστημάτων ηλιακής ψύξης για διάφορες κλίμακες την περίοδο 2007-2012 [34].....	15
Εικ. 2.1 Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [35]	17
Εικ. 2.2 Επισκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας [43].....	23
Εικ. 3.1. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης.....	28
Εικ. 3.2. Κάτοψη της εγκατάστασης της διάταξης.....	28
Εικ. 3.3. Ψύκτης προσρόφησης eZea της εταιρείας Fahrenheit.	29
Εικ. 3.4. Σχηματική απεικόνιση της εσωτερικής διάταξης του ψύκτη προσρόφησης και της βοηθητικής αντλίας θερμότητας της εγκατάστασης	30
Εικ. 3.5. Απεικόνιση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας	30
Εικ. 3.6. Τμήμα του ηλιακού συλλέκτη κενού από το εργοστάσιο της εταιρείας AkoTec	31
Εικ. 3.7. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για διάφορους εμπορικούς συλλέκτες	32
Εικ. 3.8. Δοχείο διαστολής κυκλώματος συλλεκτών	32
Εικ. 3.9. Απεικόνιση της βοηθητικής αντλίας θερμότητας	33
Εικ. 3.10. Τρισδιάστατη απεικόνιση του ξηρού πύργου ψύξης με σύστημα αδιαβατικής ψύξης.....	34
Εικ. 4.1. Διάγραμμα ροής του υπό εξέταση συστήματος.....	39
Εικ. 5.1. Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint”	46

Εικ. 5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint”	47
Εικ. 5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint” .	48
Εικ. 5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” ..	49
Εικ. 5.5 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL των δύο σεναρίων για το τέλος του κύκλου ζωής αυτού σε επίπεδο “endpoint”	51
Εικ. 5.6 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL των δύο σεναρίων για το τέλος του κύκλου ζωής αυτού σε επίπεδο “midpoint”	53
Εικ. 5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Κύπρο σε επίπεδο “endpoint” ...	54
Εικ. 5.8 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ισπανία σε επίπεδο “endpoint”...	55
Εικ. 5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ιταλία σε επίπεδο “endpoint”.....	55
Εικ. 5.10 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Πορτογαλία σε επίπεδο “endpoint”	56
Εικ. 5.11 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση χώρες σε επίπεδο “endpoint”	57
Εικ. 5.12 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση χώρες σε επίπεδο “midpoint”	58
Εικ. 5.13 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τις διαφορετικές επιφάνειες συλλεκτών σε επίπεδο “endpoint”	59
Εικ. 5.14 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τις διαφορετικές επιφάνειες συλλεκτών σε επίπεδο “midpoint”	61
Εικ. Β.1 Απεικόνιση διακριτοποίησης δοχείου αποθήκευσης	68
Εικ. Β.2 Θερμική διαστρωμάτωση εντός του δοχείου αποθήκευσης θεωρώντας 20 κόμβους ($T_{col,out}=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{des,out}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{amb}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	70
Εικ. Β.3 Διάγραμμα ροής για την επίλυση του μοντέλου ZEOSOL	71
Εικ. Β.4 Καμπύλες λειτουργίας ψύκτη προσρόφησης.....	72
Εικ. Β.5 Απεικόνιση του ψυκτικού φορτίου και της θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την ψυκτική περίοδο στην Αθήνα όπως υπολογίστηκαν από το EnergyPlus.....	72
Εικ. Β.6 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για την Αθήνα.....	73
Εικ. Β.7 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Λάρνακα.....	74
Εικ. Β.8 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Νάπολη	74

<i>Εικ. Β.9 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Μαδρίτη</i>	75
<i>Εικ. Β.10 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Λισαβόνα</i>	75
<i>Εικ. Γ.1 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Κύπρο σε επίπεδο “midpoint”</i>	93
<i>Εικ. Γ.2 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ισπανία σε επίπεδο “midpoint”</i>	94
<i>Εικ. Γ.3 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ιταλία σε επίπεδο “midpoint”</i>	95
<i>Εικ. Γ.4 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Πορτογαλία σε επίπεδο “midpoint”</i>	96

Περιεχόμενα Πινάκων

Πιν. 1.1 Αποτελέσματα ανάλυσης των συστημάτων ηλιακής ψύξης [33]	15
Πιν. 3.1 Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του ψύκτη προσρόφησης eZea της εταιρείας Fahrenheit. [47]	29
Πιν. 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας	31
Πιν. 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας θερμότητας [49, 50]	33
Πιν. 3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ξηρού πύργου ψύξης.....	34
Πιν. 4.1 Σύσταση τυπικού μη κραματωμένου (unalloyed) χάλυβα [53]	39
Πιν. 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά συμπιεστή “C-SB5HP”.....	41
Πιν. 4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά συμβατικής αντλίας θερμότητας [51]	43
Πιν. A.1. Είσοδοι για τη βοηθητική αντλία θερμότητας και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent.....	64
Πιν. A.2 Είσοδοι για τη συμβατική αντλία θερμότητας και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent.....	64
Πιν. A.3 Είσοδοι για τα στοιχεία σύνδεσης των συνιστωσών της εγκατάστασης και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent.....	65
Πιν. A.4 Αποστάσεις μεταφοράς και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent.....	66
Πιν. B.1 Αποτελέσματα υπολογισμού ηλεκτρικών καταναλώσεων για όλα τα υπό εξέταση σενάρια.....	76
Πιν. Γ.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης.....	77
Πιν. Γ.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης.....	79
Πιν. Γ.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης	80
Πιν. Γ.4 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης	80
Πιν. Γ.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τα δύο σενάρια του τέλους του κύκλου ζωής του σε επίπεδο “midpoint”	81
Πιν. Γ.6 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τα δύο σενάρια του τέλους του κύκλου ζωής του σε επίπεδο “endpoint”	81
Πιν. Γ.7 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Κύπρο σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης.....	82

Πιν. Γ.8 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ισπανία σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης.....	84
Πιν. Γ.9 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ιταλία σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης	86
Πιν. Γ.10 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Πορτογαλία σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης.....	88
Πιν. Γ.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση χώρες σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης.....	90
Πιν. Γ.12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για διαφορετική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης	91
Πιν. Γ.13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για διαφορετική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης	92

Πίνακας Συμβόλων

A	Επιφάνεια	$[m^2]$
COP	Συντελεστής συμπεριφοράς	$[-]$
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
D	Διάμετρος	$[m]$
H	Ύψος	$[m]$
I	Ακτινοβολία	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
M	Μάζα	$[kg]$
\dot{m}	Παροχή μάζας	$[kg\ s^{-1}]$
n	Αριθμός στοιχείων δοχείου αποθήκευσης ενέργειας	$[-]$
\dot{Q}	Θερμότητα	$[W]$
T	Θερμοκρασία	$[K]$
t	Χρόνος	$[s]$
U_l	Συντελεστής απωλειών του δοχείου αποθήκευσης	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
V	Όγκος	$[m^3]$
<u>Ελληνικά Σύμβολα</u>		
Δt	Χρονικό διάστημα	$[s]$
η	Βαθμός απόδοσης	$[-]$
ρ	Πυκνότητα	$[kg\ m^{-3}]$
<u>Δείκτες</u>		
amb	Περιβάλλον	
col	Συλλέκτης	
des	Προσοφητής	
eg(aq)	Υδατική αιθυλική γλυκόλη	
guess	Εκτίμηση	
HT	Κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας ψύκτη	
in	Είσοδος	
LT	Κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας ψύκτη	
MT	Κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας ψύκτη	
out	Έξοδος	
sol	Σχετιζόμενα με την ηλιακή ακτινοβολία	
st	Δοχείο αποθήκευσης ενέργειας	
<u>Ακρωνύμια</u>		
AP	Δυναμικό Οξίνισης	
BCS	Κατιόντα βάσης του εδάφους	
CML	Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών του πανεπιστημίου Λέιντεν, Ολλανδία	
DALY	Αναπροσαρμοσμένα λόγω αναπηρίας έτη ζωής	
DBC	Διχλωροβενζόλιο	
ED	Ποιότητα των οικοσυστημάτων	

ETC	Συλλέκτης κενού
FPC	Επίπεδος Ηλιακός συλλέκτης
HH	Ανθρώπινη υγεία
ISO	Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης
ODS	Ουσίες που καταστρέφουν το όζον
NMVOG	Πτητικές οργανικές ενώσεις πλην μεθανίου
PM	Σωματίδια
PVC	Πολυβινυλοχλωρίδιο
RA	Διαθεσιμότητα πόρων
RIVM	Ολλανδικό Βασιλικό Ινστιτούτο για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
VCC	Ψύξη με μηχανική συμπίεση (Vapor Compression Cycle)
AKZ	Ανάλυση Κύκλου Ζωής / Life Cycle Analysis (LCA)
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την οικονομική όσο και την τεχνολογική ανάπτυξη μίας χώρας, ενώ η διαθεσιμότητα και κατανάλωση αυτής, αποτελεί σημαντικό δείκτη του βιοτικού επιπέδου της εκάστοτε χώρας. Η παγκόσμια απαίτηση ενέργειας εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 30% από σήμερα έως το 2040 [1], κυρίως ως συνέπεια της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης των αναπτυσσόμενων χωρών, όπως η Κίνα. Το μεγαλύτερο μέρος της καταναλισκόμενης ενέργειας παγκοσμίως προέρχεται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, με το πετρέλαιο να παραμένει η πρωτεύουσα ενεργειακή πηγή [2]. Ωστόσο, η ραγδαία εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων καθώς και τα περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω των εκπομπών ρύπων, με κυριότερα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την όξινη βροχή και την τρύπα του όζοντος, οδηγούν στην ανάγκη στροφής προς «πράσινες» μορφές ενέργειας.

Η ψύξη αποτελεί μία από τις βασικές κατηγορίες κατανάλωσης ενέργειας καθώς χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών. Μία από τις πιο γνωστές, αποτελεί ο κλιματισμός εσωτερικών χώρων προκειμένου να διατηρηθούν συνθήκες (θερμοκρασία και υγρασία) άνεσης. Εξίσου γνωστή εφαρμογή αποτελεί η ψύξη (ή συντήρηση) τροφίμων και ποτών προκειμένου να είναι δυνατή η αποθήκευσή τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα διατηρώντας παράλληλα την ποιότητά τους. Επιπλέον, η ψύξη χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία σε εφαρμογές όπως, ο διαχωρισμός και η υγροποίηση αερίων, η αφύγρανση του αέρα, η απαγωγή θερμότητας σε εξώθερμες αντιδράσεις προκειμένου να διατηρηθούν στην απαραίτητη για την πραγματοποίησή τους χαμηλή θερμοκρασία όπως και σε άλλες εφαρμογές.

1.1. Τεχνολογίες Ψύξης

Η ψύξη αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας, σε ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας, για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του πρώτου κάτω από ένα επιθυμητό επίπεδο. Η απλούστερη και πλέον διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής ψύξης βασίζεται στο φαινόμενο της αλλαγής φάσης ενός ρευστού, και των θερμικών συναλλαγών που συνοδεύουν τη μεταβολή αυτή. Συνήθως αξιοποιείται η μετάβαση ενός πτητικού ρευστού από την υγρή στην αέρια φάση (ατμοποίηση). Κατά την αλλαγή φάσης το ρευστό απορροφά από το περιβάλλον του την απαιτούμενη θερμότητα ατμοποίησης, με αποτέλεσμα την ψύξη του περιβάλλοντος και την παραγωγή του επιθυμητού ψυκτικού αποτελέσματος [3]. Παρακάτω, αναλύονται κάποιοι από τους συνηθέστερους ψυκτικούς κύκλους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές ψύξης.

1.1.1 Ο Ψυκτικός Κύκλος Μηχανικής Συμπίεσης

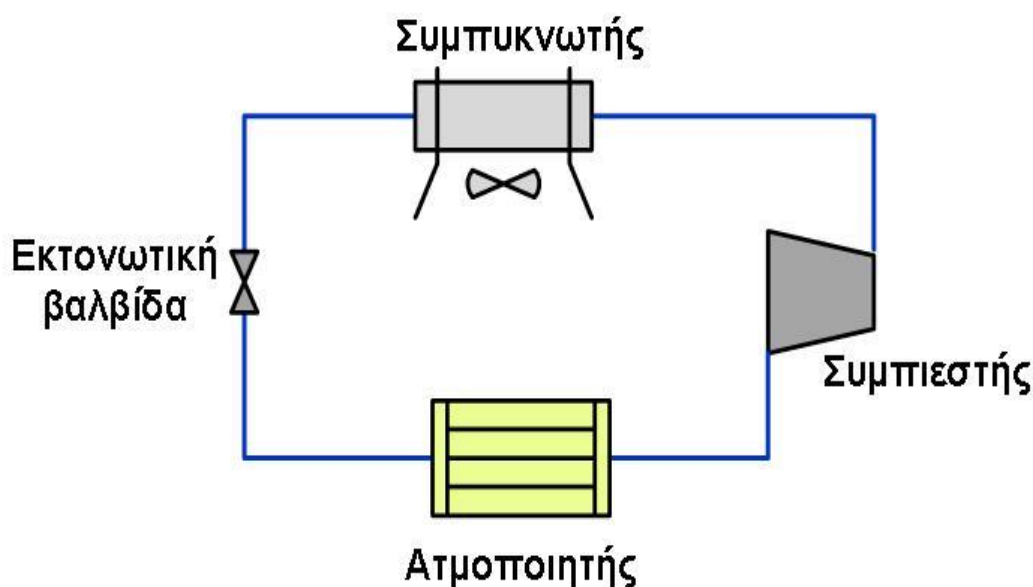
Ο ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών (Vapor Compression Cycle – VCC) αποτελεί την πιο διαδεδομένη και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σε πρακτικές εφαρμογές μορφή ψυκτικού κύκλου καλύπτοντας απαιτήσεις για ψύξη από μερικές δεκάδες W έως αρκετές δεκάδες MW ανά μονάδα. Κύριο χαρακτηριστικό του εν λόγω ψυκτικού κύκλου, είναι η

χρήση τουλάχιστον ενός συμπιεστή ο οποίος καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ για την αύξηση της πίεσης του ψυκτικού μέσου.

Ο βασικός κύκλος παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικ. 1.1, και όπως φαίνεται αποτελείται από τέσσερις κύριες συνιστώσες:

- Έναν συμπιεστή (compressor)
- Έναν συμπυκνωτή (condenser)
- Μία εκτονωτική βαλβίδα (expansion valve)
- Έναν ατμοποιητή (evaporator)

Σε αυτόν τον κύκλο, το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται σε αέρια φάση στο συμπιεστή, όπου συμπιέζεται με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του. Στη συνέχεια το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται στο συμπυκνωτή, ο οποίος είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, όπου ψύχεται απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας το εργαζόμενο ρευστό συμπυκνώνεται και μετέρχεται από αέρια σε υγρή φάση. Εξερχόμενο από το συμπυκνωτή, το ελαφρώς υπόψυκτο εργαζόμενο ρευστό υψηλής πίεσης, διέρχεται μέσα από την εκτονωτική βαλβίδα όπου μειώνεται η πίεση και η θερμοκρασία του και μετατρέπεται σε διφασικό μίγμα υγρού και ατμού χαμηλής θερμοκρασίας. Το ψυχρό ρευστό εισέρχεται στην συνέχεια στον ατμοποιητή, ο οποίος είναι επίσης ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος βρίσκεται εντός του ψυχόμενου χώρου. Στον ατμοποιητή, η υγρή φάση του εργαζόμενου ρευστού ατμοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία, απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον του, παράγοντας το απαιτούμενο ψυκτικό αποτέλεσμα. Ο ατμός εγκαταλείπει τον ατμοποιητή και εισέρχεται εκ νέου στο συμπιεστή και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Εικ. 1.1. Κύκλος ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών [4]

Το εργαζόμενο ρευστό που κυκλοφορεί σε κύκλους όπως αυτός που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται ψυκτικό μέσο. Κύριο χαρακτηριστικό των ψυκτικών μέσων αποτελεί η χαμηλότερη του περιβάλλοντος θερμοκρασία ατμοποίησης υπό ατμοσφαιρική πίεση [3]. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές πρέπει να ικανοποιούν απαιτήσεις,

όπως να μην είναι τοξικά, εύφλεκτα και εκρηκτικά και να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη επίπτωση σε περιβαλλοντικά προβλήματα όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη ή η καταστροφή της στιβάδας του όζοντος (τρύπα του όζοντος). Η επιλογή του ψυκτικού μέσου καθίσταται σημαντική καθώς επηρεάζει την απόδοση της διάταξης τόσο άμεσα μέσω των θερμοδυναμικών του χαρακτηριστικών όσο και έμμεσα μέσω της εκλογής των συνιστωσών για να υλοποιήσουν τον κύκλο. Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα στις διατάξεις μηχανικής συμπίεσης, το οποίο ικανοποιεί τις σύγχρονες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, είναι το τετραφθοροαιθάνιο (CH_2FCF_3), το οποίο είναι γνωστό και ως R-134a.

Οι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις που υλοποιούν τον συγκεκριμένο κύκλο διακρίνονται σε διάφορους τύπους ανάλογα με τον μηχανισμό κίνησης που υλοποιεί την συμπίεση και τη δυνατότητα επέμβασης στο εσωτερικό τους. Έτσι, ως προς τη δυνατότητα επέμβασης στο εσωτερικό τους οι συμπιεστές διακρίνονται σε ανοικτού τύπου, ημερημτικού τύπου και κλειστού τύπου ή ερμητικούς, ενώ ως προς τον τρόπο κίνησης διακρίνονται σε εμβολοφόρους, φυγοκεντρικούς (ή ακτινικούς), κοχλιωτούς, αξονικούς, σπειροειδείς, τυμπάνου και άλλων τύπων [5, 6].

Η απόδοση ενός ψυκτικού συστήματος εκφράζεται με το συντελεστή συμπεριφοράς (Coefficient of Performance – COP), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$COP = \frac{\text{Ωφέλιμη/Αποδιδόμενη Ψυκτική Ισχύς}}{\text{Ισχύς Εισόδου}}$$

Στην περίπτωση του μηχανικής συμπίεσης η ισχύς εισόδου είναι η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται στο συμπιεστή της διάταξης.

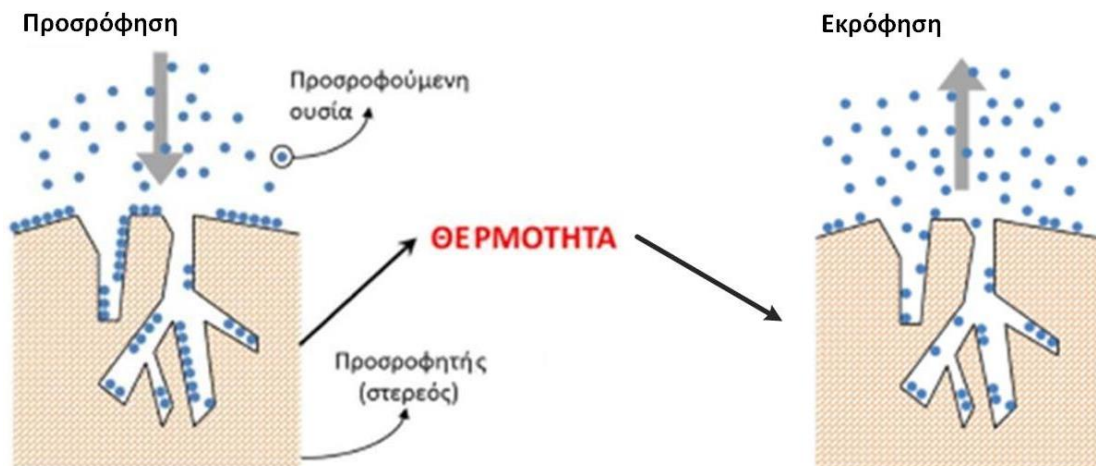
Το κύριο πλεονέκτημα της ψύξης με μηχανική συμπίεση ατμών είναι πως πρόκειται για μία ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία. Ως αποτέλεσμα οι αντίστοιχες διατάξεις χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλό κόστος κτήσης. Επίσης, ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ο συγκεκριμένος κύκλος παρουσιάζει αρκετά υψηλή απόδοση σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες ψύξης.

Αντίθετα, σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής, συνήθως, ισχύος για την κίνηση του συμπιεστή, το οποίο συνεπάγεται υψηλά λειτουργικά κόστη. Εξίσου σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η διαρροή ψυκτικού μέσου στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια ζωής της διάταξης. Παρά την αντικατάσταση παλαιότερων ψυκτικών μέσων με πιο φιλικά προς το περιβάλλον, αυτά που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα είναι αρκετά επιζήμια ως προς την υπερθέρμανση του πλανήτη και την τρύπα του όζοντος.

1.1.2 Ο Ψυκτικός Κύκλος Προσρόφησης

Η προσρόφηση είναι μία εξώθερμη διεργασία κατά την οποία ιόντα ή μόρια μιας ουσίας, η οποία συνήθως είναι αέρια, συσσωρεύονται στην επιφάνεια (στους πόρους) ενός προσροφητή, ο οποίος συνήθως είναι στερεός. Η αντίθετη διεργασία ονομάζεται εκρόφηση, κατά την οποία απαιτείται η πρόσδοση θερμότητας ώστε τα ιόντα ή μόρια της

ουσίας να απομακρυνθούν από τους πόρους του προσροφητικού υλικού. Στην Εικ. 1.2 φαίνεται αριστερά η διεργασία της προσρόφησης και δεξιά η διεργασία της εκρόφησης.



Εικ. 1.2. Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών της προσρόφησης και της εκρόφησης [7]

Ο ψυκτικός κύκλος προσρόφησης λειτουργεί με ανάλογο τρόπο με τον κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Και στα δύο συστήματα το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή της εγκατάστασης σε υψηλή πίεση αποβάλλοντας θερμότητα και ατμοποιείται στον ατμοποιητή της εγκατάστασης σε χαμηλή πίεση απορροφώντας θερμότητα, παράγοντας έτσι το επιθυμητό ψυκτικό αποτέλεσμα. Η διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός ότι το ρόλο του συμπιεστή αναλαμβάνει ο θάλαμος προσρόφησης, ο οποίος λειτουργεί ως «θερμικός» συμπιεστής, τροφοδοτούμενος με θερμική αντί ηλεκτρικής ισχύος.

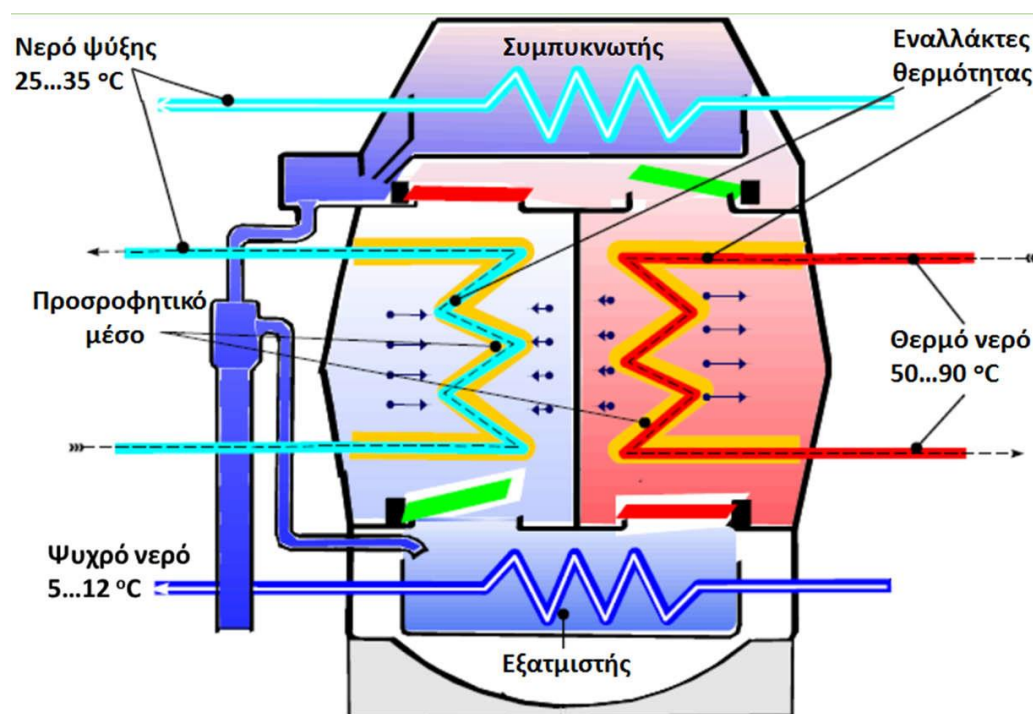
Ο βασικός κύκλος ψύξης με προσρόφηση αποτελείται από τα τέσσερα βασικά στάδια όπως αυτά περιγράφονται παρακάτω.

- Θέρμανση και Συμπίεση (Heating and Pressurization)
- Εκρόφηση και Συμπύκνωση (Desorption and Condensation)
- Ψύξη και Αποσυμπίεση (Cooling and Depressurization)
- Προσρόφηση και Ατμοποίηση (Adsorption and Evaporation)

Στο πρώτο στάδιο, το οποίο ονομάζεται θέρμανση και συμπίεση, ο προσροφητής θερμαίνεται από πηγή θερμότητας (νερό) υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature – HT) ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πίεσή του από την πίεση ατμοποίησης στην πίεση συμπύκνωσης. Αυτό το στάδιο είναι ισοδύναμο με τη συμπίεση στον κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Στο δεύτερο στάδιο, το οποίο ονομάζεται εκρόφηση και συμπύκνωση, ο προσροφητής συνεχίζει να τροφοδοτείται με θερμότητα και η θερμοκρασία του συνεχίζει να αυξάνεται με αποτέλεσμα ο ατμός που υπάρχει μέσα στο προσροφητικό υλικό να αναγεννηθεί και να διαφύγει από αυτό (εκρόφηση). Ο ατμός στη συνέχεια οδηγείται στο συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται και αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον, μέσω του δευτερεύοντος κυκλώματος νερού μέσης θερμοκρασίας (Medium Temperature – MT). Το στάδιο αυτό ισοδυναμεί με τη συμπύκνωση στον κύκλο συμπίεσης ατμού. Στο τρίτο στάδιο, το οποίο ονομάζεται ψύξη και αποσυμπίεση, ο προσροφητής αποσυνδέεται από το συμπυκνωτή και ψύχεται από νερό μέσης θερμοκρασίας (MT) και η πίεσή του μειώνεται

από την πίεση συμπύκνωσης στην πίεση ατμοποίησης. Το στάδιο αυτό είναι το αντίστοιχο της εκτόνωσης του ψυκτικού μέσου στον κύκλο συμπίεσης ατμών. Στο τέταρτο στάδιο, το οποίο ονομάζεται προσρόφηση και ατμοποίηση, ο προσροφητής συνδέεται με τον ατμοποιητή, ενώ συνεχίζει να ψύχεται από νερό μέσης θερμοκρασίας (MT), καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω η προσρόφηση είναι εξώθερμη διεργασία. Η θερμοκρασία του προσροφητή συνεχίζει να μειώνεται και έτσι προσροφά τον παραγόμενο στον ατμοποιητή ατμό, παράγοντας το απαιτούμενο ψυκτικό αποτέλεσμα. Η θερμότητα ατμοποίησης λαμβάνεται από νερό χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature – LT). Αυτό το στάδιο, είναι ισοδύναμο με την ατμοποίηση του ψυκτικού στο συμβατικό κύκλο συμπίεσης ατμών.

Ο ψυκτικός κύκλος προσρόφησης είναι ένας περιοδικός, διακοπτόμενος κύκλος, οπότε απαιτούνται τουλάχιστον δύο διαφορετικοί θάλαμοι με προσροφητικό υλικό για την εξασφάλιση συνεχούς ψυκτικής λειτουργίας, ούτως ώστε όταν ο ένας θάλαμος βρίσκεται στη φάση προσρόφησης, ο άλλος να βρίσκεται στη φάση εκρόφησης. Ένας ψύκτης προσρόφησης δύο θαλάμων, με ενδεικτικές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας δίνεται σχηματικά στην Εικ. 1.3.



Εικ. 1.3. Σχηματική απεικόνιση ψύκτη προσρόφησης δύο θαλάμων ρόφησης

Τα στάδια που αναφέρθηκαν παραπάνω υλοποιούνται στον ψύκτη της Εικ. 1.3 όπως περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά, όλες οι βαλβίδες είναι κλειστές και ο αριστερός θάλαμος ψύχεται με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του αλλά και της πίεσης, η οποία γίνεται ίση με την πίεση ατμοποίησης. Ταυτόχρονα, ο δεξιός θάλαμος θερμαίνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του και της πίεσης, η οποία γίνεται ίση με την πίεση συμπύκνωσης. Στη συνέχεια, ανοίγουν οι βαλβίδες που φαίνονται ανοιχτές στην Εικ. 1.3, ενώ ο δεξιός θάλαμος συνεχίζει να θερμαίνεται, με αποτέλεσμα το ψυκτικό μέσο να απελευθερώνεται από το

προσοροφητικό υλικό (εκρόφηση) και να οδηγείται στο συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται και αποβάλλει θερμότητα. Το συμπύκνωμα επιστρέφει στον ατμοποιητή ώστε να μπορεί να συνεχιστεί ο κύκλος. Ταυτόχρονα, ο αριστερός θάλαμος συνεχίζει να ψύχεται, με αποτέλεσμα το ψυκτικό μέσο (ατμός) που παράγεται στον ατμοποιητή να προσροφάται στο προσροφητικό υλικό (προσρόφηση). Έπειτα, οι λειτουργίες αντιστρέφονται. Οι βαλβίδες κλείνουν και ο αριστερός θάλαμος θερμαίνεται με την πίεσή του να αυξάνεται από την πίεση ατμοποίησης στην πίεση συμπύκνωσης, ενώ ο δεξιός θάλαμος ψύχεται με την πίεσή του να μειώνεται από την πίεση συμπύκνωσης στην πίεση ατμοποίησης. Τέλος, ανοίγουν οι βαλβίδες που ήταν κλειστές στο πρώτο στάδιο. Ο αριστερός θάλαμος συνεχίζει να θερμαίνεται κάνοντας εκρόφηση, ενώ ο δεξιός θάλαμος συνεχίζει να ψύχεται κάνοντας προσρόφηση.

Τα συνηθέστερα ζεύγη προσροφητικού υλικού – ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιούνται στους ψύκτες προσρόφησης είναι τα εξής Shmroukh et al. [8]:

- Ζεόλιθος – Νερό
- Silica gel – Νερό
- Ενεργός άνθρακας – Μεθανόλη

Ενδεικτικά παρατίθενται μερικά από τα χαρακτηριστικά των παραπάνω προσροφητικών υλικών (προσοροφητών):

Ενεργός άνθρακας

- Αποτελεί τον κοινότερο προσροφητή
- Παράγεται από πολλά ανθρακούχα υλικά (όπως φλοιός καρύδας, ξύλο, κάρβουνο κ.α.)
- Υψηλές τιμές ειδικής επιφάνειας ($500 - 2700 \text{ m}^2/\text{g}$) [9]
- Χαμηλές τιμές θερμότητας προσρόφησης ($1800 - 2000 \text{ kJ}/\text{kg}_{ads}$) [10]
- Χαμηλές τιμές ικανότητας προσρόφησης ($0.03 - 0.33 \text{ kg}_{ref}/\text{kg}_{ads}$) [11]
- Μέση διάμετρος πόρου $0.4 - 3 \text{ nm}$ [12]

Silica gel

- Αποτελεί το συνηθέστερο προσροφητικό υλικό στους ψύκτες προσρόφησης
- Μπορεί να αναγεννηθεί χρησιμοποιώντας πηγές χαμηλής θερμοκρασίας ($60 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$) [10]
- Ειδική επιφάνεια $320 - 650 \text{ m}^2/\text{g}$ [12, 13]
- Μέση θερμότητα προσρόφησης $2800 \text{ kJ}/\text{kg}_{ads}$ [10]
- Μέση διάμετρος πόρου $2.5 - 25 \text{ nm}$ [12]

Ζεόλιθοι

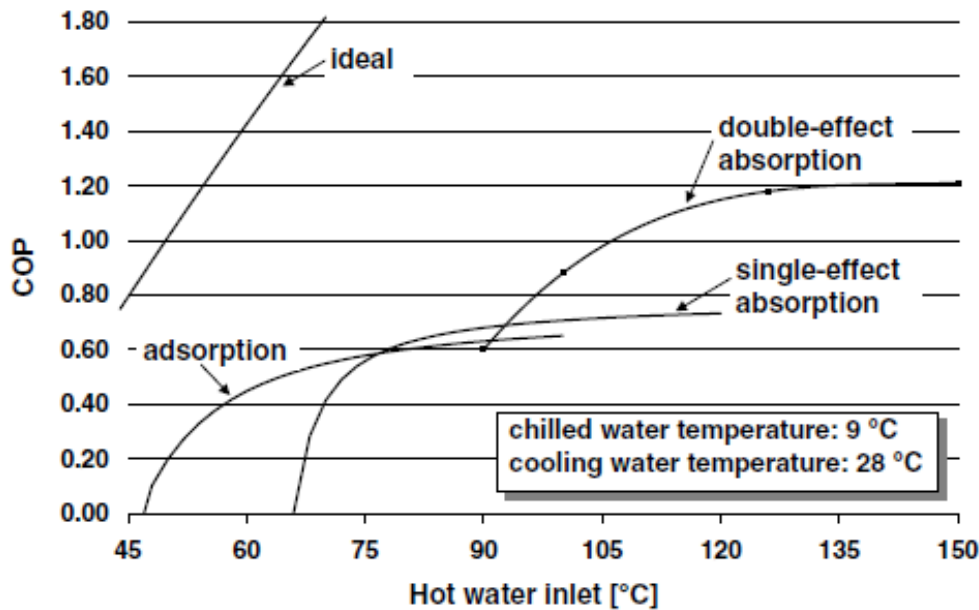
- Κρυσταλλική δομή
- Περισσότεροι από 200 τύποι κρυσταλλικών δομών [14]
- Υψηλές τιμές ειδικής επιφάνειας ($800 - 1200 \text{ m}^2/\text{g}$) [15]
- Υψηλές τιμές θερμότητας προσρόφησης ($3300 - 4200 \text{ kJ}/\text{kg}_{ads}$) [10]
- Απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες αναγέννησης ($> 150 \text{ }^\circ\text{C}$) [10]

Όπως και στο σύστημα μηχανικής συμπίεσης ατμών, η απόδοση ενός ψύκτη προσρόφησης εκφράζεται με το συντελεστή συμπεριφοράς (COP). Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εισόδου είναι η θερμική ισχύς που παρέχεται στον ψύκτη.

Οι ψύκτες προσρόφησης παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Μπορούν να τροφοδοτηθούν από πηγές θερμότητας μεγάλου εύρους θερμοκρασιών. Χαμηλές θερμοκρασίες έως 50 °C αλλά και υψηλές έως 500 °C, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή θερμότητας, χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων διάβρωσης [16].
- Δεν υφίσταται περιορισμός στη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας, καθώς δεν υπάρχει κίνδυνος κρυστάλλωσης [17].
- Δεν υπάρχει εσωτερική αντλία διαλύματος και ως εκ τούτου η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν είναι ελάχιστη.
- Οι προσροφητές που χρησιμοποιούνται είναι στερεοί και έτσι είναι κατάλληλοι για χρήση σε συνθήκες λειτουργίας με υψηλές δονήσεις, όπως σε αλιευτικά σκάφη και τρένα.
- Διαθέτουν πολύ λίγα κινούμενα μέρη με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν αθόρυβοι.
- Δυνατότητα λειτουργίας για περισσότερες από 8000 ώρες το χρόνο [18].
- Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς τη συντήρηση (ετήσιος καθαρισμός των σωλήνων του συμπυκνωτή).
- Απαιτούν ένα απλό σύστημα ελέγχου.
- Έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής.

Παρά το γεγονός ότι μπορούν να εκμεταλλευθούν πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, οι ψύκτες προσρόφησης παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή συμπεριφοράς της τάξεως του $COP = 0.6 - 0.7$ [16, 19], ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικ. 1.4. Η ψυκτική τους ικανότητα κυμαίνεται από μερικά kW έως και 1000 kW ανά μονάδα [10]. Τέλος, το κόστος καθώς και οι μεγάλες διαστάσεις των ψυκτών προσρόφησης, οδηγούν στη χαμηλή εμπορευματοποίηση αυτών των συστημάτων.



Εικ. 1.4. Συντελεστής συμπεριφοράς θερμικά εκκινούμενων τεχνολογιών ψύξης[20]

1.2. Ηλιακοί Συλλέκτες

Ο Ήλιος είναι μία σφαίρα που αποτελείται από διάπυρη ύλη αέριας κατάστασης και πλάσμα, με διάμετρο $1,39 \times 10^9$ m. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα πυρηνικό αντιδραστήρα τεραστίων διατάσεων, όπου υδρογόνο μετατρέπεται συνεχώς σε ήλιο. Η θερμοκρασία στην επιφάνειά του είναι ίση με 5760 K, ενώ η θερμοκρασία στο κέντρο του είναι κατά πολύ υψηλότερη και εκτιμάται από 8×10^6 έως 40×10^6 K [21]. Η συνολική παραγωγή ενέργειας υπό μορφή ακτινοβολίας από τις πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης που λαμβάνουν χώρα στη μάζα του ισούται με $3,8 \times 10^{20}$ MW, η οποία ισοδυναμεί με 63 MW/m^2 της επιφάνειάς του. Αυτή η ενέργεια ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η Γη δέχεται ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτής της ενέργειας, το οποίο ισούται με $1,7 \times 10^{14}$ kW. Ωστόσο, ακόμα και με αυτό το μικρό ποσοστό, εκτιμάται ότι η ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη σε διάστημα 84 λεπτών είναι ίση με την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση για ένα χρόνο [15].

Προκειμένου να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται συσκευές οι οποίες ονομάζονται ηλιακοί συλλέκτες. Ο ηλιακός συλλέκτης είναι μιας ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και τη μεταφέρει στο εργαζόμενο μέσο (αέρας, νερό ή θερμικό έλαιο) αυξάνοντας τη θερμοκρασία του [22]. Οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες και
- συγκεντρωτικοί συλλέκτες.

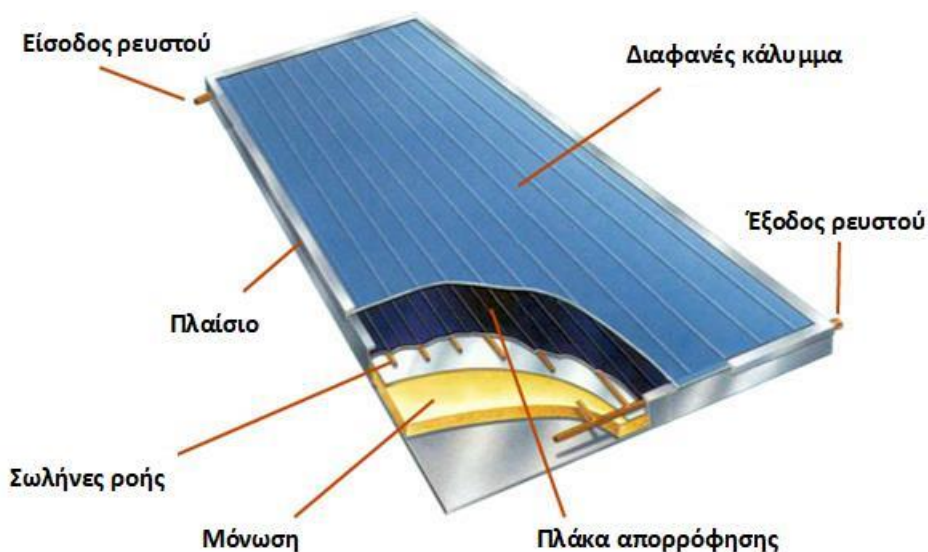
Σε ένα μη συγκεντρωτικό συλλέκτη, η επιφάνεια στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία είναι η ίδια με την επιφάνεια στην οποία γίνεται η απορρόφηση αυτής, ενώ ένας συγκεντρωτικός συλλέκτης, συνήθως έχει κοίλες ανακλαστικές επιφάνειες, οι οποίες

συγκεντρώνουν την προσπίπτουσα σε αυτές ηλιακή ακτινοβολία, σε μία μικρότερη περιοχή (δέκτης), αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση ενέργειας ανά επιφάνεια.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι από τους συνηθέστερους τύπους ηλιακών συλλεκτών.

1.2.1 Επίπεδοι Συλλέκτες

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (Flat Plate Collector–FPC) αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο συλλέκτη παγκοσμίως. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, έως 100 °C [21], όπως η θέρμανση κτηρίων, η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση. Ένας τυπικός επίπεδος συλλέκτης φαίνεται παρακάτω, στην Εικ. 1.5.



Εικ. 1.5. Σχεδιάγραμμα επίπεδου συλλέκτη [23]

Τα βασικά τμήματα ενός επίπεδου συλλέκτη είναι:

- Ο απορροφητής, ο οποίος περιλαμβάνει την πλάκα απορρόφησης, δηλαδή τη μαύρη επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, και τους σωλήνες μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το εργαζόμενο ρευστό.
- Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα πάνω από τον απορροφητή. Το κάλυμμα έχει σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών από συναγωγή και ακτινοβολία, του απορροφητή προς το περιβάλλον.
- Η θερμομόνωση των πίσω και των παραπλεύρων επιφανειών του συλλέκτη, με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών.
- Το πλαίσιο που περιβάλλει το συλλέκτη, το οποίο πρέπει να είναι στεγανό και αντισταβρωτικό.

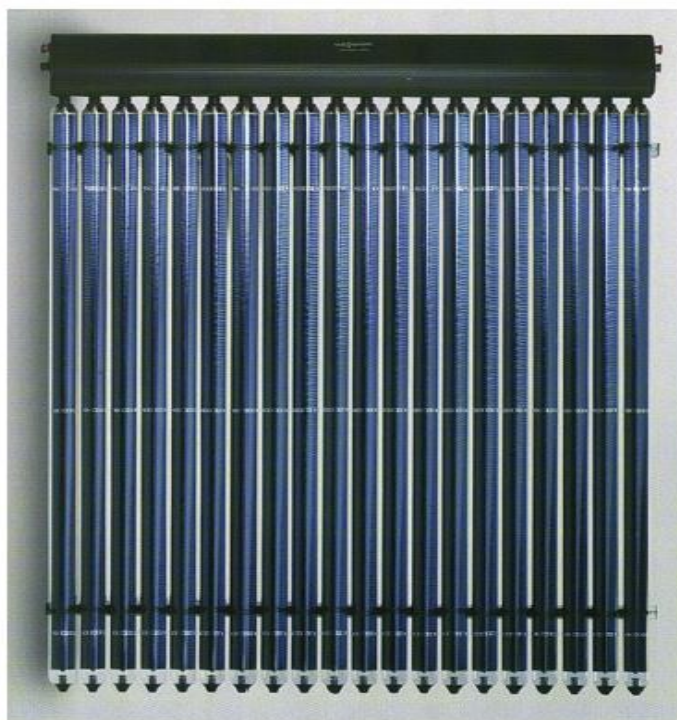
Τα πλεονεκτήματα των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών είναι ότι έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής, εκμεταλλεύονται τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και είναι συνήθως μόνιμα τοποθετημένοι σε μία συγκεκριμένη θέση οπότε δεν απαιτούν σύστημα παρακολούθησης του Ηλίου. Συνήθως τοποθετούνται στραμμένοι προς τον ισημερινό και με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, τέτοια ώστε να επιτρέπει την όσο το

δυνατόν πιο κάθετη πρόσπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη.

1.2.2 Συλλέκτες κενού

Οι συλλέκτες κενού (Evacuated Tube Collectors–ETC) έχουν καλύτερη απόδοση από τους επίπεδους συλλέκτες και μπορούν να επιτύχουν θερμοκρασίες από 50 °C έως 200 °C [24]. Χρησιμοποιούνται σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές θέρμανσης αλλά και σε εφαρμογές ψύξης μέσω θερμικά εκκινούμενων συστημάτων ψύξης. Επιπλέον, αποτελούν μία αποτελεσματική εναλλακτική επιλογή των επίπεδων συλλεκτών για χρήση σε περιοχές των οποίων το κλίμα χαρακτηρίζεται από χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές περιόδους νέφωσης, καθώς σε αυτές τις συνθήκες η απόδοση των τελευταίων μειώνεται σημαντικά [21, 25].

Ένας συλλέκτης κενού αποτελείται από παράλληλους υάλινους σωλήνες κενού οι οποίοι συνδέονται σε ένα κεντρικό σωλήνα συλλογής, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.6. Κάθε σωλήνας κενού περιέχει στο εσωτερικό του μία απορροφητική επιφάνεια, από το οποίο ο αέρας έχει αφαιρεθεί και επικρατεί πίεση της τάξεως των 10^{-3} mbar [25], δηλαδή συνθήκες κενού. Το κενό αποτελεί πολύ καλό μονωτικό, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες συναγωγής, ενώ σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η απορροφητική επιφάνεια (απορροφητής) επιλέγεται να έχει επιλεκτική επίστρωση, προκειμένου να μειώνονται οι απώλειες ακτινοβολίας.



Εικ. 1.6 Συλλέκτης κενού [24]

Ο υάλινος σωλήνας κενού μπορεί να είναι μονού ή διπλού τοιχώματος. Στην περίπτωση του σωλήνα μονού τοιχώματος το κενό διατηρείται εντός ολόκληρου του σωλήνα, ενώ στο εσωτερικό του υπάρχει ένα επίπεδο ή καμπύλο μεταλλικό έλασμα το οποίο είναι επικαλυμμένο με επιλεκτική επίστρωση και προσκολλημένο στον εκάστοτε απορροφητικό

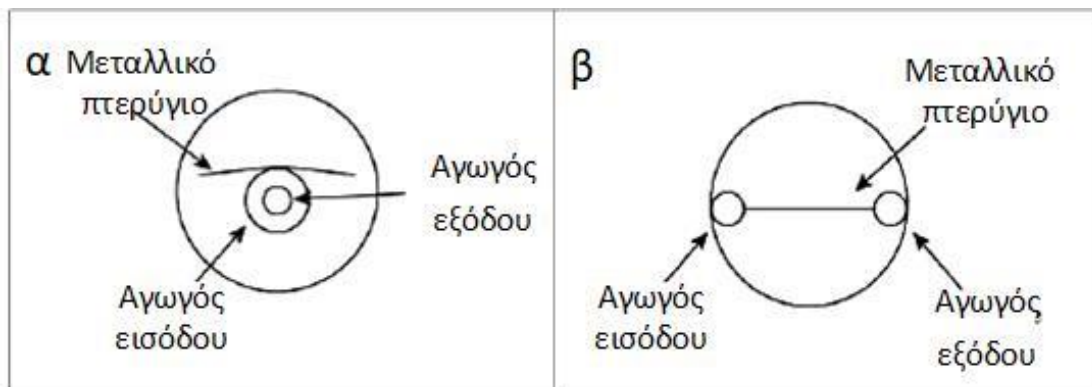
σωλήνα, ο οποίος συνήθως είναι χάλκινος. Ο σωλήνας διπλού τοιχώματος αποτελείται από δύο σωλήνες, έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι στο ένα άκρο τους. Σε αυτή την περίπτωση το κενό διατηρείται στο χώρο μεταξύ των δύο σωλήνων. Η εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα καλύπτεται με επιλεκτική επίστρωση, ενώ ο εξωτερικός σωλήνας είναι διαφανής.

Ανάλογα με τη μέθοδο απαγωγής της θερμότητας από τον απορροφητή οι ηλιακοί συλλέκτες κενού διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Συλλέκτες άμεσης ροής (direct – flow)
- Συλλέκτες θερμικού σωλήνα (heat – pipe)

Συλλέκτες άμεσης ροής

Στους συλλέκτες άμεσης ροής, το εργαζόμενο ρευστό ρέει εντός των σωλήνων κενού, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε μονού είτε διπλού τοιχώματος. Πιο συγκεκριμένα το ρευστό ρέει εντός χάλκινων σωλήνων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του σωλήνα κενού. Ανάλογα με το σχήμα αυτών των σωλήνων, το εργαζόμενο μέσο μπορεί να ρέει είτε ομοαξονικά, είτε ακολουθώντας μία διαδρομή σχήματος “U”, είτε με άλλο τρόπο (Εικ. 1.7). Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σωλήνας διπλού τοιχώματος, το εργαζόμενο ρευστό μπορεί να ρέει ελεύθερο εντός αυτού μέσω του φαινομένου του θερμοσιφονισμού. Σε όλες τις περιπτώσεις ωστόσο, το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται και εξέρχεται από την ίδια άκρη του σωλήνα κενού.



Εικ. 1.7 Σωλήνας κενού άμεσης ροής. α. ομοαξονικός β. τύπου “U”

Συλλέκτες θερμικού σωλήνα

Οι συλλέκτες θερμικού σωλήνα αποτελούνται συνήθως από σωλήνες κενού διπλού τοιχώματος (Εικ. 1.8). Εντός του σωλήνα είναι τοποθετημένα ένα έλασμα αλουμινίου κυκλικού σχήματος και ένας χάλκινος αγωγός (θερμικός σωλήνας), ο οποίος είναι κλειστός στο ένα άκρο του, ενώ το άλλο άκρο του είναι συνδεδεμένος με έναν επίσης κλειστό μεταλλικό αγωγό (συμπυκνωτής). Το έλασμα αλουμινίου βρίσκεται σε επαφή τόσο με τον εσωτερικό υάλινο σωλήνα όσο και με το θερμικό σωλήνα, ώστε μέσω της επιφάνειάς του να μεταφέρεται η θερμότητα με αγωγή από τον πρώτο στον δεύτερο.

Εντός του θερμικού σωλήνα όπου επικρατούν συνθήκες κενού υπάρχει μία μικρή ποσότητα ρευστού όπως νερό ή μεθανόλη [24, 25]. Σκοπός του κενού είναι η ελάττωση του σημείου βρασμού του ρευστού ώστε να μπορεί να μεταβαίνει εύκολα από την υγρή στην αέρια φάση. Το ρευστό απορροφά θερμότητα, ατμοποιείται και ο ατμός ανεβαίνει ψηλά φθάνοντας στον συμπυκνωτή. Εκεί η θερμότητα μεταφέρεται από τον ατμό εντός του θερμικού σωλήνα στο εργαζόμενο ρευστό (ψυχρό νερό) με το οποίο βρίσκεται σε επαφή ο συμπυκνωτής. Αφού αποδώσει τη θερμότητά του, ο ατμός συμπυκνώνεται, επιστρέφει λόγω βαρύτητας στο κάτω μέρος του χάλκινου σωλήνα και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Εικ. 1.8 Σωλήνας κενού με *heat-pipe* [26]

Οι συλλέκτες άμεσης ροής παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σύγκριση με τους συλλέκτες θερμικών σωλήνων. Στα πλεονεκτήματα περιλαμβάνονται το χαμηλότερο κόστος, το μικρότερο μέγεθος καθώς και η ευελιξία όσον αφορά την τοποθέτησή τους καθώς μπορούν να τοποθετηθούν τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα [25]. Αντίθετα οι συλλέκτες θερμικών σωλήνων πρέπει να είναι τοποθετημένοι με μία κλίση τουλάχιστον 25° , ώστε να μπορεί το ρευστό εντός του θερμικού σωλήνα να επιστρέφει στο κάτω μέρος αυτού.

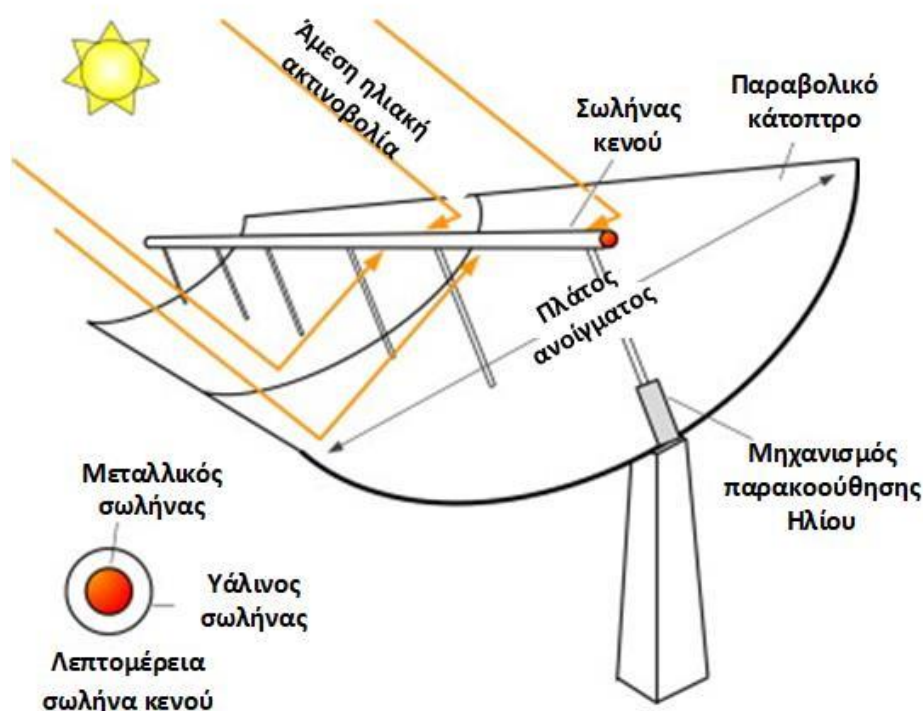
Στα πλεονεκτήματα των συλλεκτών θερμικών σωλήνων περιλαμβάνονται οι χαμηλές απαιτήσεις για συντήρηση, η απουσία κινδύνου σχηματισμού πάγου καθώς και το γεγονός ότι είναι δυνατή η αντικατάσταση ενός σωλήνα, χωρίς να χρειαστεί να εκκενωθεί όλο το σύστημα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των συλλεκτών άμεσης ροής.

1.2.3 Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου

Για την επίτευξη θερμοκρασιών κατά πολύ υψηλότερων από αυτές που επιτυγχάνονται με τους επίπεδους συλλέκτες, χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικοί συλλέκτες. Το πιο διαδεδομένο είδος αυτών αποτελούν οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου, οι οποίοι

μπορούν να παράγουν αποτελεσματικά θερμότητα σε θερμοκρασίες από 50 έως 400 °C [21].

Οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου αποτελούνται από μία παραβολική ανακλαστική επιφάνεια και ένα σωλήνα κενού (δέκτης), ο οποίος είναι τοποθετημένος κατά μήκος της γραμμής εστίασης και εντός αυτού ρέει το εργαζόμενο μέσο. Πιο συγκεκριμένα, η ανακλαστική επιφάνεια κατασκευάζεται κάμπτοντας ένα φύλλο ανακλαστικού υλικού ώστε να πάρει τη μορφή της παραβολής. Ο σωλήνας κενού αποτελείται από έναν εσωτερικό μεταλλικό σωλήνα μαύρου χρώματος και έναν εξωτερικό υάλινο σωλήνα. Στον χώρο μεταξύ των δύο σωλήνων επικρατούν συνθήκες κενού. Μία σχηματική απεικόνιση ενός συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου δίνεται στην Εικ. 1.9.



Εικ. 1.9 Σχεδιάγραμμα συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου [27]

Η αρχή λειτουργίας αυτού του συλλέκτη βασίζεται σε μία γεωμετρική ιδιότητα της παραβολής. Σύμφωνα με αυτή, όταν η παραβολή είναι στραμμένη προς τον ήλιο οι παράλληλες ακτίνες που πέφτουν κάθετα στο άνοιγμα αυτής, ανακλώνται και συγκεντρώνονται στη γραμμή εστίασης, δηλαδή στο δέκτη. Έτσι επιτυγχάνονται υψηλές θερμοκρασίες στο εργαζόμενο ρευστό, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρή επιφάνεια. Προκειμένου να εξασφαλίζεται πάντα η κάθετη πρόσπτωση των ακτίνων του ηλίου και επομένως η αποδοτική λειτουργία του συλλέκτη είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος παρακολούθησης του ηλίου.

Οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [28]. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν την παραγωγή θερμότητας για χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες, την

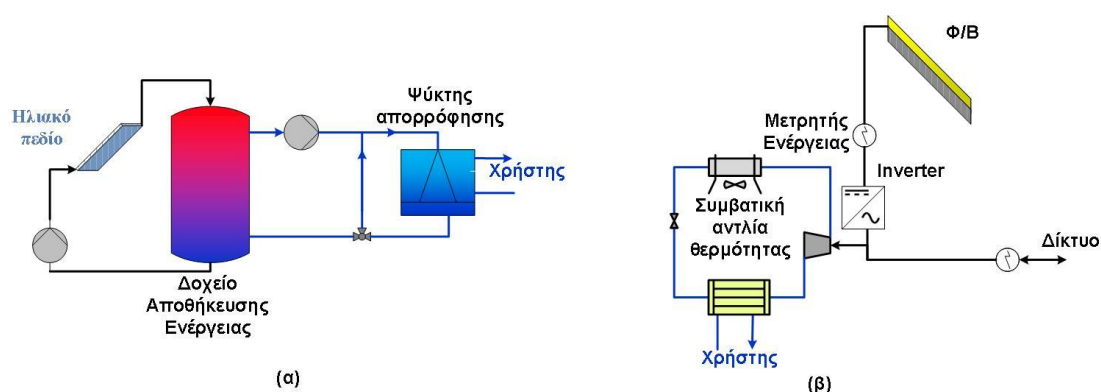
παραγωγή θερμού νερού χρήσης σε περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει μεγάλη ζήτηση (μεγάλα κτίρια, πισίνες κλπ.), καθώς και την παραγωγή ψύξης με τη σύνδεσή τους με θερμικά εκκινούμενα συστήματα ψύξης. Τέλος, ειδικές εφαρμογές περιλαμβάνουν την χρήση τους σε συστήματα άντλησης και αφαλάτωσης νερού[29].

1.3. Ηλιακή ψύξη

Η ηλιακή ψύξη ξεκίνησε να αποκτά πρακτικό ενδιαφέρον κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1990, σαν συνέπεια των αυξανόμενων τιμών του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και ως εκ τούτου και της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ψύξη κατά βάση διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Την ηλιακή ψύξη με φωτοβολταϊκά
- Την ηλιακή ψύξη με ηλιοθερμικούς συλλέκτες

Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) η ψύξη υλοποιείται μέσω μιας συμβατικής αντλίας θερμότητας που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν τα Φ/Β. Στην περίπτωση των ηλιοθερμικών συστημάτων, η θερμότητα που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο των συλλεκτών χρησιμοποιείται για να οδηγήσει μια θερμικά εκκινούμενη αντλία θερμότητας (thermally driven heat pump). Επί του παρόντος, η πιο διαδεδομένη τεχνολογία ψύξης σε συστήματα ηλιακής ψύξης με ηλιοθερμικούς συλλέκτες είναι η ψύξη με απορρόφηση, λόγω της ωριμότητάς της σε εμπορικό επίπεδο και του υψηλότερου συντελεστή συμπεριφοράς (COP) σε σύγκριση με λοιπές θερμικά εκκινούμενες τεχνολογίες ψύξης. Στην εικόνα παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση των δύο κύριων τεχνολογιών ηλιακής ψύξης.



Εικ. 1.10. Σχηματικές απεικονίσεις διατάξεων ηλιακής ψύξης (α) με ηλιοθερμικούς συλλέκτες και ψύκτη απορρόφησης και (β) με Φ/Β και συμβατική αντλία θερμότητας [30]

Σύμφωνα με μελέτες, η περίοδος αποπληρωμής για συστήματα ηλιακής ψύξης, βάσει των τρέχουσων τιμών κατασκευής των επιμέρους συστημάτων, κυμαίνεται περί τα 10-20 χρόνια [31]. Ως εκ τούτου, προς το παρόν υπάρχει μόνο ένας περιορισμένος αριθμός κατασκευαστών ολοκληρωμένων συστημάτων ηλιακής ψύξης. Ωστόσο, λόγω της ανάπτυξης της σχετιζόμενης αγοράς εκτιμάται ότι μέχρι το 2050 η ηλιακή ψύξη θα καλύπτει το 17% της συνολικής αγοράς, σύμφωνα με προβλέψεις του Διεθνούς Φορέα Ενέργειας [32].

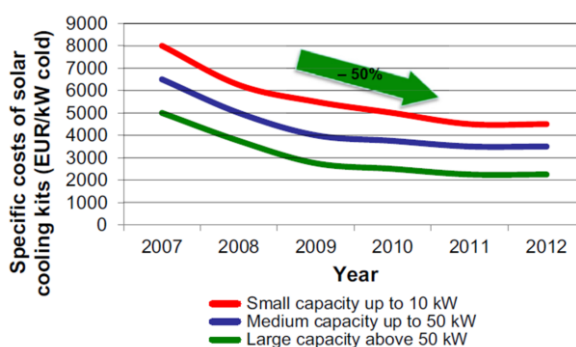
Ο Hartmann et al. [33] συνέκρινε την απόδοση ενός συστήματος Φ/Β σε σύζευξη με μια συμβατική αντλία θερμότητας και ενός συστήματος με ψύξη προσρόφησης που

τροφοδοτούνταν με θερμότητα από επίπεδους συλλέκτες. Στην εν λόγω μελέτη τα συστήματα συγκρίθηκαν ως προς την απόδοσή τους και το κόστος λειτουργίας τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σύγκρισης, τα οποία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, το σύστημα της συμβατικής αντλίας θερμότητας σε σύζευξη με Φ/Β είναι αισθητά καλύτερο ως προς τόσο την απόδοσή του όσο και το κόστος λειτουργίας του.

Πιν. 1.1 Αποτελέσματα ανάλυσης των συστημάτων ηλιακής ψύξης [33]

	Ηλιακή ψύξη με Φ/Β	Ψύξη με ηλιοθερμικά
Βαθμός απόδοσης (%)	15 (πάνελ PV)	78.9 (Επίπεδοι συλλέκτες)
COP	3 (VCC)	0.68 (Ψύκτης προσρόφησης)
Ειδικό κόστος (€/kW)	310	800

Σύμφωνα με μελέτη του Jakob [34] η επέκταση της αγοράς ηλιακής ψύξης έχει αποτυπωθεί σαφώς στο κόστος κατασκευής τέτοιων συστημάτων ανά ψυκτική kWh, όπως φαίνεται και από την Εικ. 1.11.



Εικ. 1.11. Τάσεις του κόστους συστημάτων ηλιακής ψύξης για διάφορες κλίμακες την περίοδο 2007-2012 [34]

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ)

2.1. Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) (Life Cycle Analysis, LCA) είναι μία συστηματική και αναλυτική μέθοδος που βοηθάει στην αναγνώριση, εκτίμηση και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Ως προϊόν ορίζεται κάθε υλικό ή άυλο αγαθό ή υπηρεσία [35]. Επομένως, η ανάλυση περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες που συνδέονται με την παραγωγή του προϊόντος, από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών μέχρι την παραγωγή, τη μεταφορά, τη χρήση, την επεξεργασία του μετά το τέλος της ζωής του και την τελική απόθεση των αποβλήτων, ή όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία “cradle-to-grave”.

Ένας ορισμός για την AKZ έχει δοθεί από τη SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry, 1991), σύμφωνα με τον οποίο πρόκειται για «μία τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από την χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων» [36].

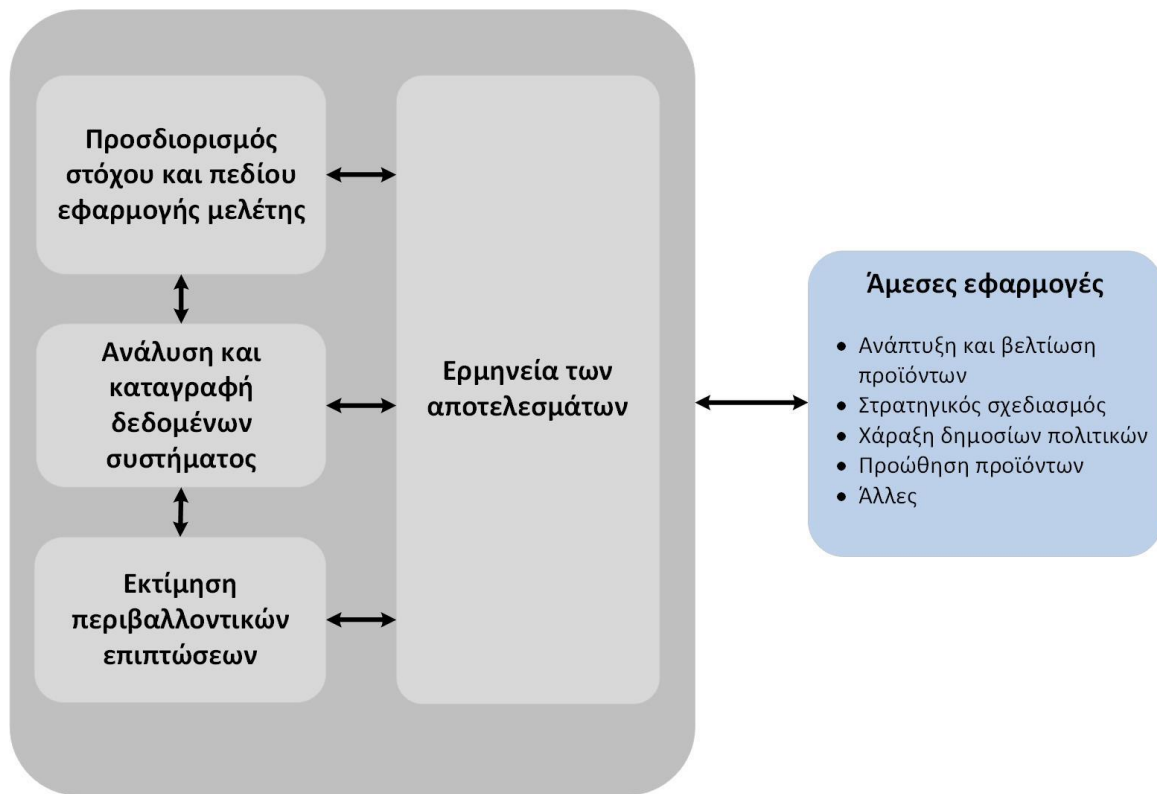
Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο για την εκτίμηση της βιωσιμότητας μίας διεργασίας ή της παραγωγής ενός προϊόντος, ενώ το εύρος εφαρμογών της καλύπτει πληθώρα περιπτώσεων, καλύπτοντας βιομηχανικές εφαρμογές, ενεργειακά συστήματα, συστήματα μεταφοράς κλπ. [37].

2.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Προκειμένου να αποφευχθούν οι αυθαιρεσίες από τους ερευνητές, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) εισήγαγε μία τυποποιημένη διαδικασία για τη διεξαγωγή αναλύσεων κύκλου ζωής. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040-14044, κάθε μελέτη AKZ αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, τα οποία είναι τα εξής:

1. Προσδιορισμός στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (goal and scope definition)
2. Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα (inventory analysis)
3. Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του συστήματος (impact assessment)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος (interpretation)

Στην Εικ. 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά η συσχέτιση μεταξύ των παραπάνω σταδίων, καθώς και κάποιες από τις άμεσες εφαρμογές των αποτελεσμάτων των αναλύσεων κύκλου ζωής.



Εικ. 2.1 Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [35]

Τα διπλά βέλη στο διάγραμμα υποδηλώνουν ότι η ΑΚΖ είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Κάθε ένα από τα στάδια της ανάλυσης, χρησιμοποιεί αποτελέσματα από τα υπόλοιπα στάδια. Έτσι, στη πραγματικότητα κανένα από αυτά δεν ολοκληρώνεται πριν ολοκληρωθεί ολόκληρη η μελέτη. Για παράδειγμα, μπορεί να χρειαστεί να προσαρμοστεί κατάλληλα ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης αν διαπιστωθεί δυσκολία στη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων.

2.2.1 Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής της μελέτης

Ο προσδιορισμός του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης αποτελεί το πρώτο στάδιο σε κάθε μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Με τον προσδιορισμό του σκοπού περιγράφονται οι λόγοι διεξαγωγής της μελέτης, η προοριζόμενη εφαρμογή της, το κοινό στο οποίο απευθύνεται καθώς και ο τρόπος χρήσης των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, με τον προσδιορισμό του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, η οποία αποτελεί μία συλλογή ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών, περιγράφεται τι περιλαμβάνεται στη μελέτη αλλά και αρκετές σημαντικές παράμετροι που υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο αυτή διεξάγεται. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις παραμέτρους είναι οι ακόλουθες:

- **Το υπό εξέταση σύστημα (product system) και τα όρια του συστήματος (system boundaries)**

Ένα σύστημα ορίζεται ως το σύνολο των διεργασιών οι οποίες παρέχουν μία ή περισσότερες καθορισμένες λειτουργίες [35]. Η λειτουργία (function) αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, ένα εργοστάσιο παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα που έχει ως λειτουργία την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως διεργασίες (processes), ορίζονται όλες οι δραστηριότητες που μετατρέπουν εισόδους (ενέργεια, υλικά) σε εξόδους (ενέργεια, υλικά, εκπομπές). Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες διεργασίες, από το σύνολο αυτών, συμπεριλαμβάνονται και εξετάζονται στο σύστημα. Το σύστημα πρέπει επιπλέον να καθοριστεί όσον αφορά τα γεωγραφικά και χρονικά όρια, δηλαδή πρέπει να καθοριστεί για ποια γεωγραφική περιοχή και για ποιον χρονικό ορίζοντα θα ισχύει η μελέτη.

- **Λειτουργική Μονάδα (functional unit)**

Η επιλογή της λειτουργικής μονάδας είναι μείζονος σημασίας για τη διεξαγωγή μιας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής. Η λειτουργική μονάδα πρέπει να είναι ένα σαφώς και ποσοτικά ορισμένο μέτρο, το οποίο συσχετίζει τη λειτουργία του συστήματος με τις εισόδους σε, και τις εξόδους από αυτό. Επιπλέον, πρέπει να επιλέγεται με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι σε συμφωνία με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, όπως αυτός έχει προσδιοριστεί στην αρχή. Ειδικότερα, στην περίπτωση όπου εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια μέσω της AKZ, η λειτουργική μονάδα πρέπει να διατηρείται σταθερή μεταξύ αυτών, ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους, καθώς τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα είναι εκφρασμένα ως προς την ίδια κοινή βάση.

- **Διαδικασία κατανομής (Allocation)**

Η διαδικασία κατανομής η οποία έχει επιλεγεί για να μοντελοποιηθεί το υπό εξέταση σύστημα, πρέπει να ορισθεί σαφώς. Το πρότυπο (ISO 14044) [38] αναφέρει ότι η κατανομή πρέπει να αποφεύγεται όπου είναι δυνατό. είτε διαιρώντας μία διεργασία σε υποδιεργασίες είτε επεκτείνοντας τα όρια του συστήματος προκειμένου να συμπεριληφθούν όλες οι επιπρόσθετες διεργασίες που σχετίζονται με τα παραπροϊόντα του υπό εξέταση συστήματος. Όπου δεν είναι δυνατό να αποφευχθεί, η κατανομή πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζει τις υποκείμενες φυσικές (ή χημικές ή βιολογικές) σχέσεις [39]) μεταξύ των προϊόντων ή των λειτουργιών του συστήματος ή σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες συσχετίσεις, όπως για παράδειγμα η οικονομική αξία των προϊόντων.

2.2.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα

Στο στάδιο της ανάλυσης και καταγραφής δεδομένων, καταγράφονται και ποσοτικοποιούνται οι εισοδοί και έξοδοι όλων των διεργασιών που περιλαμβάνει το εξεταζόμενο σύστημα, και κατ' επέκταση ολόκληρου του συστήματος, για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Οι εισοδοί περιλαμβάνουν απαιτήσεις σε ενέργεια και πρώτες ύλες, ενώ οι έξοδοι ρύπους που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ή στα ύδατα, στερεά απόβλητα και άλλες εκπομπές. Ως αποτέλεσμα, παράγεται ένας κατάλογος απογραφής ο οποίος περιέχει τις ποσότητες των ρύπων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον και τα ποσά της ενέργειας και των υλικών που καταναλώθηκαν. Τα αποτελέσματα μπορούν να διαχωριστούν ανά στάδιο του κύκλου ζωής, ανά διεργασία ή με άλλο τρόπο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Επομένως, μπορεί να προκύψουν αλλαγές στη διαδικασία της συλλογής των

δεδομένων λόγω της εμφάνισης νέων, ή της έλλειψης αυτών. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση ο κατάλογος απογραφής θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να γίνει επαναπροσδιορισμός αυτών.

Τα αποτελέσματα αυτού του σταδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους, παρέχοντας μία αρχική εκτίμηση των διεργασιών με τη μεγαλύτερη επίπτωση στο περιβάλλον, καθώς και των περιοχών όπου μπορούν να υπάρξουν βελτιώσεις.

2.2.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Ο κατάλογος απογραφής που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο στάδιο ενώ παρέχει ποσοτικά δεδομένα για τη χρήση των πόρων και τις εκπομπές ρύπων, δεν παρέχει κάποια πληροφορία για την επίπτωση που έχουν αυτά στο περιβάλλον.

Σε αυτό το στάδιο αξιολογείται η βαρύτητα και η σημασία των δυνατών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του εξεταζόμενου συστήματος, κάνοντας χρήση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί στο προηγούμενο στάδιο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας σειράς βημάτων, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω, με κάποια από αυτά να είναι υποχρεωτικά και άλλα προαιρετικά.

- **Ταξινόμηση (Classification)**

Σε αυτό το βήμα, τα αποτελέσματα του σταδίου της ανάλυσης και καταγραφής των δεδομένων ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τις οποίες προκαλούν. Συνήθως, οι περισσότερες μελέτες, επικεντρώνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη υγεία και στην εξάντληση των φυσικών πόρων. Ωστόσο, τα αποτελέσματα μπορούν να ταξινομηθούν σε περισσότερες κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων η οποία έχει επιλεγεί.

- **Χαρακτηρισμός (Characterization)**

Ο χαρακτηρισμός αποτελεί την αναλυτική προσέγγιση με την οποία τα ταξινομημένα πλέον αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου ποσοτικοποιούνται και εκφράζονται σε κοινές μονάδες και τα μετασηματισμένα αποτελέσματα προστίθενται ανά κατηγορία επιπτώσεων με αποτέλεσμα την ανάδειξη ενός συγκεκριμένου δείκτη για την κάθε κατηγορία. Αυτός ο μετασηματισμός γίνεται με τη χρήση επιστημονικά ορισμένων παραγόντων χαρακτηρισμού (characterization factors), οι οποίοι είναι γνωστοί και με την ονομασία «παραγόντες ισοδυναμίας» (“equivalency factors”) [40].

- **Κανονικοποίηση (Normalization) -προαιρετικό-**

Η κανονικοποίηση εκφράζει κατά πόσο ο δείκτης κάθε κατηγορίας επιπτώσεων έχει σχετικά μεγάλη ή μικρή τιμή σε σχέση με μία τιμή αναφοράς, η οποία είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς, οι τιμές που σχετίζονται με τη μέση ετήσια επίπτωση στο περιβάλλον ενός ευρωπαϊκού πολίτη. Με την κανονικοποίηση καθίσταται δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι

τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν άμεσα μόνο εντός μίας κατηγορίας επιπτώσεων, καθώς οι τιμές των διαφόρων κατηγοριών εξαρτώνται από τις τιμές αναφοράς που έχουν επιλεγεί για κάθε κατηγορία.

- **Ομαδοποίηση (Grouping) -προαιρετικό-**

Μετά το χαρακτηρισμό (ή και την κανονικοποίηση, σε περίπτωση που έχει προηγηθεί, οι κατηγορίες επιπτώσεων μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα ή περισσότερα ευρύτερα σύνολα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την ταξινόμηση αυτών με βάση χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα την επίδραση που έχουν σε διεθνές ή τοπικό επίπεδο, είτε με την κατάταξή τους βάσει μίας δεδομένης ιεραρχίας, όπως για παράδειγμα μίας υποκειμενικά ορισμένης ιεραρχίας προτεραιότητας των επιπτώσεων σε υψηλής, μεσαίας και χαμηλής προτεραιότητας. Εφόσον η ομαδοποίηση βασίζεται σε συγκεκριμένες επιλογές για την εκτίμηση της προτεραιότητας των επιπτώσεων, είναι μία υποκειμενική διαδικασία η οποία μπορεί να διαφέρει μεταξύ διαφόρων μελετών, ανάλογα με τις επιλογές που έχει κάνει ο εκάστοτε μελετητής. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου έχουν επιλεγεί πολλές κατηγορίες επιπτώσεων, η ομαδοποίηση μπορεί να διευκολύνει την κατανόηση των αποτελεσμάτων από τον αναγνώστη ή τον ενδιαφερόμενο [40].

- **Στάθμιση (Weighting) -προαιρετικό-**

Η στάθμιση αποτελεί το πιο υποκειμενικό από τα προαιρετικά βήματα της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Με τη στάθμιση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε κατηγορίας πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή, ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε κατηγορία, ώστε να προκύψουν σταθμισμένα αποτελέσματα/επιπτώσεις. Διαφορετικοί συντελεστές στάθμισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οι οποίοι ορίζονται με διαφορετικό τρόπο. Η στάθμιση καθιστά δυνατή την άθροιση των επιπτώσεων όλων των κατηγοριών σε έναν αριθμό. Έτσι, τα αποτελέσματα της μελέτης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για ένα προϊόν μπορούν να παρουσιαστούν ως μία μοναδική βαθμολογία (σκορ) περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Όσον αφορά τη στάθμιση, ο κανονισμός (ISO 14044) [38] αναφέρει πως δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε συγκριτικούς ισχυρισμούς και οι οποίες προορίζονται να δημοσιοποιηθούν.

2.2.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος

Το τελευταίο στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής περιλαμβάνει την περαιτέρω ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, την επεξήγηση των περιορισμών που υπήρχαν κατά τη διεξαγωγή της μελέτης, καθώς και την εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος βάσει των ευρημάτων των προηγούμενων σταδίων. Σε αυτό το στάδιο είναι σημαντικό να επικυρωθεί η αξιοπιστία και η ποιότητα των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό μπορεί να εξετασθεί κατά πόσο όλες οι σχετικές πληροφορίες και τα δεδομένα τα οποία είναι απαραίτητα για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι διαθέσιμα και πλήρη (έλεγχος πληρότητας-completeness check). Επίσης, μπορεί να γίνει μία ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity check), ώστε να ελεγχθεί πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα όταν γίνουν αλλαγές σε ορισμένες παραμέτρους και μεθοδολογικές επιλογές (των προηγούμενων σταδίων). Όμοια, πρέπει να καθοριστεί αν οι υποθέσεις, οι επιλεγμένες μέθοδοι και τα δεδομένα είναι σε συνοχή με το

στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Τέλος, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πρέπει να είναι κατανοητή, πλήρης και συνεπής, σε συμφωνία με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης

2.3. Βάσεις δεδομένων και λογισμικά

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων για το σύστημα είναι μία απαιτητική και χρονοβόρος διαδικασία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει έρευνα, επίσκεψη σε εργοστάσια και επικοινωνία με ειδικούς. Στην πραγματικότητα, είναι σχεδόν αδύνατη η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων που χρειάζονται για τη μοντελοποίηση όλων των διεργασιών που περιλαμβάνει ένα σύστημα. Βασικοί λόγοι για αυτό το σκοπό είναι ότι σε πολλές βιομηχανίες δεν γίνεται ακριβής καταγραφή ούτε της πλήρους λίστας των υλικών που χρησιμοποιούνται αλλά ούτε και των επιμέρους ηλεκτρικών και θερμικών καταναλώσεων. Επιπρόσθετα, η προμήθεια επιμέρους συνιστωσών, όπως παραδείγματος χάρη εναλλακτών θερμότητας, από διαφορετικούς κατασκευαστές δημιουργεί ακόμα μεγαλύτερα προβλήματα στην ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Αντίστοιχα, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και ο υπολογισμός των επιπτώσεων δε μπορεί να γίνει σε ένα απλό λογισμικό. Επομένως, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, συνήθως πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών και υπαρχόντων βάσεων δεδομένων καθώς και μέσω μιας σειράς παραδοχών, για τις οποίες θα γίνει ειδική αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού SimaPro v.8.5.2.0, ενώ ως πηγές δεδομένων χρησιμοποιούνται η βάση δεδομένων ecoinvent v.3.4 και η βιβλιογραφία.

Το λογισμικό SimaPro έχει αναπτυχθεί από την ολλανδική εταιρεία Pre Sustainability BV. Το SimaPro επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει έτοιμα σετ δεδομένων από κάποια βάση δεδομένων (π.χ. ecoinvent), ή να δημιουργήσει δικά του εισάγοντας διεργασίες σύμφωνα με δεδομένα που έχει συλλέξει ο ίδιος. Το λογισμικό υποστηρίζει όλη τη διαδικασία ανάλυσης κύκλου ζωής από τη δόμηση του καταλόγου απογραφής έως την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους εκτίμησης, ενώ τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν είτε γραφικά είτε σε μορφή πίνακα, ενώ μπορούν να εξαχθούν στο excel για περαιτέρω επεξεργασία.

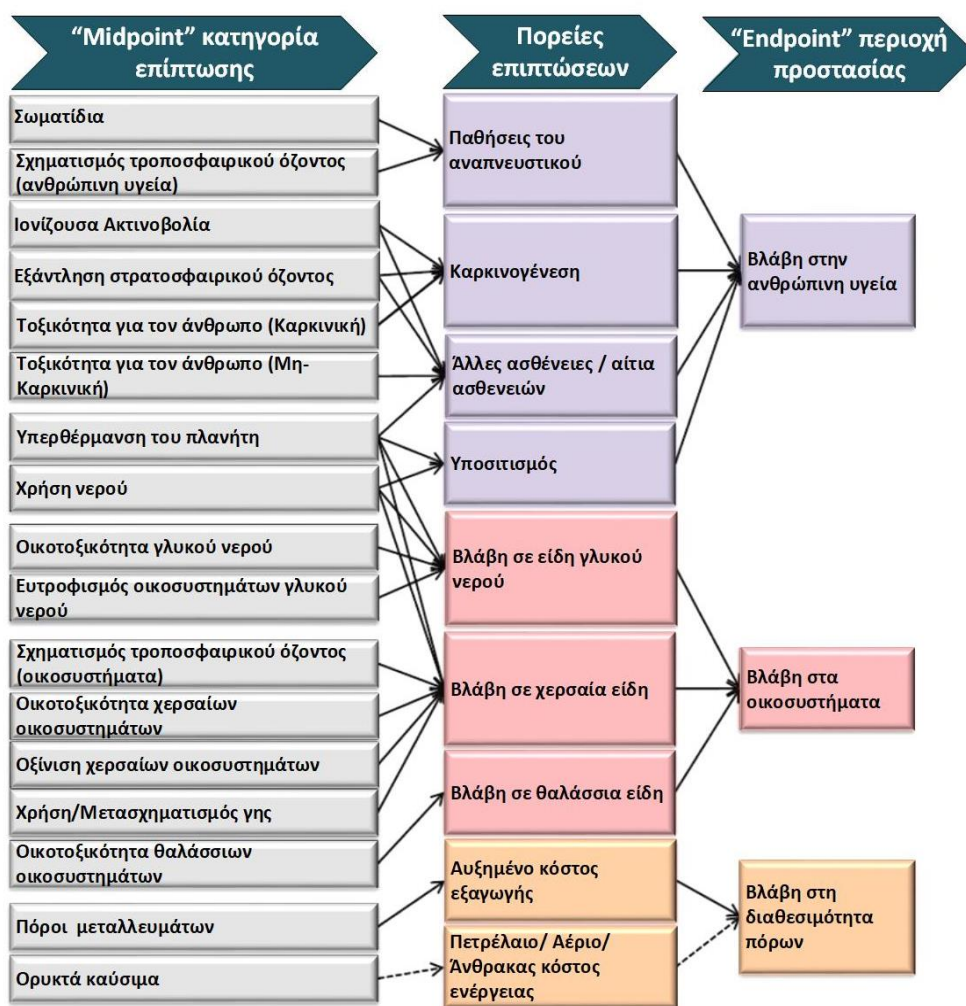
Η βάση δεδομένων ecoinvent είναι η πιο πλήρης και τεκμηριωμένη βάση δεδομένων, είναι διεθνώς αναγνωρισμένη και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών μελετών, από πολυεθνικές εταιρείες έως κορυφαία πανεπιστήμια. Περιέχει περισσότερα από 14700 σετ δεδομένων σε περιοχές όπως η προμήθεια ενέργειας, οι μεταφορές, τα χημικά, τα μέταλλα και οι διαδικασίες επεξεργασίας αυτών και η επεξεργασία των αποβλήτων.[41]

2.4. Η μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe 2016

Η ReCiPe 2016 είναι μία ενημερωμένη και εκτεταμένη εκδοχή της ReCiPe 2008, η οποία αναπτύχθηκε από το Ολλανδικό Βασιλικό Ινστιτούτο για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον (RIVM), το πανεπιστήμιο Ράντμπουρντ του Ναϊμέχεν στην Ολλανδία (Radboud University), το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών (CML) του πανεπιστημίου Λέιντεν στην Ολλανδία (Leiden University), και την Pre Sustainability BV και αποτελεί συνδυασμό δύο μεθόδων εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων: της “midpoint” προσανατολισμένης CML 2002 και της “endpoint” προσανατολισμένης Eco-Indicator 99 [42].

Σε επίπεδο “midpoint” περιλαμβάνονται δεκαοκτώ (18) κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες ορίζονται στο σημείο εκείνο στο οποίο υπεισέρχονται μηχανισμοί κοινού για αρκετά είδη ουσιών. Για παράδειγμα, η οξίνιση περιλαμβάνει μια ολόκληρη σειρά βημάτων, ξεκινώντας με την απελευθέρωση των όξινων ουσιών και τελειώνοντας με τις επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Κάπου σε αυτή την πορεία (pathway), υπάρχει ένα σημείο στο οποίο οι ουσίες οξίνισης έχουν επίδραση στον κορεσμό κατιόντων βάσης του εδάφους (BCS). Άλλες ουσίες οξίνισης έχουν διαφορετικές πορείες πριν φτάσουν σε αυτό το σημείο, αλλά όλες έχουν την ίδια πορεία πέρα από αυτό. Σε αυτό το επίπεδο ο χαρακτηρισμός έχει πιο ισχυρή σχέση με τις περιβαλλοντικές ροές και σχετικά χαμηλή αβεβαιότητα.

Σε επίπεδο “endpoint”, όπως σχηματικά φαίνεται και στην Εικ. 2.2, οι περισσότερες από τις κατηγορίες επιπτώσεων του προηγούμενου επιπέδου, επεξεργάζονται περαιτέρω και αθροίζονται σε τρεις κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε περιοχές προστασίας που αποτελούν τη βάση λήψης αποφάσεων στην πολιτική και την αειφόρο ανάπτυξη. Στον περιβαλλοντικό τομέα στη ReCiPe περιλαμβάνονται τρεις περιοχές προστασίας: η ανθρώπινη υγεία, η ποιότητα του οικοσυστήματος και η εξάντληση πόρων. Ο χαρακτηρισμός στο επίπεδο “endpoint” ενώ παρέχει καλύτερη πληροφόρηση σε σχέση με την περιβαλλοντική συνάφεια των περιβαλλοντικών ροών, παρουσιάζει μεγαλύτερη αβεβαιότητα.



Εικ. 2.2 Επισκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας [43]

1. Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “midpoint”

Οι κατηγορίες επιπτώσεων που ακολουθούν έχουν ληφθεί από την Pre Sustainability BV [43].

Κλιματική αλλαγή (Climate change): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της κλιματικής αλλαγής είναι το δυναμικό αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη (βασισμένο στην έκθεση IPCC 2013). Για την ατομικιστική προοπτική χρησιμοποιήθηκε χρονικός ορίζοντας 20 χρόνων, ενώ για την ιεραρχική και την εξισωτική, χρησιμοποιήθηκαν χρονικοί ορίζοντες 100 και 1000 χρόνων αντίστοιχα. Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg CO₂ στον αέρα.

Εξάντληση του όζοντος (Ozone depletion): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της εξάντλησης του στρώματος του όζοντος αντιστοιχεί στην καταστροφή της στοιβάδας του στρατοσφαιρικού όζοντος από τις ανθρωπογενείς εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον (Ozone Depleting Substances – ODS). Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg τριχλωροφθορομεθανίου (CFC – 11).

Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού για την ιονίζουσα ακτινοβολία αντιστοιχεί στο επίπεδο έκθεσης για τον παγκόσμιο πληθυσμό. Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kBq κοβαλτίου-60 στον αέρα.

Σχηματισμός σωματιδίων (Fine particulate matter formation): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού του σχηματισμού σωματιδίων είναι το ποσοστό λήψης σωματιδίων PM_{2.5}. Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg σωματιδίων PM_{2.5}.

Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, χερσαίων οικοσυστημάτων (Photochemical ozone formation, terrestrial ecosystems): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού καθορίζεται από τη δημιουργία όζοντος λόγω της εκπομπής πρόδρομων ουσιών – οξειδίων του αζώτου (NO_x) και πτητικών οργανικών ενώσεων πλην μεθανίου (NMVOC). Η μονάδα αναφοράς για την δυνατότητα παραγωγής όζοντος στο οικοσύστημα είναι τα ισοδύναμα kg NO_x.

Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία (Photochemical ozone formation, human health): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού καθορίζεται από τη δημιουργία όζοντος λόγω της εκπομπής οξειδίων του αζώτου (NO_x) και πτητικών οργανικών ενώσεων πλην μεθανίου (NMVOC). Η μονάδα αναφοράς για την δυνατότητα παραγωγής όζοντος στο οικοσύστημα είναι τα ισοδύναμα kg NO_x.

Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων (Terrestrial acidification): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της χερσαίας οξίνισης είναι το Δυναμικό Οξίνισης (Acidification Potential – AP), προερχόμενο από τη χρήση του σταθμισμένου παγκοσμίου μέσου για τον παράγοντα πορείας (fate factor) του διοξειδίου του θείου (SO₂). Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg διοξειδίου του θείου (SO₂).

Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού (Freshwater eutrophication): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού του ευτροφισμού γλυκού νερού αντιστοιχεί στην παραμονή στα οικοσυστήματα του γλυκού νερού των εκπεμπόμενων θρεπτικών ουσιών που περιέχουν φώσφορο. Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg φωσφόρου (P) σε γλυκό νερό.

Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Marine eutrophication): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού του θαλάσσιου ευτροφισμού αντιστοιχεί στην παραμονή στα θαλάσσια οικοσυστήματα των εκπεμπόμενων θρεπτικών ουσιών που περιέχουν φώσφορο). Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg αζώτου (N) σε θαλασσινό νερό.

Τοξικότητα για τον άνθρωπο και οικοτοξικότητα (Human toxicity and ecotoxicity): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της ανθρώπινης τοξικότητας και οικοτοξικότητας αντιστοιχεί στην παραμονή και συσσώρευση στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα και τοξικότητα μιας χημικής ουσίας. Η μονάδα αναφοράς είναι τα kg εκπεμπόμενου 1,4 διχλωροβενζολίου (1,4 - DBC).

Χρήση γης (Land use): Το σύνολο της γης που μετασχηματίζεται ή χρησιμοποιείται για δεδομένο χρονικό διάστημα. Η μονάδα αναφοράς είναι τα τετραγωνικά μέτρα (m²).

Χρήση νερού (Water use): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού για την χρησιμοποίηση του νερού είναι το ποσό του γλυκού νερού που καταναλώνεται. Η μονάδα αναφοράς είναι τα κυβικά μέτρα (m³) καταναλισκόμενου νερού.

Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (Mineral resource scarcity): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της έλλειψης πόρων μεταλλευμάτων είναι η δυναμικότητα του πλεονάζοντος μεταλλεύματος. Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg χαλκού (Cu).

Εξάντληση ορυκτών πόρων (Fossil resource scarcity): Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της έλλειψης ορυκτών πόρων είναι η δυναμικότητα των ορυκτών καυσίμων, βασισμένη στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη. Η μονάδα αναφοράς είναι τα ισοδύναμα kg πετρελαίου.

II. Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “endpoint” (Εκτίμηση βλαβών)

Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία (Damage to Human Health – HH): Η ζημία στην ανθρώπινη υγεία εκτιμάται χρησιμοποιώντας την έννοια των «αναπροσαρμοσμένων λόγω αναπηρίας ετών ζωής» (disability-adjusted life years – DALY). Τα DALY μιας νόσου προέρχονται από στατιστικά στοιχεία για την υγεία του ανθρώπου όσον αφορά τόσο τα έτη που χάνονται όσο και αυτά που βιώνονται με αναπηρία [42]. Η ζημία ενός (1) DALY σημαίνει «απώλεια ενός έτους από τη ζωή ενός ατόμου, ή τέσσερα έτη ζωής με αναπηρία η οποία έχει βαρύτητα 0.25» [44].

Βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων (Damage to Ecosystem Diversity – ED): Στη ReCiPe, γίνεται η παραδοχή ότι η ποιότητα των οικοσυστημάτων εκφράζεται επαρκώς από την ποικιλία των ειδών [42]. Επομένως, η ζημία στην ποιότητα των οικοσυστημάτων εκφράζεται ως η απώλεια (loss) ειδών σε μία συγκεκριμένη περιοχή (χερσαία ή υδάτινη) και σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων (Damage to Resource Availability – RA): Η ζημία στη διαθεσιμότητα των πόρων βασίζεται στη γεωλογική κατανομή των μεταλλευμάτων και των ορυκτών πόρων και στην αξιολόγηση της αύξησης του οριακού κόστους της μελλοντικής εξόρυξης πόρων, (σε ένα απεριόριστο χρονικό πλαίσιο), ως αποτέλεσμα της συνεχούς εξόρυξης, δηλαδή της εξάντλησης των αποθεμάτων όσον αφορά τα μεταλλεύματα και της ανάγκης για εκμετάλλευση λιγότερο συμβατικών καυσίμων όσον αφορά τα ορυκτά καύσιμα [42]. Το κόστος εκφράζεται σε δολάρια (USD2013), θεωρώντας προεξοφλητικό επιτόκιο 3%.

III. Προοπτικές

Είναι φανερό ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των παραγόντων χαρακτηρισμού είναι πηγή αβεβαιότητας και αντικατοπτρίζουν τη μη ολοκληρωμένη και αβέβαιη γνώση των περιβαλλοντικών μηχανισμών που συμμετέχουν στην κλιματική αλλαγή, την οξίνιση και σε άλλες κατηγορίες επιπτώσεων. Στη ReCiPe 2016, όπως και στην Eco-indicator 99, έχει αποφασιστεί η ομαδοποίηση των διαφορετικών πηγών αβεβαιότητας και των διαφορετικών επιλογών σε ένα περιορισμένο αριθμό προοπτικών ή σεναρίων, σύμφωνα με την «Πολιτιστική Θεωρία» (“Cultural Theory”) του Thompson (1990) [45]. Οι προοπτικές αυτές δεν ισχυρίζονται ότι εκπροσωπούν αρχέτυπα της ανθρώπινης συμπεριφοράς, αλλά απλώς χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση παρόμοιων τύπων υποθέσεων και επιλογών.

Στη ReCiPe 2016 συμπεριλαμβάνονται τρεις προοπτικές [46]:

- Η ατομικιστική (“individualist (I)”) προοπτική, η οποία βασίζεται στο βραχυπρόθεσμο ενδιαφέρον (20 χρόνια), στους τύπους επιπτώσεων που είναι αδιαμφισβήτητοι και στην τεχνολογική αισιοδοξία όσον αφορά την ανθρώπινη προσαρμογή.
- Η ιεραρχική (“hierarchist (H)”) προοπτική, η οποία βασίζεται στην επιστημονική συναίνεση, όσον αφορά το χρονικό πλαίσιο (100 χρόνια) και την αξιοπιστία των μηχανισμών επίπτωσης.
- Η εξισωτική (“egalitarian (E)”) προοπτική, η οποία είναι η πιο συντηρητική προοπτική, η οποία λαμβάνει υπόψη της το μεγαλύτερο χρονικό πλαίσιο (1000 χρόνια ή περισσότερο) και όλα τα είδη επιπτώσεων για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

IV. Κανονικοποίηση και στάθμιση

Οι παράγοντες κανονικοποίησης και στάθμισης για τη ReCiPe 2016 δεν έχουν δημοσιευθεί ακόμα [43].

Κεφάλαιο 3. Περιγραφή της εγκατάστασης

3.1. Εισαγωγή

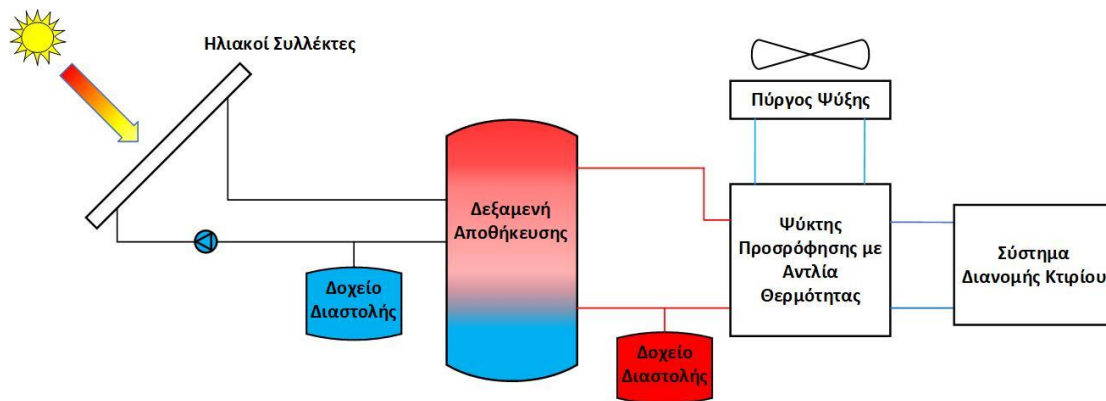
Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ένα καινοτόμο, υβριδικό σύστημα για την πλήρη κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης κτηρίων μικρής κλίμακας και υψηλής ενεργειακής απόδοσης, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ZEOSOL. Το νέο σύστημα αποτελεί το συνδυασμό ενός υπάρχοντος καινοτόμου ψύκτη προσρόφησης με ζεόλιθο (Adsorption Chiller), μίας εφεδρικής αντλίας θερμότητας (Back-up heat pump) και ενός ξηρού πύργου ψύξης (Dry cooler) σε μία ενιαία μονάδα. Τον ψύκτη προσρόφησης τροφοδοτούν ηλιακοί συλλέκτες κενού, οι οποίοι έχουν βελτιστοποιηθεί ώστε να έχουν την υψηλότερη δυνατή απόδοση με το μικρότερο δυνατό μέγεθος. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι κύριες συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται η υπό εξέταση εγκατάσταση.

3.2. Αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης

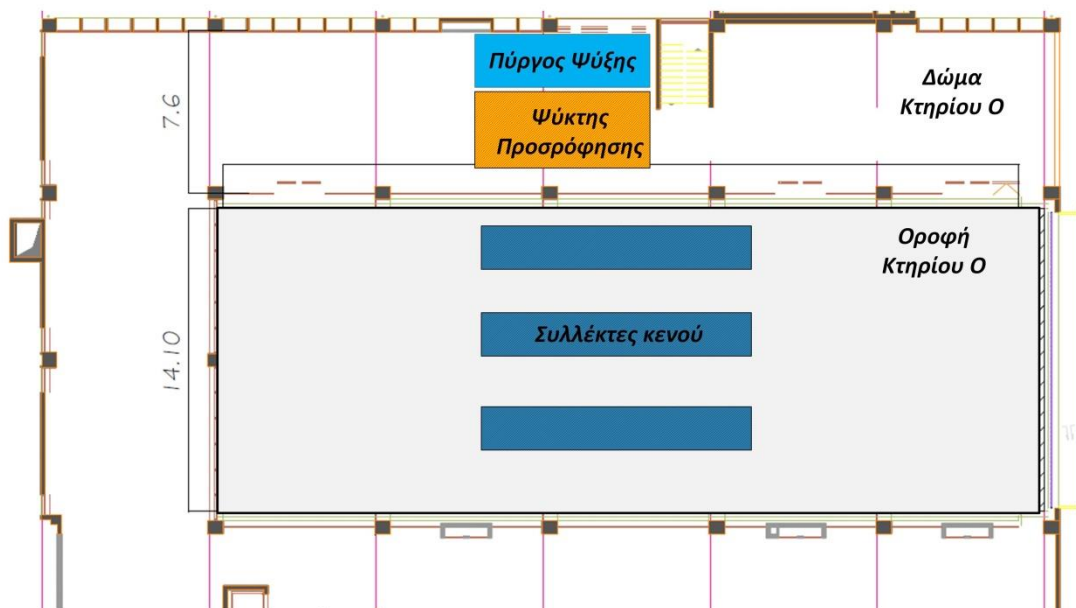
Η εγκατάσταση, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στις Εικ. 3.1 και Εικ. 3.2, αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια μέρη:

- Ηλιακοί Συλλέκτες κενού (ETC).
- Δεξαμενή αποθήκευσης (αισθητής) θερμότητας (Thermal Storage Unit).
- Ψύκτης προσρόφησης (Adsorption Chiller)
- Βοηθητική αντλία θερμότητας (Back-up heat pump)
- Ξηρός πύργος ψύξης (Dry cooler)

Οι ηλιακοί συλλέκτες απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, τη μετατρέπουν σε θερμότητα και την προσδίδουν στο ρευστό μεταφοράς που τους διαρρέει. Στη συνέχεια, η θερμότητα μεταφέρεται, μέσω εναλλακτών θερμότητας, στη δεξαμενή αποθήκευσης, φορτίζοντας θερμικά το περιεχόμενό της. Ο ψύκτης προσρόφησης λειτουργεί μεταξύ τριών θερμοκρασιακών επιπέδων: υψηλής (HT), μέσης (MT) και χαμηλής (LT) θερμοκρασίας. Το κύκλωμα νερού HT, τροφοδοτείται από το δοχείο αποθήκευσης στο οποίο το νερό βρίσκεται σε θερμοκρασία περί τους 95 °C (Εικ. 3.1). Το κύκλωμα νερού MT, παραλαμβάνει τη θερμότητα της προσρόφησης και της συμπύκνωσης, την οποία απορρίπτει στο περιβάλλον μέσω του πύργου ψύξης. Τέλος, το κύκλωμα LT συνδέεται με το σύστημα διανομής του κτηρίου καλύπτοντας τα ψυκτικά φορτία αυτού. Από την άλλη πλευρά, η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για την κάλυψη φορτίων αιχμής (peak loads). Ο ατμοποιητής της αντλίας είναι συνδεδεμένος στην έξοδο του νερού LT, ενώ ο συμπυκνωτής συνδέεται με την έξοδο του κυκλώματος MT, το οποίο παραλαμβάνει τη θερμότητα συμπύκνωσης του κύκλου μηχανική συμπίεσης. Η σύνδεση της αντλίας θερμότητας με τον ψύκτη προσρόφησης δίνεται σχηματικά στην Εικ. 3.4.



Εικ. 3.1. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης



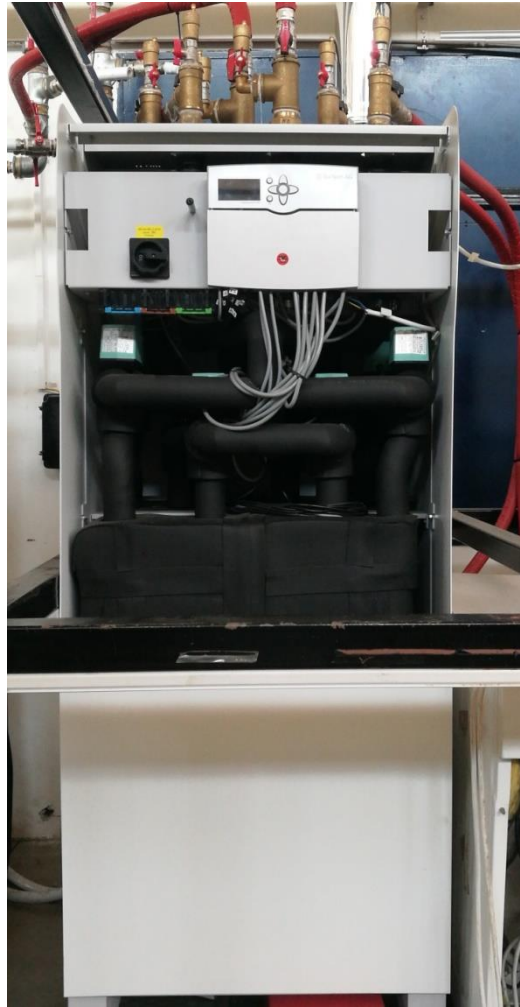
Εικ. 3.2. Κάτοψη της εγκατάστασης της διάταξης

3.3. Ψύκτης προσρόφησης

Το σύστημα περιλαμβάνει ένα μονοβάθμιο ψύκτη προσρόφησης, δύο θαλάμων ρόφησης, ο σχεδιασμός- συναρμολόγηση του οποίου, έγινε από τη γερμανική εταιρεία Fahrenheit. Ο ψύκτης χρησιμοποιεί ως προσροφητικό υλικό τη χημική ένωση φωσφορικό αργίλιο (AIPO-5) και ως ψυκτικό μέσο το νερό. Το φωσφορικό αργίλιο έχει δομή παρόμοια με αυτή των ζεολίθων, ενώ εκροφά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ($\ll 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) σε σχέση με άλλα προσροφητικά υλικά, το οποίο είναι απαραίτητο ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερο εύρος στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμότητα από τους συλλέκτες.

Όσον αφορά τα επιμέρους στοιχεία, τόσο οι εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι είναι επικαλυμμένοι με το προσροφητικό υλικό, καθώς και ο συμπυκνωτής και ο ατμοποιητής είναι τύπου πτερυγίων/σωλήνων (fin/tube). Τα υπόλοιπα μέρη, (υδραυλικά, όργανα ελέγχου κλπ.) έχουν επιλεγεί ανάμεσα σε υπάρχουσες εμπορικές λύσεις, προσαρμοζόμενα στη γεωμετρία και τις τεχνικές προδιαγραφές του συγκεκριμένου ψύκτη.

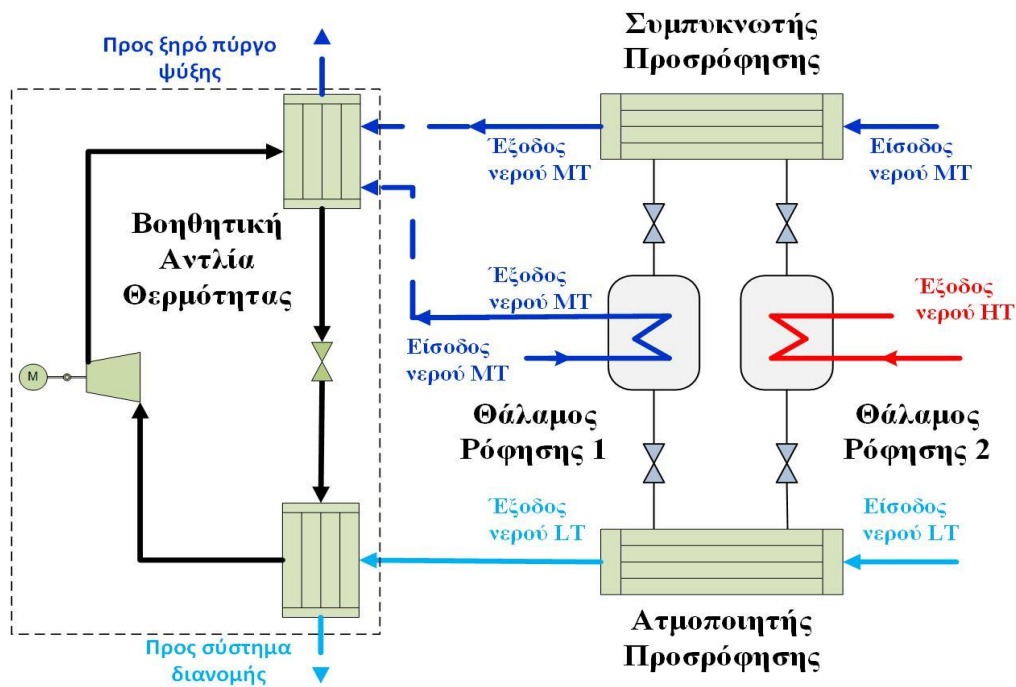
Στην Εικ. 3.3 παρουσιάζεται ένας παρόμοιος ψύκτης προσρόφησης της ίδιας εταιρείας, ενώ στον Πιν. 3.1 συγκεντρώνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Εικ. 3.3. Ψύκτης προσρόφησης eZea της εταιρείας Fahrenheit.

Πιν. 3.1 Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του ψύκτη προσρόφησης eZea της εταιρείας Fahrenheit. [47]

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Ονομαστική Ισχύς	12	kW
Μέγιστος COP	0.65	-
Διαστάσεις (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)	670 x 560 x 1652	mm
Βάρος	234.5	kg



Εικ. 3.4. Σχηματική απεικόνιση της εσωτερικής διάταξης του ψύκτη προσρόφησης και της βοηθητικής αντλίας θερμότητας της εγκατάστασης

3.4. Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Η διάταξη περιλαμβάνει μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας συνολικής χωρητικότητας 1000 lt (Εικ. 3.5), η οποία κατασκευάζεται από την εταιρεία AkoTec GmbH. Σκοπός της δεξαμενής είναι η αποθήκευση θερμότητας και η δυνατότητα παροχής θερμού νερού στον ψύκτη, κατά τα διαστήματα στα οποία δεν υπάρχει παραγωγή θερμότητας από τους συλλέκτες. Η δεξαμενή χρησιμοποιεί ως μέσο αποθήκευσης το νερό, ενώ διαθέτει δύο εσωτερικούς εναλλάκτες (υπό μορφή περιελίξεων) μέσω των οποίων μεταφέρεται σε αυτό η θερμότητα που συλλέγουν οι συλλέκτες κενού, καθώς και μόνωση (άκαμπτου) αφρού πολουρεθάνης (rigid PU foam) ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες προς το περιβάλλον. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής συγκεντρώνονται στον Πιν. 3.2.



Εικ. 3.5. Απεικόνιση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας

Πιν. 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας

Τύπος	PSRR-1000	
Βάρος (Άδειο)	175	kg
Ονομαστική Χωρητικότητα	1000	lt
Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας	10	bar
Μέγιστη Θερμοκρασία	95	°C
Πάχος Μόνωσης	100	mm

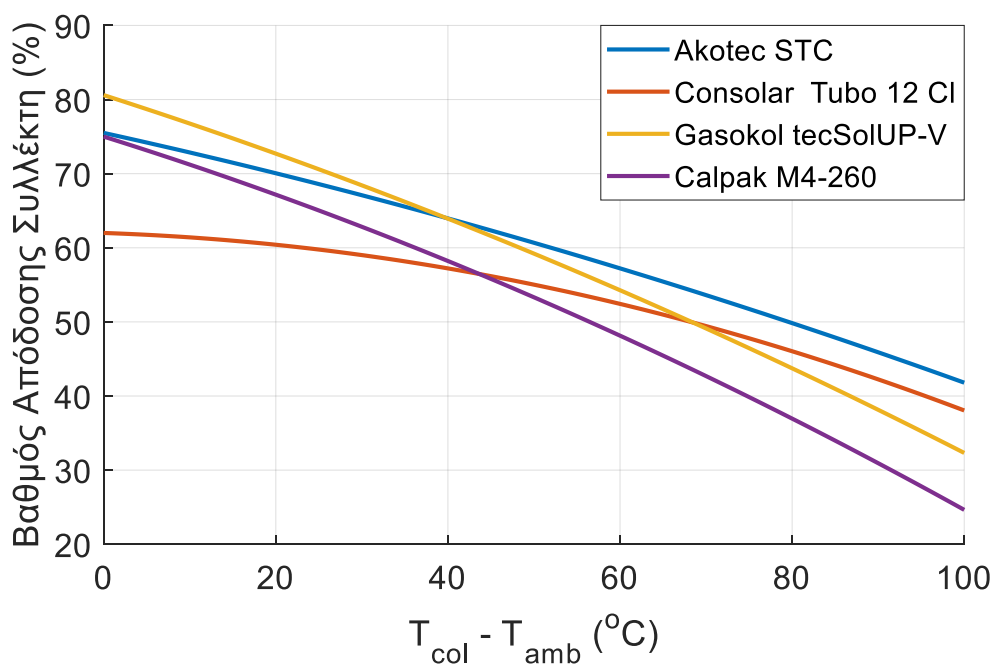
3.5. Ηλιακοί συλλέκτες κενού

Οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται στη διάταξη αναπτύχθηκαν από τη γερμανική εταιρία AkoTec GmbH. Πρόκειται για συλλέκτες κενού θερμικών σωλήνων (heat-pipe) με «αρθρωτή» (modular) σχεδίαση. Με τον τελευταίο όρο εννοείται ότι ο σωλήνας συλλογής δεν είναι ενιαίος, αλλά σε κάθε σωλήνα κενού αντιστοιχεί ένα τμήμα του. Κατά τη συναρμολόγηση του συλλέκτη, τα επιμέρους τμήματα ενώνονται, σχηματίζοντας έναν ενιαίο σωλήνα συλλογής. Αυτή η σχεδίαση, επιτρέπει την εύκολη μεταβολή του αριθμού των σωλήνων κενού ανά συλλέκτη τη σύνδεση σε μία μονάδα έως και 250 σωλήνων με μέγιστη ισχύ έως 250 kW, ενώ παράλληλα μειώνονται οι απαιτήσεις της εγκατάστασης σε στήριξη και σωληνώσεις [48]. Στην Εικ. 3.6 παρουσιάζεται ένα τμήμα εκ των συλλεκτών που περιλαμβάνει η εγκατάσταση, ενώ στην Εικ. 3.7 δίνεται ο βαθμός απόδοσης των συλλεκτών (AkoTec STC) σε σύγκριση με άλλους συλλέκτες. Είναι φανερό η πτώση της απόδοσης των επίπεδων συλλεκτών (Gasokol tecSolUP-V, Calpak M4-260) σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην προσρόφηση.

Στο κύκλωμα των συλλεκτών υπάρχει επιπλέον δοχείο διαστολής (Εικ. 3.8) το οποίο παραλαμβάνει τις μεταβολές όγκου του νερού λόγω αλλαγών στη θερμοκρασία του.



Εικ. 3.6. Τμήμα του ηλιακού συλλέκτη κενού από το εργοστάσιο της εταιρείας AkoTec



Εικ. 3.7. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για διάφορους εμπορικούς συλλέκτες



Εικ. 3.8. Δοχείο διαστολής κυκλώματος συλλεκτών

3.6. Βοηθητική αντλία θερμότητας

Η αντλία θερμότητας αποτελείται από ένα σπειροειδή συμπιεστή ερμητικού τύπου της εταιρείας Copeland. Ο συμπιεστής κινείται με τη χρήση ενός ηλεκτρικού κινητήρα, ενώ ως ψυκτικό μέσο έχει επιλεγθεί το R-134a, από τα πιο διαδεδομένα ψυκτικά μέσα για σχετικές εφαρμογές. Ο συμπυκνωτής καθώς και ο ατμοποιητής της διάταξης είναι πλακοειδείς εναλλάκτες της εταιρείας Kelvion GmbH. Ορισμένα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή και των εναλλακτών θερμότητας δίνονται στον Πιν. 3.3.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αντλία θερμότητας είναι τοποθετημένη μαζί με τον ψύκτη προσρόφησης (στο ίδιο κέλυφος). Στην Εικ. 3.9, απεικονίζεται η αντλία θερμότητας, καθώς και η σύνδεσή της με τον ψύκτη προσρόφησης, μέσω των πλακοειδών εναλλακτών.



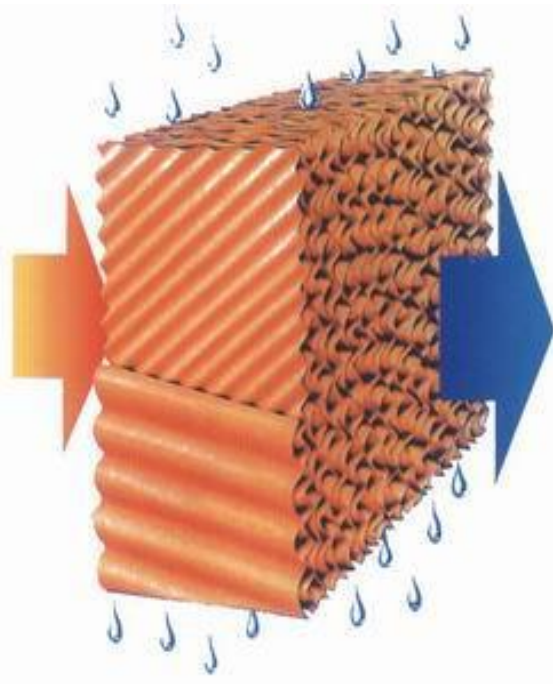
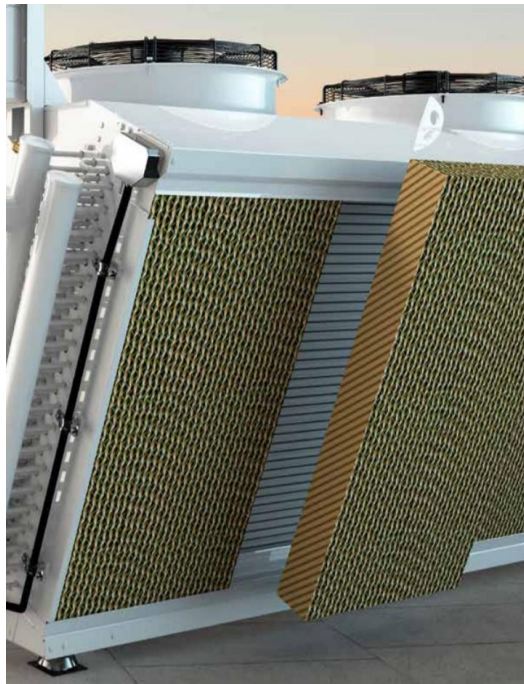
Εικ. 3.9. Απεικόνιση της βοηθητικής αντλίας θερμότητας

Πιν. 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας θερμότητας [49, 50]

Συμπιεστής		
Μοντέλο	ZR144KCE-TFD	-
Μεγέθη απόδοσης στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας		
Ψυκτική Ισχύς	31	kW
Ηλεκτρική Ισχύς τροφοδοσίας	5,92	kW
COP	5.23	-
Διαστάσεις (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)	264 x 285 x 533	mm
Βάρος (Καθαρό)	61.2	kg
Εναλλάκτες		
Μοντέλο	GBS 500H	-
Διαστάσεις	143 x 124 x 532	mm
Βάρος (Περίπου)	15	kg

3.7. Ξηρός πύργος ψύξης

Η εγκατάσταση περιλαμβάνει έναν ξηρό πύργο ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα. Ο πύργος ψύξης έχει διαμόρφωση σχήματος «V», η οποία ελαχιστοποιεί το μέγεθός του, ενώ διαθέτει σύστημα αδιαβατικής προ-ψύξης του αέρα περιβάλλοντος μέσω του φαινομένου της εξατμιστικής ψύξης (Εικ. 3.10). Το σύστημα αποτελείται από ένα χάρτινο μπλοκ κυματοειδούς διαμόρφωσης, το οποίο τοποθετείται πριν τους εναλλάκτες και το οποίο ψεκάζεται συνεχώς με νερό. Μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πύργου ψύξης ο οποίος μελετήθηκε για την εγκατάσταση συγκεντρώνονται στον Πιν. 3.4. Στην πραγματικότητα, λόγω αυξημένου κόστους κατασκευής επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί εμπορικός πύργος ψύξης παρόμοιων προδιαγραφών.



Εικ. 3.10. Τρισδιάστατη απεικόνιση του ξηρού πύργου ψύξης με σύστημα αδιαβατικής ψύξης

Πιν. 3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ξηρού πύργου ψύξης

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Ονομαστική Ισχύς	37.5	kW
Αριθμός Ανεμιστήρων	2	-
Παροχή όγκου αέρα	32354	m ³ /h
Παροχή όγκου μέσου μεταφοράς θερμότητας	6.51	m ³ /h
Ηλεκτρική Ισχύς	2.42	kW
Διαστάσεις (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)	2496 x 1200 x 1489	mm

Κεφάλαιο 4. AKZ για το εξεταζόμενο σύστημα

4.1. Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης

4.1.1 Στόχος της μελέτης

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός καινοτόμου υβριδικού συστήματος ψύξης, τα κύρια μέρη του οποίου παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 καθώς και ο εντοπισμός των συνιστωσών της διάταξης και των διεργασιών εκείνων που έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Επιπλέον, αφού γίνει η AKZ του υπό μελέτη συστήματος, πραγματοποιείται σύγκριση με την επικρατέστερη εναλλακτική τεχνολογία ψύξης, τη συμβατική αντλία θερμότητας - η οποία στην παρούσα περίπτωση είναι τύπου αέρα - νερού (air - water) - προκειμένου να διαπιστωθεί και να ποσοτικοποιηθεί το περιβαλλοντικό όφελος της προτεινόμενης διάταξης.

4.1.2 Πεδίο Εφαρμογής της μελέτης

I. Λειτουργία του συστήματος

Η κύρια λειτουργία του συστήματος, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, είναι ο κλιματισμός κτηρίων μικρού μεγέθους, για τη διατήρηση συνθηκών άνεσης εντός αυτών. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης θεωρείται λειτουργία του συστήματος μόνο για την παροχή ψύξης, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

II. Το υπό εξέταση σύστημα και τα όρια του συστήματος

Στην παρούσα μελέτη το υπό εξέταση σύστημα περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες του συστήματος ψύξης, δηλαδή τον ψύκτη προσρόφησης, τους ηλιακούς συλλέκτες, το δοχείο αποθήκευσης, τον ξηρό πύργο ψύξης και όλα τα υπόλοιπα μέρη. Στο σύστημα δε συμπεριλαμβάνεται το δίκτυο διανομής του νερού ψύξης εντός του εκάστοτε κτηρίου.

Η μελέτη περιλαμβάνει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του συστήματος ψύξης, από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την επεξεργασία τους, τη διαδικασία κατασκευής των επιμέρους συνιστωσών αυτού, τη χρήση, τη συντήρηση και τελικά τις διεργασίες που σχετίζονται με το τέλος της ζωής του, οι οποίες στην παρούσα μελέτη επιλέγονται να είναι η ανακύκλωση, η ταφή και η αποτέφρωση των αποβλήτων.

Ως προς τα γεωγραφικά όρια του υπό μελέτη συστήματος ισχύουν τα παρακάτω: ο ψύκτης προσρόφησης, οι ηλιακοί συλλέκτες κενού και το δοχείο αποθήκευσης κατασκευάζονται στη Γερμανία, ενώ οι υπόλοιπες συνιστώσες της διάταξης σε ευρωπαϊκές χώρες. Η τελική σύνδεση των επιμέρους συνιστωσών γίνεται στην τοποθεσία εγκατάστασης της διάταξης, η οποία για την παρούσα μελέτη είναι η Ελλάδα. Ωστόσο, δεν είναι γνωστή η προέλευση των πρώτων υλών για την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων. Επομένως, έχουν χρησιμοποιηθεί όπου είναι δυνατό δεδομένα αντιπροσωπευτικά για την εκάστοτε χώρα,

ενώ για τα υπόλοιπα έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα αντιπροσωπευτικά για την παγκόσμια αγορά. Οι κατεργασίες για την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών έχουν θεωρηθεί ότι πραγματοποιούνται εντός της ευρωπαϊκής ηπείρου.

Αντίστοιχα, όλες οι συνιστώσες της συμβατικής αντλίας θερμότητας έχει θεωρηθεί ότι κατασκευάζονται στην Ευρώπη.

Όσον αφορά τα χρονικά όρια του συστήματος, και για τα δύο συστήματα ψύξης έχει επιλεγεί διάρκεια ζωής ίση με είκοσι (20) χρόνια, ενώ η λειτουργία τους εξετάζεται μόνο κατά τη θερινή περίοδο, δηλαδή μόνο για την παραγωγή ψύξης.

III. Λειτουργική μονάδα

Η λειτουργική μονάδα για τη συγκεκριμένη μελέτη έχει επιλεγεί ίση με «μία (1) kWh παραγόμενης ψυκτικής ενέργειας από την υπό μελέτη διάταξη για την ψύξη εσωτερικού χώρου».

Η επιλογή της παραπάνω λειτουργικής μονάδας είναι κοινή για συστήματα κλιματισμού (ψύξης και θέρμανσης) [51], ενώ επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων τεχνολογιών ψύξης. Εναλλακτικά, συχνά χρησιμοποιείται ως λειτουργική μονάδα ολόκληρο το υπό εξέταση σύστημα και η λειτουργία του για όλη τη διάρκεια ζωής του. Ωστόσο, η επιλογή αυτής της λειτουργικής μονάδας δεν επιτρέπει την άμεση σύγκριση των διαφόρων συστημάτων.

IV. Απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της μελέτης προέρχονται από τις παρακάτω πηγές:

Τα δεδομένα που αφορούν τις τεχνικές προδιαγραφές και την κατασκευή όλων των συνιστωσών της εγκατάστασης παρέχονται από του κατασκευαστές των αντίστοιχων κομματιών, μέσω ερωτηματολογίων και επικοινωνίας με τις εταιρείες. Επιπλέον, όπου τα δεδομένα που παρέχονταν δεν κρίθηκαν επαρκή, πραγματοποιήθηκαν προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη βιβλιογραφία καθώς και προσωπικές εκτιμήσεις. Τα δεδομένα για τη συμβατική αντλία θερμότητας έχουν συλλεχθεί αποκλειστικά από τη βιβλιογραφία.

Για τη μοντελοποίηση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από τις διάφορες πηγές χρησιμοποιείται η βάση δεδομένωνecoinvent v. 3.4. Ηecoinvent, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι μία ώριμη και ευρέως αναγνωρισμένη βάση δεδομένων, τα δεδομένα της οποίας θεωρούνται έγκυρα έως τη στιγμή διεξαγωγής της μελέτης [41].

Ωστόσο, λόγω της διαφορετικής προέλευσης των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, υπεισέρχονται σημεία αβεβαιότητας στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε στο τελικό στάδιο ανάλυση ευαισθησίας ως προς ορισμένες παραδοχές, ώστε να διερευνηθεί ο αντίκτυπός τους στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διάταξης.

V. Επιλογή μεθόδου εκτίμησης επιπτώσεων

Στην παρούσα μελέτη ως μέθοδοι ανάλυσης των επιπτώσεων έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν οι ReCiPe 2016 Midpoint v.1.02 και η ReCiPe 2016 Endpoint v.1.02 υπό την ιεραρχική προοπτική (Hierarchist, H). Περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο ReCiPe μπορούν να βρεθούν στην ενότητα 2.4 όπου παρουσιάζεται αναλυτικά.

VI. Περιορισμοί της μελέτης και υποθέσεις – προσεγγίσεις

Θεωρητικά, μία μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα υλικά και την ενέργεια που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του εκάστοτε προϊόντος ή υπηρεσίας. Ωστόσο, στην πράξη είναι απαραίτητη η εφαρμογή παραδοχών και προσεγγίσεων για τη μοντελοποίηση των διεργασιών του συστήματος, κυρίως λόγω έλλειψης χρόνου, πόρων και δεδομένων.

Οι κύριες παραδοχές που έγιναν στη παρούσα μελέτη περιγράφονται παρακάτω:

- Η μοντελοποίηση του υπό εξέταση συστήματος, δηλαδή των πρώτων υλών από τις οποίες αποτελούνται τα διάφορα μέρη του καθώς και των διαδικασιών κατασκευής αυτών, έγινε με απλοποιημένο τρόπο. Λόγω έλλειψης δεδομένων, ορισμένα από τα υλικά και τις κατεργασίες αυτών μοντελοποιήθηκαν με το πιο συναφές προς αυτά υλικό ή κατεργασία από τη βάση δεδομένων της ecoinvent. Επιπλέον, τα σετ δεδομένων της ecoinvent όπου ήταν απαραίτητο τροποποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά των διαδικασιών κατασκευής. Όσον αφορά την προέλευση των πρώτων υλών, για όσες υπήρχαν πληροφορίες έχουν χρησιμοποιηθεί τα αντίστοιχα πιο αντιπροσωπευτικά σετ δεδομένων. Στην περίπτωση όπου η προέλευση ήταν άγνωστη χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα σετ δεδομένων για την παγκόσμια αγορά. Οι κατεργασίες των πρώτων υλών (διαδικασίες παραγωγής) για την κατασκευή των συνιστωσών του υπό εξέταση συστήματος έχουν θεωρηθεί ότι πραγματοποιούνται εντός ευρωπαϊκού εδάφους.
- Όσον αφορά τις μεταφορές, δεν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι μεταφορές που σχετίζονται με την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος ψύξης, λόγω έλλειψης δεδομένων. Για τις πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται οι προσεγγιστικές αποστάσεις μεταφορών οι οποίες είναι ενσωματωμένες στα γενικευμένα “market” σετ δεδομένων της ecoinvent. Για τις υπόλοιπες αποστάσεις μεταφορών, όπου αυτές δεν παρέχονται από τους κατασκευαστές, έχουν γίνει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις όπως θα αναλυθεί παρακάτω στην ενότητα 4.2.2.
- Λόγω έλλειψης δεδομένων δεν έχουν ληφθεί υπόψη στη μοντελοποίηση στοιχεία της εγκατάστασης όπως ηλεκτρονικά μέρη ή συστήματα ελέγχου.
- Για συνιστώσες του συστήματος με διάρκεια ζωής μικρότερη από είκοσι (20) χρόνια έχει θεωρηθεί αντικατάσταση αυτών.
- Η συντήρηση του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια ζωής της διάταξης λαμβάνεται υπόψη μόνο στην περίπτωση όπου παρέχονται αντίστοιχα δεδομένα από τους κατασκευαστές.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα παρουσιαστούν πιο εξειδικευμένες παραδοχές οι οποίες αφορούν τις διάφορες συνιστώσες της εγκατάστασης.

VII. Μέθοδος κατανομής (Allocation method)

Μετά το τέλος της ζωής ενός προϊόντος ακολουθεί η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει την ανακύκλωση ορισμένων, συνήθως των μετάλλων, και άλλες διαδικασίες επεξεργασίας όπως η καύση και η ταφή αυτών. Ωστόσο, οι διαδικασίες αυτές συνεπάγονται την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων, όπως για παράδειγμα η ανάκτηση μετάλλων από την ανακύκλωση και η παραγωγή ηλεκτρισμού ή θερμότητας από την καύση των μη μεταλλικών υλικών. Επομένως, τίθεται το ερώτημα κατά πόσο αυτές οι διαδικασίες διαχείρισης καθώς και τα προϊόντα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή οφέλη που συνεπάγονται ανήκουν στο υπό εξέταση σύστημα.

Στην παρούσα μελέτη, η μοντελοποίηση του υπό εξέταση συστήματος γίνεται με βάση την “cut-off” προσέγγιση. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη προσέγγιση η αρχική παραγωγή ενός υλικού αποδίδεται πάντα στον πρώτο χρήστη αυτού. Οι διεργασίες ανακύκλωσης των υλικών δε συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα. Ως αποτέλεσμα, τα περιβαλλοντικά οφέλη (όπως η αποφυγή παραγωγής του από την αρχή) που συνεπάγεται η ανακύκλωση του υλικού δεν αποδίδονται στον αρχικό παραγωγό, ενώ τα ανακυκλωμένα υλικά φέρουν μόνο το περιβαλλοντικό βάρος που σχετίζεται με τη διαδικασία ανακύκλωσής τους. Για παράδειγμα, το ανακυκλωμένο χαρτί φέρει μόνο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συλλογής του χαρτιού προς ανακύκλωση και της διαδικασίας ανακύκλωσης, και ως εκ τούτου είναι ελεύθερο επιπτώσεων που σχετίζονται με την κοπή των δέντρων και την επεξεργασία του ξύλου για την παραγωγή χαρτιού.

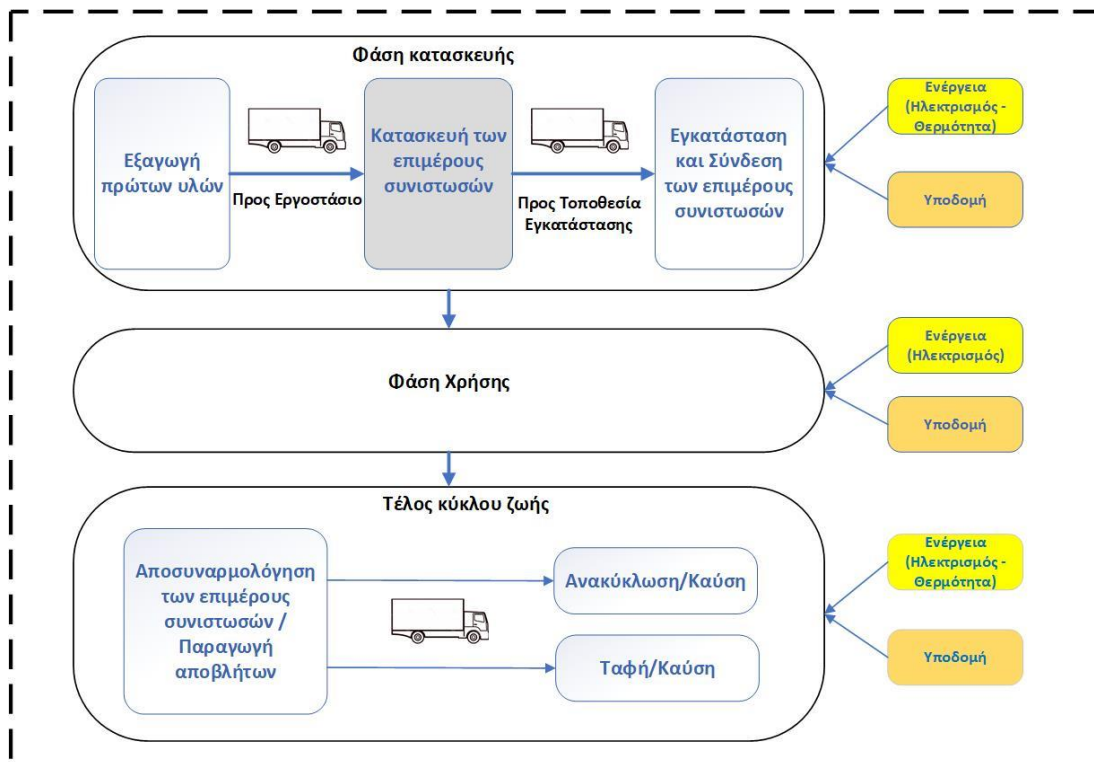
Αντίστοιχα ισχύουν και για τα απόβλητα που δεν ανακυκλώνονται αλλά υπόκεινται σε διαφορετικές διεργασίες διαχείρισης. Ο παραγωγός των αποβλήτων δε λαμβάνει κανένα όφελος από την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίηση παραπροϊόντων της διαδικασίας επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση απορριμμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση εσωτερικών χώρων. Ωστόσο, όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την καύση των απορριμμάτων αποδίδονται εξ’ ολοκλήρου στον παραγωγό αυτών, ενώ η θερμότητα δε φέρει κανένα περιβαλλοντικό βάρος [41].

Οι πρώτες ύλες στα σετ δεδομένων τηςecoinvent και στην προσέγγιση “cut-off” αποτελούνται από μείγμα πρωταρχικών και ανακυκλωμένων υλικών, σε αντιπροσωπευτικά ποσοστά [52].

4.2. Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα

Η συλλογή των δεδομένων για όλα τα μέρη του συστήματος ήταν το πιο χρονοβόρο κομμάτι της μελέτης, κυρίως λόγω της ανάγκης παροχής δεδομένων από διαφορετικές εταιρείες και της εκτενούς βιβλιογραφικής έρευνας η οποία ήταν απαραίτητη για την κάλυψη ελλείψεων στα παρεχόμενα δεδομένα.

Ο κατάλογος απογραφής για το σύστημα δομείται με βάση τις τέσσερις κύριες φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος : την εξαγωγή των πρώτων υλών/κατασκευή του προϊόντος, τη μεταφορά, τη χρήση του και την επεξεργασία των αποβλήτων που προκύπτουν κατά το τέλος ζωής της διάταξης. Στην Εικ. 4.1 παρουσιάζεται σχηματικά η ροή των διεργασιών, ενώ με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζονται τα όρια του συστήματος. Αφού προσδιοριστούν όλες οι διεργασίες που σχετίζονται με αυτές τις φάσεις, δηλαδή αφού προσδιοριστούν οι απαιτήσεις σε πρώτες ύλες, οι μέθοδοι κατασκευής, ο τρόπος μεταφοράς, οι πηγές ενέργειας και τέλος οι συγκεκριμένες διαδικασίες επεξεργασίας των αποβλήτων, στη συνέχεια συγκεντρώνονται και καταστρώνονται οι κατάλογοι απογραφής (LCI) κάθε διεργασίας, ή εάν αυτοί υπάρχουν ήδη επιλέγονται από τη βάση δεδομένων ecoinvent.



Εικ. 4.1. Διάγραμμα ροής του υπό εξέταση συστήματος

4.2.1 Εξαγωγή πρώτων υλών/Κατασκευή

Ι. Γενικές παραδοχές

- Ο σίδηρος καθώς και ο χάλυβας η σύσταση του οποίου δεν είναι γνωστή μοντελοποιήθηκαν με το σετ δεδομένων (process dataset) “Steel, unalloyed (GLO)| market for” καθώς είναι το υλικό με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε καθαρό σίδηρο. Ενδεικτικά δίνεται η σύσταση τυπικού μη κραματωμένου (unalloyed) χάλυβα.

Πιν. 4.1 Σύσταση τυπικού μη κραματωμένου (unalloyed) χάλυβα [53]

Χάλυβας	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr+Mo+Ni
	(Μέγιστο ποσοστό %)								
C22E	0.17- 0.24	0.40	0.40- 0.70	0.020	0.010	0.40	0.10	0.10	0.63

- Οι ανοξείδωτοι χάλυβες μοντελοποιήθηκαν με το σετ δεδομένων “Steel, chromium steel 18/8 (GLO)| market for”.
- Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), λόγω έλλειψης δεδομένων ως προς τη μέθοδο πολυμερισμού του έχει μοντελοποιηθεί με το σετ δεδομένων “Polyvinylchloride, suspension polymerised (GLO)| market for”, καθώς η επικρατούσα μέθοδος πολυμερισμού PVC είναι ο πολυμερισμός εναιωρήματος (suspension polymerization) [54].
- Όλα τα ελαστομερή μοντελοποιήθηκαν με το σετ δεδομένων “Synthetic rubber (GLO)| market for”, το οποίο αφορά το ελαστομερές EPDM.
- Οι σωληνώσεις χαλκού έχει θεωρηθεί ότι έχουν παρόμοια διαδικασία κατασκευής με τη διέλαση για την κατασκευή συρμάτων και ως εκ τούτου έχουν μοντελοποιηθεί με το σετ δεδομένων “Wire drawing, copper (RER)| processing”. Επιπλέον, το βάρος αυτών έχει υπολογιστεί μέσω των διατάξεών τους, σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο της κατασκευάστριας εταιρείας [55].
- Όπου δεν ήταν γνωστές οι κατεργασίες των μετάλλων για την κατασκευή των διαφόρων συνιστωσών της εγκατάστασης έχει χρησιμοποιηθεί το σετ δεδομένων “Metal working, average for – όνομα μετάλλου - product manufacturing (RER)| processing”.
- Στα συστήματα μηχανικής συμπίεσης ατμού έχουν θεωρηθεί απώλειες ψυκτικού 3% κατά την κατασκευή αυτών [56].

II. Σύστημα Ψύξης

Τα δεδομένα που αφορούν τις συνιστώσες του συστήματος ψύξης, όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι μάζες αυτών, η ενέργεια και οι διαδικασίες κατασκευής τους, καθώς και οι αποστάσεις μεταφοράς ορισμένων υλικών, παρέχονται από τις κατασκευάστριες εταιρίες και είναι εμπιστευτικά, ως εκ τούτου δε δημοσιεύονται στην παρούσα μελέτη.

Ωστόσο, παρατίθενται κάποια δεδομένα από τη βιβλιογραφία, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση των παραπάνω δεδομένων.

- Ο συμπιεστής της βοηθητικής συμβατικής αντλίας θερμότητας του συστήματος, λόγω έλλειψης δεδομένων, μοντελοποιήθηκε ανάγοντας τα υλικά και την ενέργεια κατασκευής με βάση τη συνολική μάζα του συμπιεστή “C-SB5HP”. Ο συμπιεστής “C-SB5HP”, ο οποίος κατασκευάζεται στην Κίνα από την εταιρεία Dalian Sanyo Compressor Co είναι τύπου “scroll” και μελετήθηκε ως προς την περιβαλλοντική του απόδοση μέσω AKZ από τους Shi et al. [57]. Τα κύρια χαρακτηριστικά του καθώς και τα υλικά και η ενέργεια κατασκευής του δίνονται στον Πιν. 4.2.

Πιν. 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά συμπιεστή “C-SB5HP”.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Ψυκτική Ισχύς	14.5	kW
Βάρος	35.6	kg
Υλικό/Ενέργεια		
Χυτοσίδηρος (Cast iron)	19.3	kg
Χάλυβας (Steel)	12.5	kg
Χαλκός (Copper)	3.0	kg
Λοιπά κράματα (Alloy)	0.5	kg
Συνολική ενέργεια κατασκευής	48.8	kWh

Από τα υλικά του πίνακα το υλικό το οποίο αναφέρεται ως «λοιπά κράματα» δε συμπεριλαμβάνεται στη μοντελοποίηση λόγω έλλειψης δεδομένων, ενώ ο χάλυβας (“steel”) θεωρείται ότι είναι ανοξείδωτος χάλυβας (“stainless steel”), καθώς τέτοιου είδους χάλυβας χρησιμοποιείται σε αυτού του είδους τους συμπιεστές. Επιπλέον, όπως αναφέρεται και στη σχετική δημοσίευση, τα υλικά που καταγράφονται στον πίνακα αντιστοιχούν σε ποσοστό μεγαλύτερο από 99% της συνολικής μάζας του συμπιεστή. Άλλα υλικά, όπως ελαστικά, ρητίνες, πλαστικά και η βαφή, αγνοούνται λόγω του μικρού ποσοστού ενέργειας και πόρων που καταναλώνουν [57].

Οι πρώτες ύλες, η ενέργεια κατασκευής καθώς και τα σετ δεδομένων που έχουν επιλεχθεί από την ecoinvent, για το συμπιεστή της εγκατάστασης, δίνονται στον Πιν. Α.1 του παραρτήματος Α.

- Οι κυκλοφορητές εντός του ψύκτη προσρόφησης, μοντελοποιήθηκαν με βάση το σετ δεδομένων της ecoinvent «Pump 40 W», στο οποίο έγινε αναγωγή με βάση την αναλογία μαζών.
- Η ενέργεια για την κατασκευή των πλακοειδών εναλλακτών που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση της εφεδρικής αντλίας θερμότητας με τον ψύκτη προσρόφησης (Εικ. 3.9), λόγω έλλειψης δεδομένων, λαμβάνεται ίση με 0,8028 MJ ανά kg μάζας εναλλάκτη. Η ενέργεια αυτή όπως αναφέρεται και στην πηγή, δεν είναι ακριβής, αλλά υπολογίζεται διαιρώντας την ετήσια κατανάλωση ενέργειας με την ποσότητα χάλυβα που επεξεργάζεται η βιομηχανία (Alfa Laval) για την κατασκευή εναλλακτών [58], ενώ προέρχεται από τρεις διαφορετικές πηγές: ηλεκτρισμό, θερμότητα από τηλεθέρμανση και φυσικό αέριο. Καθώς δεν είναι γνωστό το ποσοστό κάθε μορφής θεωρείται ότι η ενέργεια αυτή προέρχεται κατά το ήμισυ από ηλεκτρισμό και κατά το ήμισυ από καύση φυσικού αερίου σε βιομηχανικό κλίβανο.

III. Εγκατάσταση – Στοιχεία σύνδεσης των επιμέρους συνιστωσών

Η εγκατάσταση περιλαμβάνει ορισμένα εξαρτήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος ψύξης, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, (π.χ. σωληνώσεις, βάνες) και την ομαλή λειτουργία αυτής (π.χ δοχείο διαστολής).

- Η κατασκευή των ορειχάλκινων εξαρτημάτων, όπως οι βάνες, τα ρακόρ, οι συστολές και οι σωληνομαστοί, θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται με κατεργασία ενός κυλινδρικού κομματιού ορείχαλκου, το οποίο έχει σε κάθε περίπτωση τις κατάλληλες διαστάσεις. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι το κυλινδρικό κομμάτι ορειχάλκου υφίσταται διάτρηση για τη διάνοιξη της κεντρικής οπής και στη συνέχεια τόννευση στην εξωτερική πλευρά για την επίτευξη των κατάλληλων διαμορφώσεων, όπως για παράδειγμα τα σπειρώματα. Η μάζα του υλικού που αφαιρείται με τις δύο κατεργασίες υπολογίστηκε προσεγγιστικά, μετρώντας τις διαστάσεις των εν λόγω εξαρτημάτων. Διαπιστώθηκε ότι η ενέργεια που καταναλώνεται και η μάζα του υλικού που αφαιρείται με την κατεργασία της τόννευσης, είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής από τις δύο κατεργασίες και ως εκ τούτου η τόννευση δε λαμβάνεται υπόψη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ενέργεια που αφαιρείται κατά την τόννευση είναι το 0.6% της συνολικής. Όσον αφορά τα χάλκινα εξαρτήματα, όπως π.χ. γωνίες και «ταυ», η κατασκευή αυτών μοντελοποιείται με σετ δεδομένων της ecoinvent για την κατεργασία χαλκού. Η τελική μάζα (μετά τις κατεργασίες) των διαφόρων εξαρτημάτων εκτιμήθηκε ζυγίζοντάς τα.
- Οι μονώσεις των σωληνώσεων είναι πολυστρωματικές με κύριο υλικό το δικτυωτό πολυαιθυλένιο (PEX) λόγω έλλειψης δεδομένων για την ακριβή μάζα των επιμέρους υλικών τους καθώς και για το δικτυωτό πολυαιθυλένιο, θεωρείται ότι αποτελούνται μόνο από πολυαιθυλένιο (PE). Η κατασκευή τους θεωρείται ότι πραγματοποιείται με εξέλαση.
- Το δοχείο διαστολής, λόγω έλλειψης δεδομένων θεωρείται ότι αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ η κατασκευή του περιλαμβάνει μόνο την έλαση αυτού (“hot rolling”).

Τα υλικά και οι κατεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν για τα παραπάνω εξαρτήματα παρουσιάζονται στον Πιν. Α.3 του παρατήματος Α.

IV. Συμβατική αντλία θερμότητας

Η συμβατική αντλία θερμότητας επιλέγεται να αποδίδει μέγιστη ψυκτική ισχύ ίση με 12,5 kW, προκειμένου να καλύπτει τις απαιτήσεις του υπό εξέταση κτηρίου.

Οι πρώτες ύλες και η ενέργεια κατασκευής της αντλίας λαμβάνονται από τη μελέτη των Greening και Azaragic [51], οι οποίοι μελέτησαν την περιβαλλοντική απόδοση μιας αντλίας θερμότητας αέρα – νερού για λειτουργία θέρμανσης σε σύγκριση με άλλους τύπους αντλιών θερμότητας. Η υπό μελέτη αντλία θερμότητας έχει ονομαστική θερμική ισχύ ίση με 10 kW. Λόγω έλλειψης δεδομένων τα υλικά και η ενέργεια κατασκευής για τη συμβατική αντλία θερμότητας λαμβάνονται με αναγωγή ως προς την ονομαστική ψυκτική ισχύ. Η απόκλιση μεταξύ της μέγιστης θερμικής και της μέγιστης ψυκτικής ισχύος που αποδίδει μια αντλία θερμότητας θεωρείται ότι δεν είναι μεγάλη, ώστε να γίνει υποεκτίμηση των πόρων που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, η υπόθεση αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι η αντλία θερμότητας αναφοράς είναι παλαιότερου τεχνολογικού επιπέδου (2010) και ως εκ τούτου οι πρώτες ύλες και η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι περισσότερα σε σύγκριση με τις σύγχρονες αντλίες θερμότητας. Τα υλικά και η ενέργεια κατασκευής της αντλίας

Θερμότητας αναφοράς συγκεντρώνονται στον Πιν. 4.3. Προκειμένου η μετέπειτα σύγκριση των δύο συστημάτων να γίνεται όσο το δυνατό σε κοινή βάση, στη συμβατική αντλία θερμότητας έχουν προστεθεί τυπικές κατεργασίες των πρώτων υλών. Οι πρώτες ύλες, η ενέργεια κατασκευής καθώς και τα σετ δεδομένων που έχουν επιλεγεί από την ecoinvent δίνονται στον Πιν. Α.2 του παραρτήματος Α.

Πιν. 4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά συμβατικής αντλίας θερμότητας [51]

Μέρος- εξάρτημα ή στάδιο του κύκλου ζωής του προϊόντος	Υλικό- Μορφή Ενέργειας	Τιμή	Μονάδα
Ατμοποιητής και συμπυκνωτής	Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	32	kg
Περίβλημα και συμπιεστής	Χάλυβας (Reinforcing steel)	120	kg
Καλωδίωση, σωλήνωση και εκτονωτική βαλβίδα	Χαλκός	35.2	kg
Μόνωση σωλήνωσης	Ελαστομερές	16	kg
Μόνωση καλωδίωσης	Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	1.6	kg
Λιπαντικό έλαιο	Πολυεστερικό έλαιο	2.7	kg
Ανεμιστήρας	Χαλκός	1.4	kg
	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	0.5	kg
Ψυκτικό μέσο	R-134a	4.9	kg
Συναρμολόγηση αντλίας	Ηλεκτρισμός (Μεσαίας τάσης)	504	MJ
	Φυσικό αέριο	1400	MJ

4.2.2 Μεταφορά

Η αναλυτική και ακριβής καταγραφή όλων των αποστάσεων που σχετίζονται με το υπό εξέταση σύστημα δεν ήταν εφικτή λόγω της μη επαρκούς γνώσης των τοποθεσιών παραγωγής των πρώτων υλών αλλά και αρκετών τοποθεσιών επεξεργασίας αυτών. Οι αποστάσεις μεταφοράς για ορισμένα από τα μέρη των συνιστωσών του συστήματος παρέχονται από τους προμηθευτές και δε δημοσιοποιούνται στην παρούσα μελέτη. Για τις υπόλοιπες εξ' αυτών έχουν γίνει οι ακόλουθες υποθέσεις.

- Αρχικά, λαμβάνεται υπόψη μέση απόσταση μεταφοράς όλων των συνιστωσών του συστήματος ψύξης από την τοποθεσία κατασκευής (Γερμανία) στην τοποθεσία εγκατάστασης Ελλάδα (Αθήνα).
- Τα στοιχεία σύνδεσης των επιμέρους συνιστωσών της εγκατάστασης παράγονται στη Βόρεια Ιταλία. Επομένως λαμβάνεται υπόψη μέση απόσταση μεταφοράς έως την τοποθεσία εγκατάστασης (Αθήνα).
- Το ψυκτικό μέσο R-134a παράγεται στην Ολλανδία, επομένως θεωρείται μέση απόσταση μεταφοράς έως την τοποθεσία συναρμολόγησης του συστήματος (Γερμανία) ίση με 600 km.
- Για τις υπόλοιπες πρώτες ύλες των οποίων η παραγωγή θεωρείται επί ευρωπαϊκού εδάφους θεωρείται μέση απόσταση μεταφοράς έως τον τελικό προορισμό, δηλαδή το εκάστοτε εργοστάσιο, ίση με 1000 km.

- Η απόσταση μεταφοράς των επιμέρους συνιστωσών προς το χώρο διαχείρισης των αποβλήτων, λαμβάνεται ίση με 24 km.

Οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων θεωρείται ότι πραγματοποιούνται οδικώς, με τη χρήση φορτηγού μέγιστου φορτίου μεγαλύτερου από 32 τόνους. Οι μεταφορές μικρών αποστάσεων που παρέχονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες θεωρείται ότι πραγματοποιούνται επίσης οδικώς με τη χρήση μικρού φορτηγού μέγιστου βάρους μικρότερου των 3.5 τόνων.

Η μεταφορά των επιμέρους συνιστωσών προς το χώρο διαχείρισής τους θεωρείται ότι γίνεται με απορριμματοφόρο μέγιστου βάρους μικρότερου των 21 τόνων. Επιπλέον, όπου απαιτείται θαλάσσια μεταφορά, αυτή θεωρείται ότι γίνεται με φορτηγό πλοίο μέγιστου φορτίου 51,500 τόνων.

Όλες οι παραπάνω αποστάσεις μεταφοράς, καθώς και οι αντίστοιχες που αφορούν εγκατάσταση της διάταξης σε άλλες χώρες (βλ. ενότητα 5.2.2), έχουν υπολογιστεί προσεγγιστικά με τη χρήση των χαρτών της Google [59]. Οι αποστάσεις μεταφοράς, καθώς και τα σετ δεδομένων που έχουν επιλεγεί από τηνecoinvent δίνονται στον Πιν. Α.4 του παραρτήματος Α.

4.2.3 Φάση Χρήσης

Κατά τη μοντελοποίηση της φάσης χρήσης της διάταξη υπολογίζονται η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία αυτής σε όλη τη διάρκεια ζωής της. Προκειμένου να είναι δυνατός αυτός ο υπολογισμός πρέπει αρχικά να καθορισθεί η διάρκεια ζωής της διάταξης, η οποία όπως αναφέρθηκε παραπάνω δίνεται από τους κατασκευαστές ίση με 20 χρόνια.

Η διάταξη μελετάται μόνο κατά τη λειτουργία της για παραγωγή ψύξης και για το χρονικό διάστημα από 18/4 έως 11/11. Η περίοδος αυτή καθορίστηκε από τις ανάγκες ψύξης τυπικού κτηρίου στην Αθήνα, όπως αυτές προέκυψαν από το λογισμικό EnergyPlus [60]. Αρχικά υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται για χρονικό διάστημα ενός έτους, η οποία πολλαπλασιάζεται με τα 20 χρόνια ζωής της διάταξης για να βρεθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών καταναλώσεων δίνονται στο παράρτημα Β.

Επιπλέον κατά τη φάση της χρήσης λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες του ψυκτικού μέσου, οι οποίες θεωρούνται ίσες με 6% ετησίως [51].

4.2.4 Τέλος κύκλου ζωής

Δεδομένου ότι η εξεταζόμενη διάταξη βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και δεν έχει τεθεί σε λειτουργία κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας μελέτης, δεν υπάρχουν δεδομένα σχετικά με τη διαχείριση αυτής μετά το τέλος του κύκλου ζωής της. Επομένως, αναπτύχθηκαν δύο σενάρια για αυτή τη φάση, προκειμένου να συμπεριληφθεί στην ΑΚΖ του προϊόντος.

Αρχικά, λόγω του μικρού μεγέθους αυτών, θεωρείται ότι οι επιμέρους συνιστώσες της διάταξης αποσυναρμολογούνται και τα διάφορα υλικά διαχωρίζονται μηχανικά και χειροκίνητα στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Η φάση του διαχωρισμού δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς η επίδρασή της στο συνολικό αντίκτυπο θεωρείται αμελητέα. Επιπλέον και στα δύο σενάρια λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες του ψυκτικού μέσου από τις διατάξεις μηχανικής συμπίεσης κατά την αποσυναρμολόγηση αυτών, ίσες με 20% [56].

Στο πρώτο σενάριο θεωρείται ότι όλα τα υλικά οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), εκτός από κάποια, όπως το ψυκτικό μέσο R-134a, τα οποία οδηγούνται για καύση.

Στο δεύτερο σενάριο θεωρείται πλήρης (100%) ανάκτηση και ανακύκλωση όλων των μετάλλων, ανάκτηση σε ποσοστό 90% του ψυκτικού R-134a και επαναχρησιμοποίηση αυτού, ενώ το υπόλοιπο 10% στέλνεται για καύση [61] και πλήρης (100%) καύση για όλα τα μη μεταλλικά υλικά, όπως για παράδειγμα πλαστικά και λιπαντικά έλαια.

Σημειώνεται ότι για την ανακύκλωση των μετάλλων δε λαμβάνεται υπόψη κάποιο σετ δεδομένων καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο συγκεκριμένο μοντέλο (“cut-off”) δεν υπάρχει κάποιο όφελος από αυτή, ενώ οι επιπτώσεις στο περιβάλλον που σχετίζονται με τη διαδικασία της ανακύκλωσης αποδίδονται στο ανακυκλωμένο προϊόν και όχι στον παραγωγό του μετάλλου προς ανακύκλωση. Για αυτό το λόγο τα σετ δεδομένων τηςecoinvent που σχετίζονται με την ανακύκλωση είναι κενά.

Επιπλέον, όσον αφορά την ταφή των διαφόρων υλικών, επιλέγονται σετ δεδομένων, ανάλογα με τον τύπο του υλικού (αδρανή και μη αδρανή). Στην περίπτωση των μη αδρανών υλικών μοντελοποιούνται οι διαρροές προς το υπέδαφος.

Λόγω έλλειψης δεδομένων, η ταφή επιβλαβών μετάλλων όπως ο χαλκός και ο ορείχαλκος μοντελοποιείται ως ταφή αλουμινίου, ενώ ορισμένα πλαστικά μοντελοποιούνται ως “plastic mixture” για το τέλος ζωής τους.

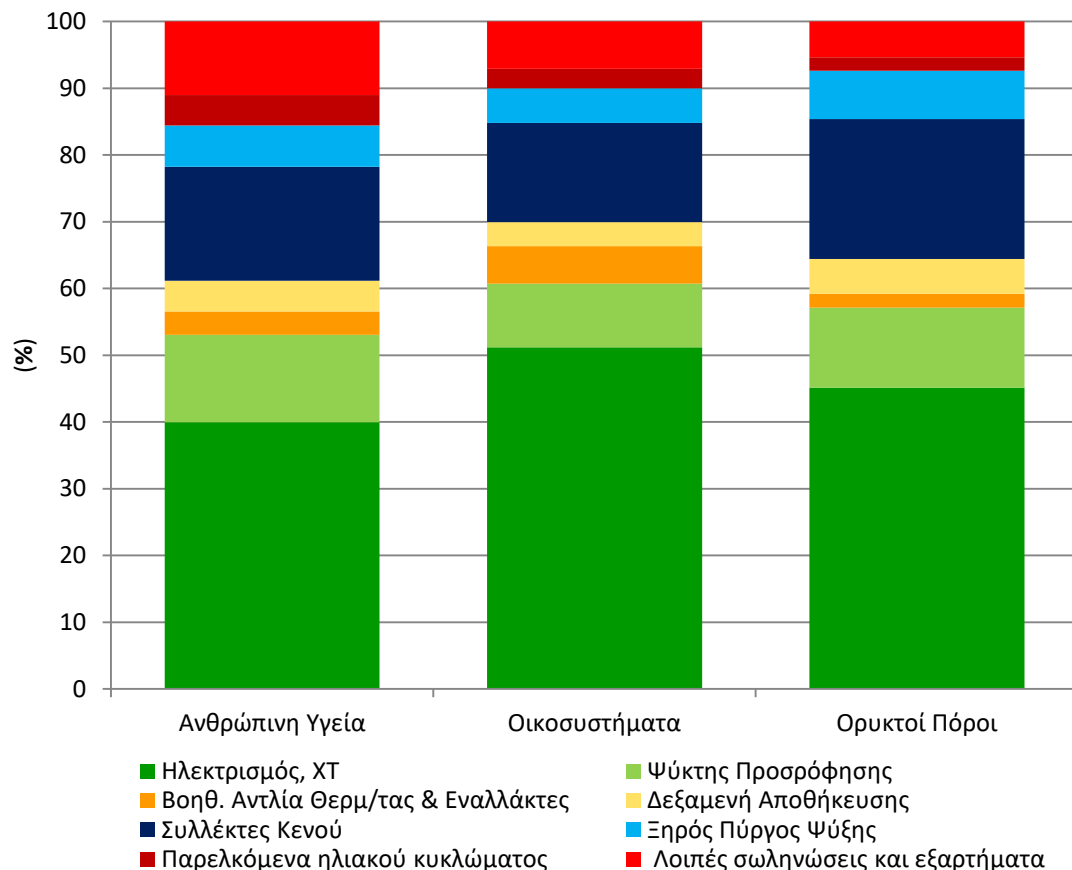
Επίσης, κατά την ταφή υλικών με επίχριση (π.χ. γαλβανισμένος χάλυβας), η επίχριση αγνοείται λόγω μικρού βάρους σε σχέση με το επιχρισμένο υλικό και θεωρείται ταφή του επιχρισμένου υλικού συνολικού βάρους ίσου με το βάρος του υλικού και της επίχρισης.

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα

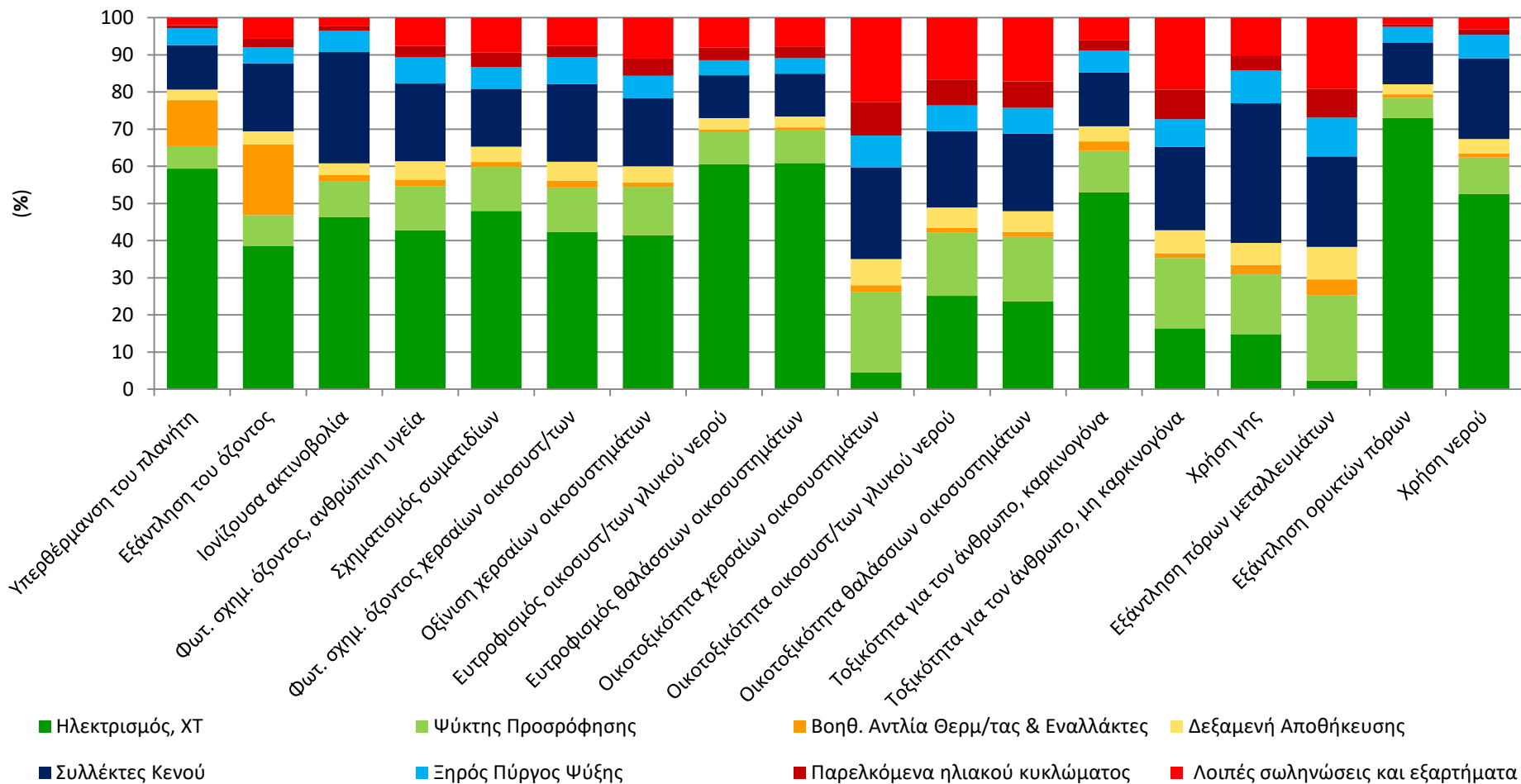
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής για το υπό εξέταση σύστημα, καθώς και για όλα τα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν.

5.1. Αποτελέσματα για το υπό εξέταση σύστημα στην Ελλάδα

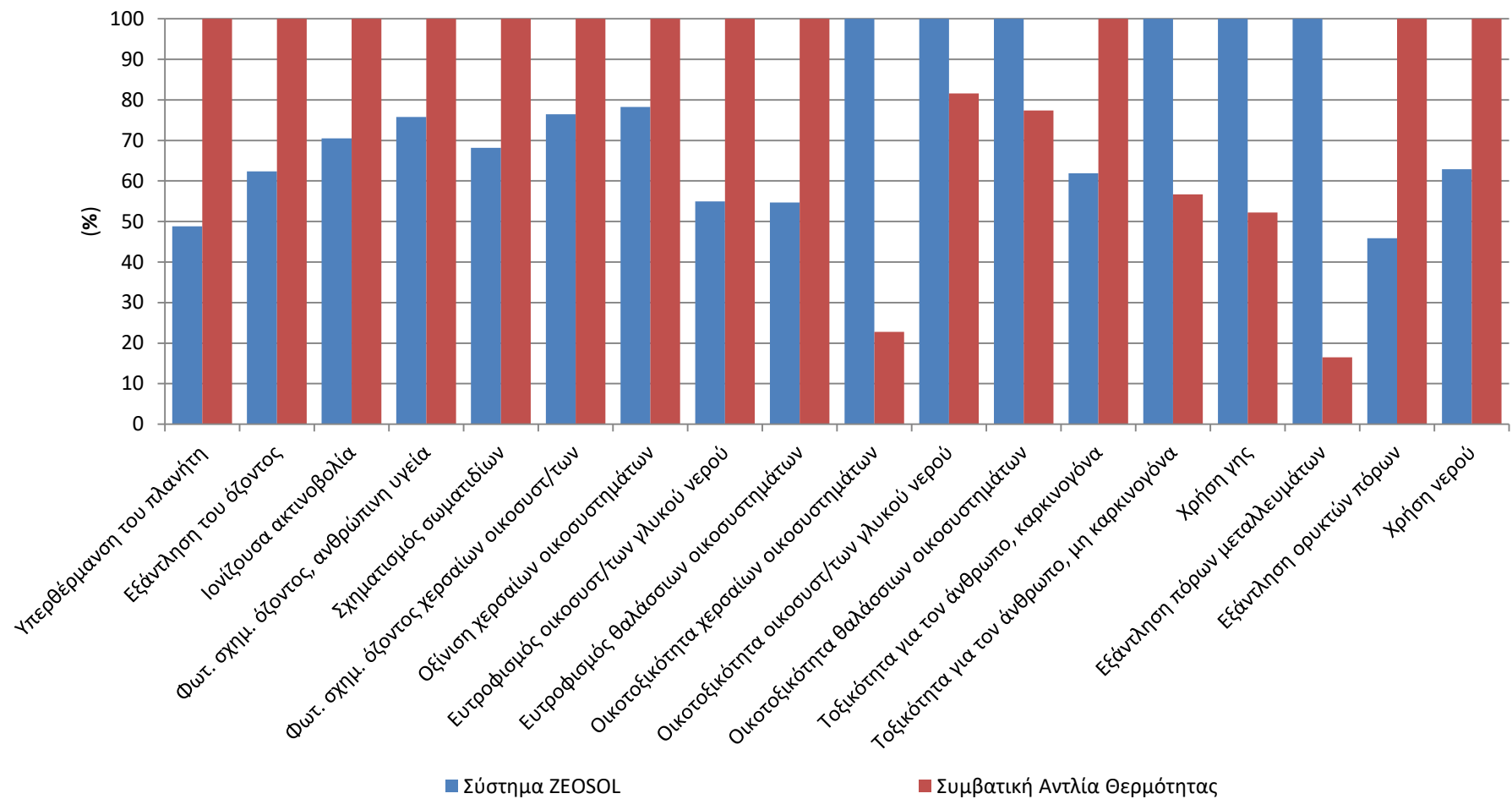
Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος ψύξης ZEOSOL τόσο μεμονωμένα όσο και σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για το σενάριο αναφοράς, δηλαδή για εγκατάσταση στην Ελλάδα και επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών ίση με 40 m². Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά συνιστώσα του συστήματος. Σε κάθε συνιστώσα συμπεριλαμβάνονται οι πρώτες ύλες, η κατεργασία αυτών για την παραγωγή του τελικού προϊόντος, οι μεταφορές των πρώτων υλών στην τοποθεσία κατεργασίας τους καθώς και του τελικού προϊόντος στην τοποθεσία εγκατάστασης της διάταξης αντίστοιχα, οι καταναλώσεις (πρώτων υλών και ενέργειας) που σχετίζονται με τη συντήρηση της εκάστοτε συνιστώσας, όπως και η μεταφορά και οι διαδικασίες επεξεργασίας των αποβλήτων στο χώρο διαχείρισης αυτών μετά το τέλος ζωής της διάταξης.



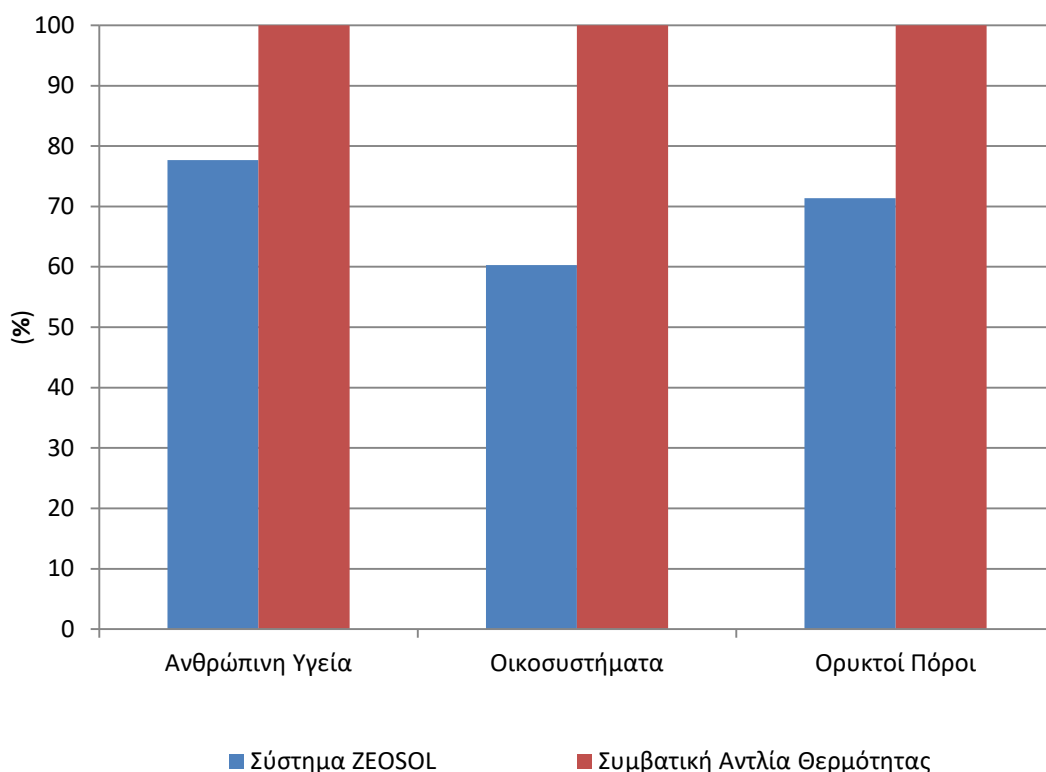
Εικ. 5.1. Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο "endpoint"



Εικ. 5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο "midpoint"



Εικ. 5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint”



Εικ. 5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint”

Παράλληλα, επιλέγεται να εμφανίζεται ξεχωριστά η επίπτωση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού για τη λειτουργία του συστήματος, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής της βοηθητικής αντλίας θερμότητας. Τα αποτελέσματα σε απόλυτες τιμές δίνονται στους πίνακες του παραρτήματος Γ.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα (Εικ. 5.2), η κατανάλωση ηλεκτρισμού για τη λειτουργία του συμπιεστή έχει μεγάλη επίδραση στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων. Σε ορισμένες κατηγορίες όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη, ο ευτροφισμός των οικοσυστημάτων, η καρκινογόνος τοξικότητα για τον άνθρωπο, η εξάντληση των ορυκτών πόρων και η χρήση νερού, ο αντίκτυπος αυτής αντιστοιχεί σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50 %, με την εξάντληση των ορυκτών πόρων να επηρεάζεται σε ποσοστό ίσο με 73 %. Αντίθετα, παρουσιάζει σχετικά μικρό αντίκτυπο σε κατηγορίες επιπτώσεων όπως η οικοτοξικότητα των οικοσυστημάτων, η μη καρκινογόνος τοξικότητα για τον άνθρωπο, η χρήση της γης και η εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων, με ποσοστά στο εύρος 2 – 25 %. Σε αυτές τις κατηγορίες, ο κύριος αντίκτυπος οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα μετάλλων, και ειδικότερα χαλκού, που περιέχει η διάταξη. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στις συγκεκριμένες κατηγορίες αυξάνεται ο αντίκτυπος των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των επιμέρους συνιστωσών της εγκατάστασης, η κύρια μάζα των οποίων αποτελείται από χαλκό και ορείχαλκο.

Η μεγάλη επίπτωση του ηλεκτρισμού στις παραπάνω κατηγορίες επιπτώσεων σχετίζεται με το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας που κυριαρχείται από τη λιγνιτική ηλεκτροπαραγωγή. Συγκεκριμένα, η παραγωγή ηλεκτρισμού από λιγνίτη έχει μεγάλες απαιτήσεις σε νερό σε σχέση με τεχνολογίες στις οποίες χρησιμοποιείται διαφορετικό καύσιμο [62]. Επιπλέον έχει

τη μεγαλύτερη επίπτωση στον ευτροφισμό των οικοσυστημάτων, το οποίο οφείλεται κυρίως στην εκπομπή φωσφορικών αλάτων κατά τη εξόρυξη του λιγνίτη [63].

Αντίστοιχα, αξιόλογο αντίκτυπο στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων παρουσιάζουν και οι ηλιακοί συλλέκτες κενού με συνεισφορά από 11 % για την εξάντληση των ορυκτών πόρων έως 38 % για τη χρήση της γης. Η επίπτωση των συλλεκτών στις διάφορες κατηγορίες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες καθώς είναι μία συνιστώσα του συστήματος, η οποία αποτελείται από μεγάλη μάζα πρώτων υλών, ενώ η κατασκευή αυτής συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ηλεκτρισμού, σύμφωνα με τα δεδομένα που παρασχέθηκαν από τους κατασκευαστές. Στις δύο κατηγορίες, μάλιστα, που οι συλλέκτες έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο δίνεται ότι η επίπτωση του χαλκού και του γυαλιού στη χρήση της γης είναι της τάξεως του 60 % επί του συνολικού αντικτύπου των συλλεκτών, ενώ η επίπτωση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην ιονίζουσα ακτινοβολία αντιστοιχεί στο 41 % της συνολικής.

Επιπλέον, παρατηρείται αυξημένος ο αντίκτυπος της βοηθητικής αντλίας θερμότητας στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην εξάντληση του όζοντος, με ποσοστά ίσα με 12 και 19 % επί του συνολικού του συστήματος, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται κυρίως στο ψυκτικό μέσο (R-134a) που χρησιμοποιεί ο συμπιεστής. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την υπερθέρμανση του πλανήτη η επίπτωση λόγω των απωλειών ψυκτικού μέσου αντιστοιχούν στο 91 % του συνολικού αντικτύπου της βοηθητικής αντλίας θερμότητας. Αυτό εξηγείται από τη μεγάλη τιμή του δυναμικού (GWP) υπερθέρμανσης του πλανήτη του R-134a (GWP = 1430 [64]). Όσον αφορά τη εξάντληση του όζοντος, οι απώλειες του ψυκτικού μέσου δεν έχουν κάποια επίδραση, καθώς το R-134a δεν περιέχει χλώριο και επομένως το δυναμικό εξάντλησης του όζοντος αυτού είναι μηδενικό (ODP = 0). Ωστόσο, άλλες ουσίες οι οποίες εκπέμπονται στον κύκλο ζωής αυτού, όπως το μονοχλωροτετραφθοροαιθάνιο (R-124) και το τριχλωροτριφθοροαιθάνιο (R-113) έχουν επίπτωση στην εξάντληση του όζοντος [51]. Ως αποτέλεσμα, το R-134a ευθύνεται για το 95 % του αντικτύπου της βοηθητικής αντλίας.

Σε επίπεδο “endpoint” (Εικ. 5.1), παρατηρείται συνοχή με τα αποτελέσματα του επιπέδου “midpoint”, με την επίδραση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού να παρουσιάζει κυρίαρχο ρόλο σε όλες τις κατηγορίες βλάβης. Αντίστοιχα, υψηλός είναι και ο αντίκτυπος των ηλιακών συλλεκτών.

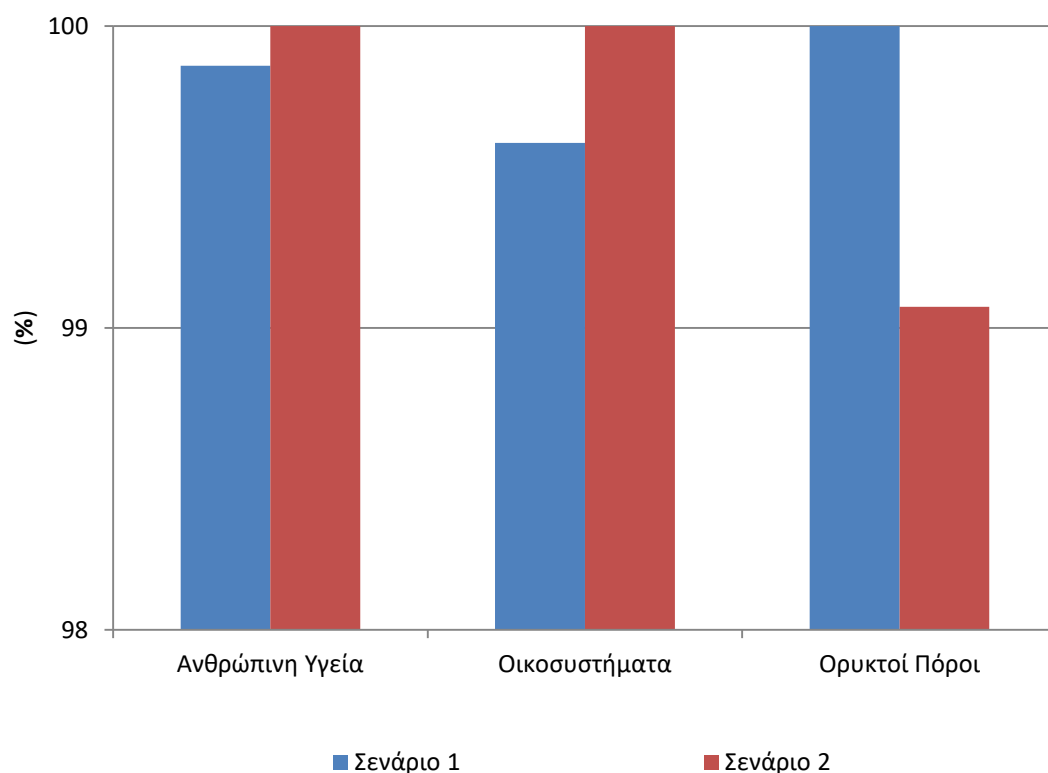
Όσον αφορά τη σύγκριση του συστήματος ψύξης ZEOSOL με τη συμβατική αντλία θερμότητας, παρατηρούμε ότι παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, με τη χαμηλότερη να παρουσιάζεται στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση των ορυκτών πόρων. Η κύρια αιτία της καλύτερης επίδοσης του συστήματος ZEOSOL είναι η χαμηλότερη κατανάλωση ηλεκτρισμού σε σχέση με τη συμβατική αντλία θερμότητας, δεδομένου του κυρίαρχου ρόλου των ορυκτών καυσίμων στο μείγμα ηλεκτρισμού της Ελλάδας. Αντίθετα, χειρότερη απόδοση παρουσιάζει στις κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες επηρεάζονται από τα μέταλλα και κυρίως το χαλκό, δεδομένου του σημαντικά μεγαλύτερου βάρους του συστήματος. Χαρακτηριστικά, παρατηρείται ότι στην οικοτοξικότητα των χερσαίων οικοσυστημάτων και

στην εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων, ο αντίκτυπος της συμβατικής αντλίας θερμότητας είναι μικρότερος από το 25 % αυτού του συστήματος ZEOSOL.

5.2. Μελέτη σεναρίων

5.2.1 Σύγκριση δύο διαφορετικών σεναρίων για τη διαχείριση των αποβλήτων

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξετάζονται δύο σενάρια για την επεξεργασία των αποβλήτων μετά το τέλος ζωής της διάταξης. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, τα σενάρια «1» και «2» αναφέρονται στο πρώτο και το δεύτερο σενάριο για το τέλος ζωής του συστήματος, αντίστοιχα (βλ. ενότητα 4.2.4). Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις υπόλοιπες ενότητες έχουν υπολογιστεί για το «Σενάριο 2». Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο σεναρίων αφορούν ολόκληρο τον κύκλο ζωής του συστήματος, ενώ έχουν εξαχθεί χωρίς να συμπεριληφθεί η κατανάλωση ηλεκτρισμού, καθώς είναι κοινή, και προκειμένου να είναι πιο εμφανείς οι διαφορές μεταξύ αυτών.

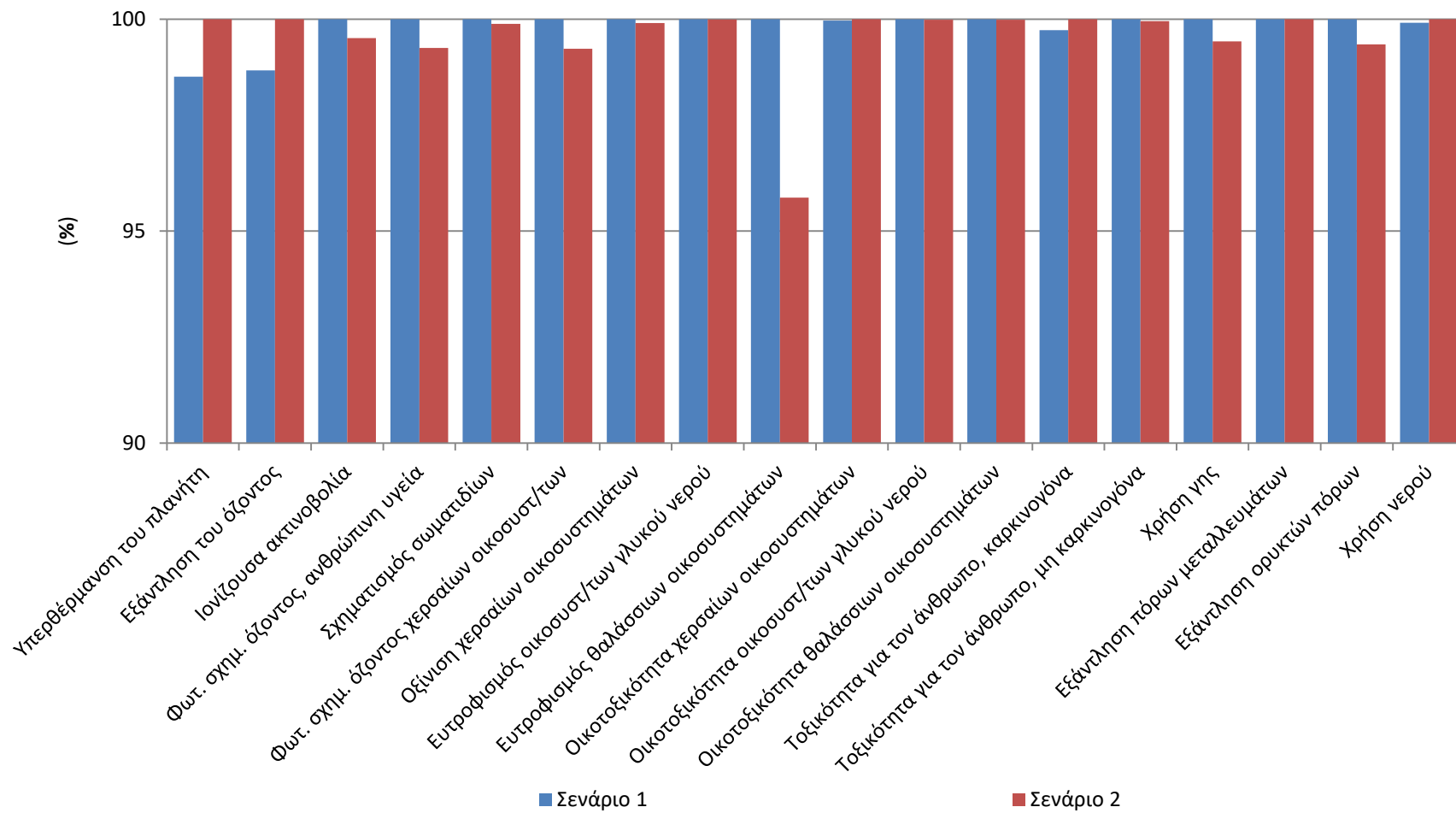


Εικ. 5.5 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL των δύο σεναρίων για το τέλος του κύκλου ζωής αυτού σε επίπεδο “endpoint”

Από το διάγραμμα της Εικ. 5.6 παρατηρείται ότι στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων δεν παρουσιάζεται σημαντική διαφορά. Οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην εξάντληση του όζοντος, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη επίπτωση της καύσης των πλαστικών. Αντίθετα, στον ευτροφισμό των θαλάσσιων οικοσυστημάτων το πρώτο σενάριο παρουσιάζει μεγαλύτερο αντίκτυπο κατά 4 %, το οποίο οφείλεται κυρίως στην ταφή των πλαστικών. Σε επίπεδο “endpoint” καθίσταται σαφής η μικρή διαφορά (μικρότερη του 1%) των δύο σεναρίων, με το πρώτο σενάριο να

παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα και χειρότερες στους ορυκτούς πόρους.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημανθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα εξαρτώνται από τη μέθοδο επιμερισμού (allocation method), η οποία εφαρμόστηκε για τη μοντελοποίηση του συστήματος. Τα αποτελέσματα θα διέφεραν σημαντικά, αν είχε χρησιμοποιηθεί διαφορετικό μοντέλο, στο οποίο λαμβάνονταν υπόψη τα περιβαλλοντικά οφέλη που συνεπάγεται η ανακύκλωση των μετάλλων και η παραγόμενη ενέργεια από την καύση των πλαστικών από την αποφυγή παραγωγής πρωτογενούς προϊόντος (μετάλλων ή ενέργειας).

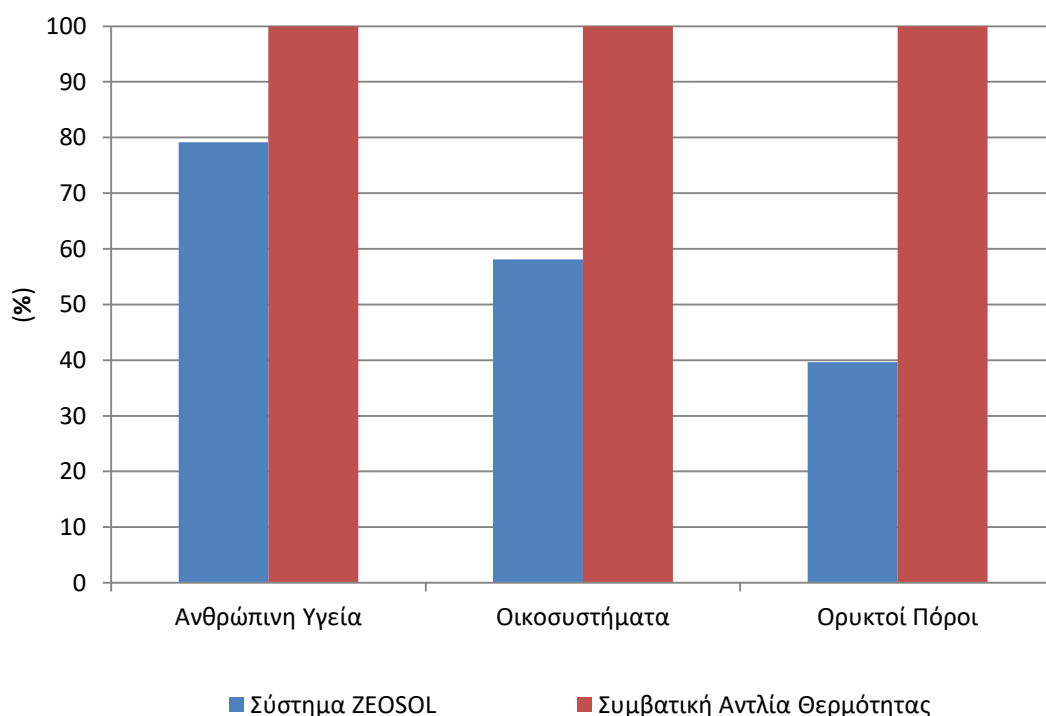


Εικ. 5.6 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL των δύο σεναρίων για το τέλος του κύκλου ζωής αυτού σε επίπεδο “midpoint”

5.2.2 Επίδραση της τοποθεσίας της εγκατάστασης

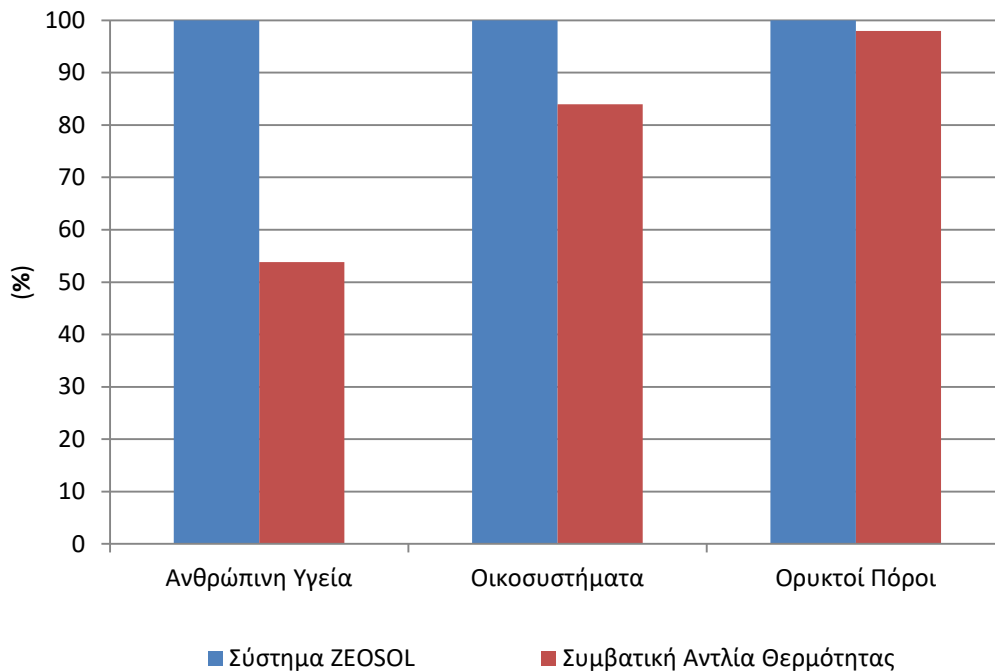
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα για την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος ZEOSOL για την περίπτωση εγκατάστασης αυτού σε διαφορετικές τοποθεσίες. Εξετάζεται η εγκατάσταση στην Κύπρο, την Ισπανία, την Ιταλία και την Πορτογαλία και συγκεκριμένα στις πόλεις της Λάρνακας, της Μαδρίτης, της Νάπολης και της Λισαβόνας αντίστοιχα. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται σε επίπεδο “endpoint” για κάθε θέση εγκατάστασης συγκριτικά αποτελέσματα αναφορικά με μία συμβατική αντλία θερμότητας. Επιπλέον, στο τέλος της υποενότητας παρουσιάζονται δύο διαγράμματα, σε “midpoint” και “endpoint” επίπεδο, στα οποία αποτυπώνεται συγκριτικά η απόδοση του συστήματος σε όλες τις υπό εξέταση θέσεις εγκατάστασης. Αναλυτικά διαγράμματα για τη συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος σε επίπεδο “midpoint” για τις διάφορες τοποθεσίες εγκατάστασης δίνονται στις Εικ. Γ.1 έως Εικ. Γ.4 του παραρτήματος Γ.

Τα παρακάτω αποτελέσματα δείχνουν ποσοτικά την επίδραση της διαφορετικής ζήτησης ψύξης στην εκάστοτε τοποθεσία εγκατάστασης, του μείγματος ηλεκτρισμού της χώρας και της διαφορετικής απόστασης μεταφοράς των συνιστωσών του συστήματος ZEOSOL από την τοποθεσία κατασκευής αυτών στην εκάστοτε τοποθεσία εγκατάστασης.



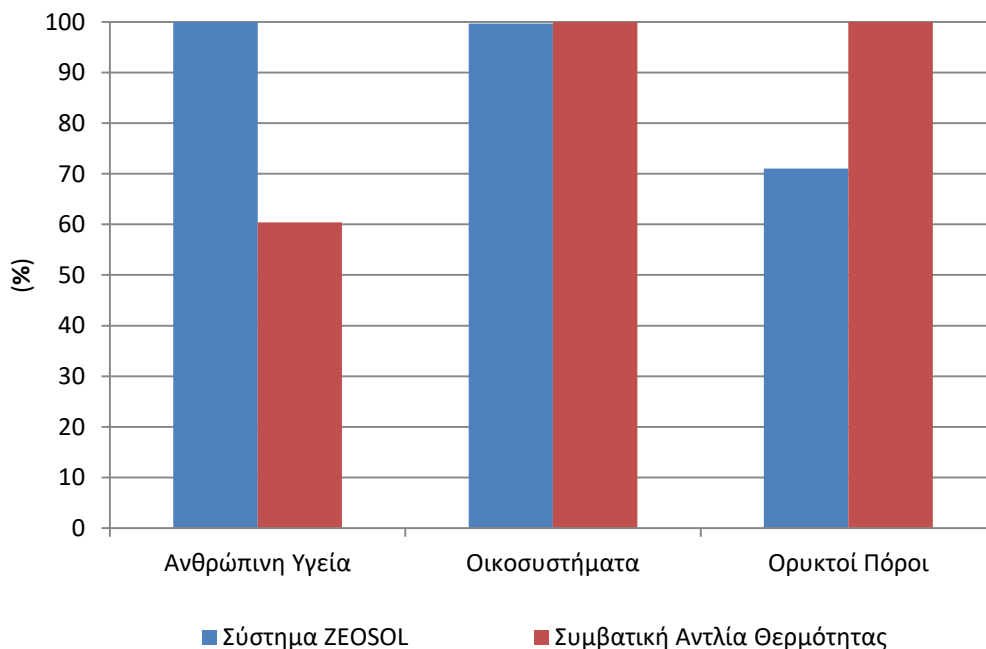
Εικ. 5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Κύπρο σε επίπεδο “endpoint”

Από το διάγραμμα της Εικ. 5.7, παρατηρούμε ότι, για την περίπτωση της Λάρνακας, ο αντίκτυπος του συστήματος ZEOSOL είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της συμβατικής αντλίας θερμότητας σε όλες τις κατηγορίες βλαβών, με τη μεγαλύτερη διαφορά να εντοπίζεται στους ορυκτούς πόρους, όπου ο αντίκτυπος (ανά παραγόμενη kWh ψύξης) είναι μειωμένος κατά 60 % σε σύγκριση με τη συμβατική αντλία θερμότητας.



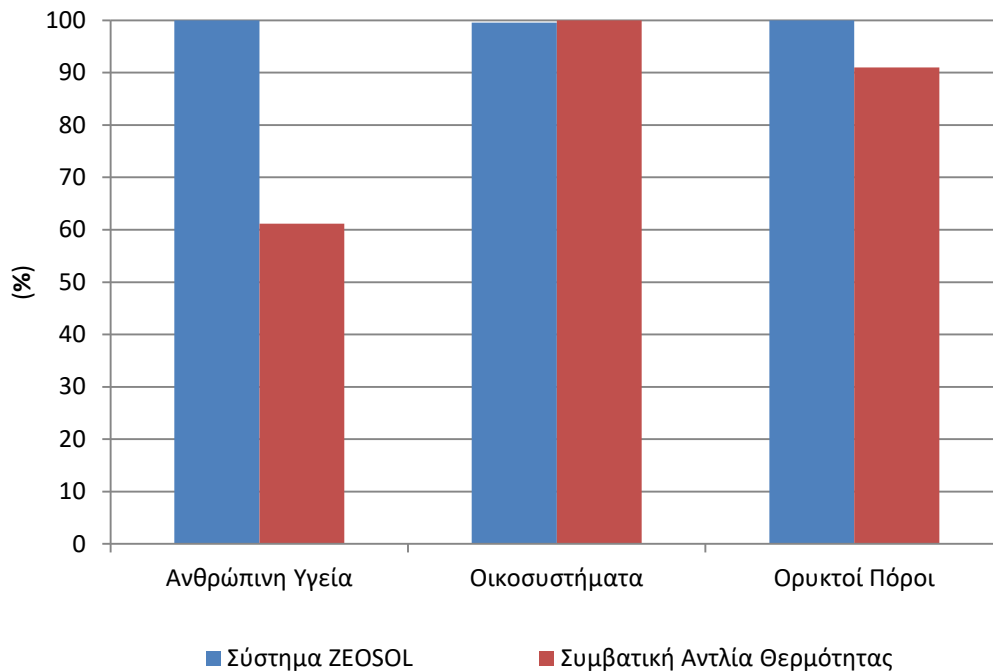
Εικ. 5.8 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ισπανία σε επίπεδο "endpoint"

Στην περίπτωση τοποθέτησης του συστήματος στη Μαδρίτη της Ισπανίας η εικόνα αντιστρέφεται. Ο αντίκτυπος του συστήματος ZEOSOL είναι υψηλότερος σε κάθε κατηγορία βλάβης, με την επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία να είναι υψηλότερη με ποσοστιαία διαφορά ίση με 46 % σε σχέση με τη συμβατική αντλία θερμότητας.



Εικ. 5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ιταλία σε επίπεδο "endpoint"

Στην Ιταλία, ο αντίκτυπος του συστήματος, σε σχέση με τη συμβατική αντλία θερμότητας, είναι μικρότερος στους ορυκτούς πόρους, σχεδόν ίσος στα οικοσυστήματα και μεγαλύτερος με ποσοστιαία διαφορά ίση με 40 % στην ανθρώπινη υγεία.



Εικ. 5.10 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε αναφορά με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Πορτογαλία σε επίπεδο “endpoint”

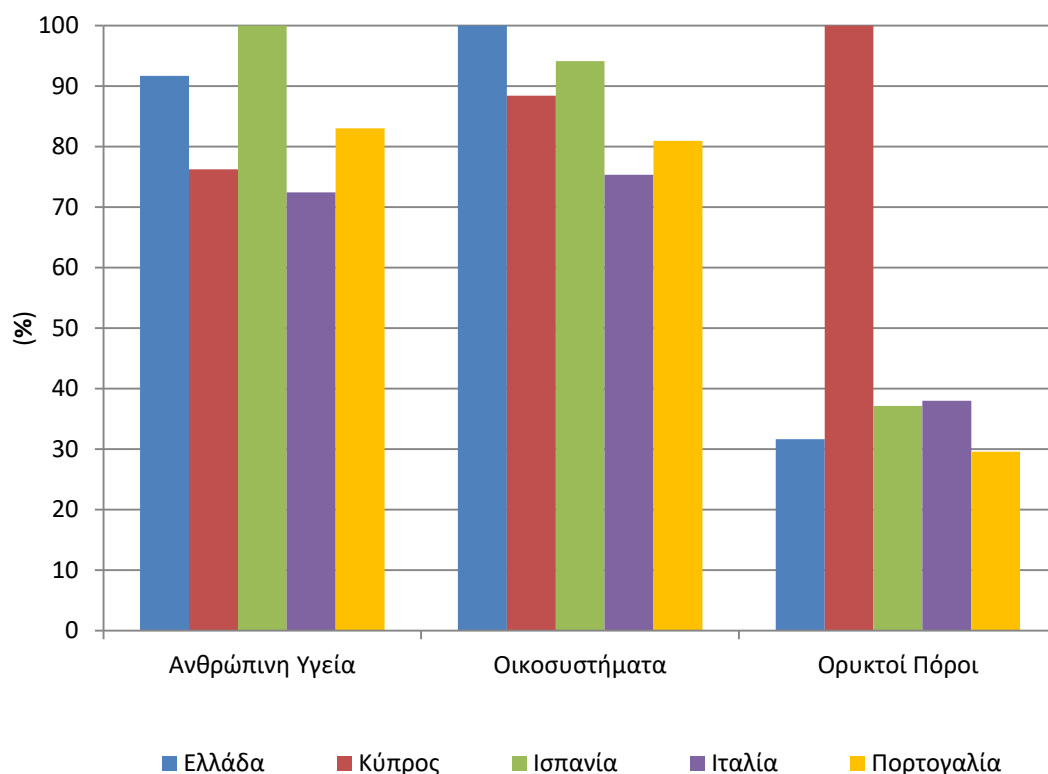
Στην Πορτογαλία, παρουσιάζονται παρόμοια αποτελέσματα με την Ισπανία. Ο αντίκτυπος της διάταξης είναι μεγαλύτερος στην ανθρώπινη υγεία, με ποσοστιαία διαφορά ίση με 39 %, καθώς και στους ορυκτούς πόρους σε σχέση με τη συμβατική αντλία θερμότητας, ενώ είναι ίσος στα οικοσυστήματα.

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για όλες τις χώρες. Αξίζει να αναφερθεί ότι, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τον αντίκτυπο της διάταξης σε κάθε κατηγορία επίπτωσης, στην περίπτωση όπου αυτός παρουσιάζεται υψηλότερος, είναι η κατανάλωση ηλεκτρισμού, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα των Εικ. Γ.1 έως Εικ. Γ.4 του παραρτήματος Γ.

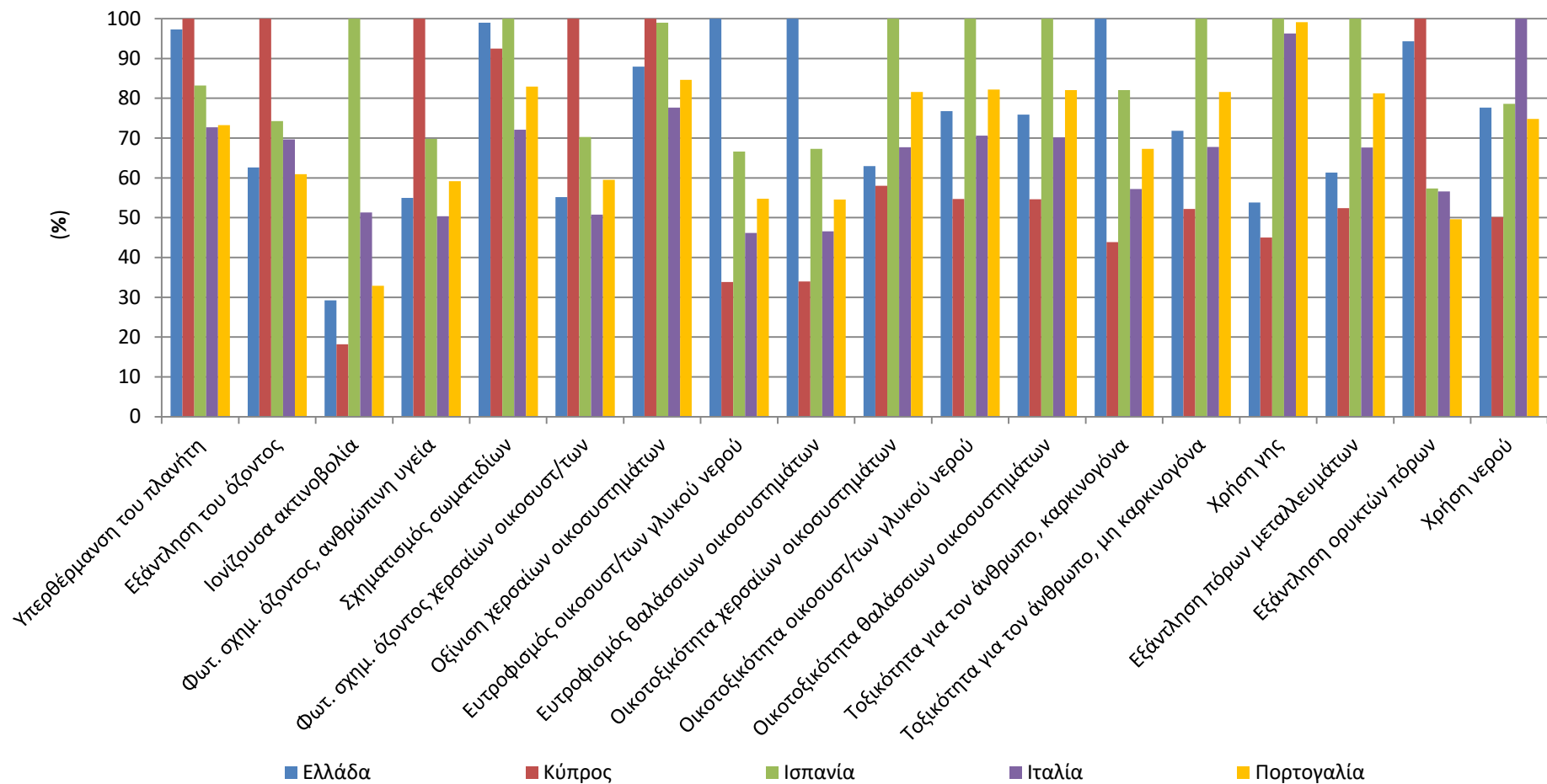
Από το διάγραμμα της Εικ. 5.12 παρατηρούμε τα εξής: Ιδιαίτερα εμφανής είναι ο υψηλότερος αντίκτυπος του συστήματος στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση των ορυκτών πόρων για εγκατάσταση στην Ελλάδα και στην Κύπρο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μείγμα ηλεκτρισμού των δύο χωρών, ο οποίος παράγεται στην πλειοψηφία του με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, με συνέπεια υψηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Στην περίπτωση της Κύπρου, παρατηρείται επίσης σημαντικά υψηλότερη επίπτωση στο σχηματισμό όζοντος, το οποίο οφείλεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανές εσωτερικής καύσης, το οποίο συνεπάγεται την εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x), καθώς και στην εξάντληση του όζοντος (πιθανώς από εκπομπές κατά την παραγωγή του πετρελαίου). Αντίστοιχα, η Ελλάδα παρουσιάζει τον υψηλότερο αντίκτυπο στον ευτροφισμό των οικοσυστημάτων, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και στην αντίστοιχη ενότητα, καθώς και στην καρκινογόνο τοξικότητα για τον άνθρωπο. Η Ισπανία, έχει τον υψηλότερο αντίκτυπο στην ιονίζουσα ακτινοβολία, στην οικοτοξικότητα των οικοσυστημάτων, στη μη καρκινογόνο τοξικότητα για τον άνθρωπο και στην εξάντληση των πόρων των μεταλλευμάτων. Όσον αφορά την ιονίζουσα ακτινοβολία, ο υψηλότερος αντίκτυπος σχετίζεται με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ισπανία, και τις εκπομπές ραδιενεργών σωματιδίων κατά την εξόρυξη του ουρανίου. Όσον αφορά τις τελευταίες κατηγορίες, οι οποίες επηρεάζονται κυρίως από το χαλκό, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά παραγόμενη kWh ψύξης και δεδομένου ότι η Ισπανία είναι η χώρα με τη μικρότερη απαίτηση σε ψύξη

σε κάθε kWh αντιστοιχεί μεγαλύτερο βάρος πρώτων υλών και πιο συγκεκριμένα χαλκού, ο οποίος ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό του αντικτύπου σε αυτές τις κατηγορίες. Τέλος, η Ιταλία, παρουσιάζει τον υψηλότερο αντίκτυπο στην χρήση νερού, το οποίο συνδέεται με την παραγωγή ηλεκτρισμού από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με ταμιευτήρα.

Σε επίπεδο “endpoint” (Εικ. 5.11), οι επιπτώσεις των διαφόρων χωρών στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μικρότερες από 30 %, με την Ιταλία να παρουσιάζει την καλύτερη επίδοση και την Ισπανία και την Ελλάδα να παρουσιάζουν τη χειρότερη στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα αντίστοιχα. Όσον αφορά τους ορυκτούς πόρους, η Κύπρος παρουσιάζει σημαντικά χειρότερη επίδοση από τις υπόλοιπες χώρες με διαφορά της τάξης του 62 % από την αμέσως επόμενη, ενώ την καλύτερη επίδοση παρουσιάζει η Πορτογαλία.



Εικ. 5.11 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση χώρες σε επίπεδο “endpoint”



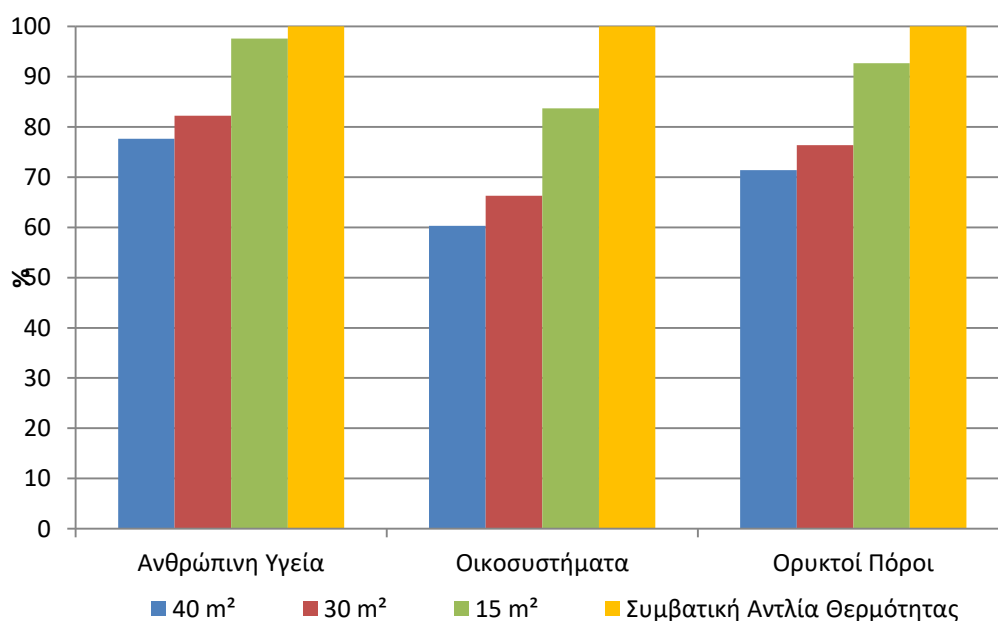
Εικ. 5.12 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση χώρες σε επίπεδο “midpoint”

5.2.3 Επίδραση της αλλαγής της επιφάνειας του πεδίου των συλλεκτών

Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας εξετάζεται η επίδραση της μείωσης της επιφάνειας του ηλιακού πεδίου στην περιβαλλοντική απόδοση της διάταξης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρήση ηλιακών συλλεκτών συνολικής επιφάνειας 30 και 15 m² αντί της αρχικής υπόθεσης των 40 m².

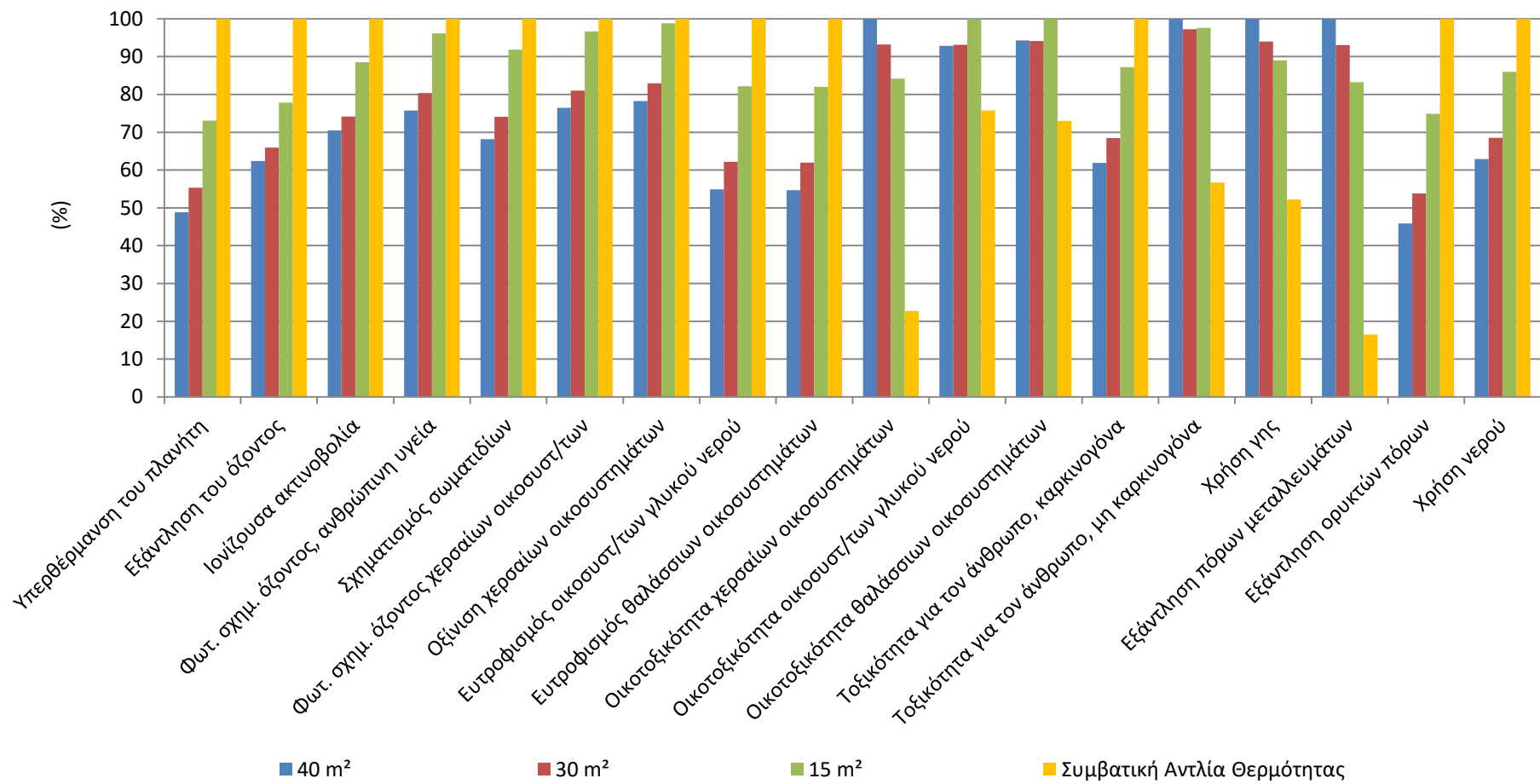
Προφανώς, αναμένεται μείωση της ηλιακής κάλυψης και αντίστοιχη αύξηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης από τη βοηθητική αντλία θερμότητας. Τα δεδομένα για την κατανάλωση και την ηλιακή κάλυψη δίνονται στον Πιν. Β.1 του παραρτήματος Β.

Από το διάγραμμα (Εικ. 5.14), στο οποίο έχει συμπεριληφθεί και ο αντίκτυπος της συμβατικής αντλίας θερμότητας, για εποπτικούς λόγους, παρατηρείται συμπεριφορά του συστήματος ανάλογη των παρατηρήσεων που έγιναν για την περίπτωση αναφοράς. Κατά αυτό τον τρόπο, παρατηρείται αύξηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου του συστήματος στις κατηγορίες επιπτώσεων των οποίων ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι η κατανάλωση ηλεκτρισμού. Σε κάθε περίπτωση, όμως, αυτός είναι μικρότερος της συμβατικής αντλίας θερμότητας. Αντίστοιχα, λόγω της μείωσης των πρώτων υλών της διάταξης παρατηρείται αντίστοιχη μείωση του αντικτύπου στις κατηγορίες που εξαρτώνται περισσότερο από αυτές. Άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι στην οικοτοξικότητα των θαλάσσιων και των οικοσυστημάτων γλυκού νερού, στις οποίες, όπως φαίνεται και στην Εικ. 5.2, ο αντίκτυπος των ηλιακών συλλεκτών και της κατανάλωσης ηλεκτρισμού είναι συγκρίσιμος, παρατηρείται αύξηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης της διάταξης, το οποίο συνεπάγεται ότι η μείωση του πεδίου των συλλεκτών και η συνεπακόλουθη μείωση των πρώτων υλών του συστήματος αποφέρει μικρότερο περιβαλλοντικό όφελος από την επιβάρυνση που επιφέρει η μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρισμού. Το γεγονός γίνεται πιο εμφανές για το πεδίο συλλεκτών ίσο με 15 m².



Εικ. 5.13 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τις διαφορετικές επιφάνειες συλλεκτών σε επίπεδο "endpoint"

Σε επίπεδο “endpoint” (Εικ. 5.13), παρουσιάζεται αύξηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου και στις τρεις κατηγορίες βλάβης όσο μειώνεται η επιφάνεια του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών, ενώ ακόμα και για πεδίο ίσο με 15 m^2 ο αντίκτυπος του συστήματος είναι μικρότερος αυτού της συμβατικής αντλίας θερμότητας.



Εικ. 5.14 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τις διαφορετικές επιφάνειες συλλεκτών σε επίπεδο "midpoint"

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και βελτιώσεις στο σύστημα

6.1. Συμπεράσματα

Όσον αφορά την περίπτωση αναφοράς, δηλαδή την εγκατάσταση του συστήματος ZEOSOL στην Αθήνα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε πολλές κατηγορίες επιπτώσεων την μεγαλύτερη επίδραση έχει η κατανάλωση ηλεκτρισμού και η μεγάλη μάζα πρώτων υλών και συγκεκριμένα χαλκού, που περιέχει το σύστημα. Το ερώτημα κατά πόσον υπάρχει περιβαλλοντικό όφελος από την αντικατάσταση των συμβατικών αντλιών θερμότητας με το υπό εξέταση σύστημα για την παροχή ψύξης πρέπει να απαντηθεί λαμβάνοντας υπόψη δύο σημαντικές παραμέτρους. Αρχικά, ως προς την υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση των ορυκτών πόρων, το σύστημα ZEOSOL παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερο αντίκτυπο, επομένως είναι προτιμητέο. Από την άλλη πλευρά, παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερο αντίκτυπο στην οικοτοξικότητα των οικοσυστημάτων και στην εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων. Ωστόσο, ο σταθμισμένος δείκτης επίδρασης του συστήματος στην ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και τους ορυκτούς πόρους είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της συμβατικής αντλίας θερμότητας, το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση του έναντι της αντλίας είναι περιβαλλοντικά συμφέρουσα. Όσον αφορά την διαχείριση των αποβλήτων μετά το τέλος ζωής του συστήματος, δε μπορεί να επιλεγεί κάποιο από τα δύο εξεταζόμενα σενάρια ως σημαντικά περιβαλλοντικά ωφέλιμο.

Η μελέτη της επίδρασης της τοποθεσίας της εγκατάστασης του συστήματος, έδειξε ότι το όποιο περιβαλλοντικό όφελος αυτής συνδέεται άμεσα με το μείγμα ηλεκτρισμού της χώρας και των απαιτήσεων της τοποθεσίας για ψύξη. Η μόνη χώρα στην οποία είναι αδιαμφισβήτητα περιβαλλοντικά συμφέρουσα η χρήση του συστήματος, είναι η Κύπρος. Στις υπόλοιπες χώρες, η εγκατάσταση του συστήματος συνεπάγεται μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με τη συμβατική αντλία θερμότητας, ενώ μπορεί να δικαιολογηθεί μόνο στην περίπτωση της Ιταλίας, αν υπάρχει συγκεκριμένο ενδιαφέρον για τους ορυκτούς πόρους.

Τέλος, η ανάλυση ευαισθησίας σε αναφορά με τη μείωση της επιφάνειας του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών, παρουσιάζει αναμενόμενα αποτελέσματα, τα οποία υποδεικνύουν ότι δεν είναι μία περιβαλλοντικά συμφέρουσα επιλογή. Αρχικά, συνεπάγεται αύξηση του αντικτύπου στις κατηγορίες επιπτώσεων που συνδέονται με την κατανάλωση ηλεκτρισμού, στις οποίες πρωτίστως το σύστημα υπερτερούσε σημαντικά έναντι της συμβατικής αντλίας θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, η μείωση της μάζας του συστήματος δεν επιφέρει αξιόλογο περιβαλλοντικό όφελος στις κατηγορίες που επηρεάζονται από τις πρώτες ύλες, διατηρώντας υψηλό τον αντίστοιχο αντίκτυπο σε σχέση με τη συμβατική αντλία θερμότητας. Η εικόνα γίνεται πιο σαφής στις κατηγορίες βλαβών, όπου μείωση της επιφάνειας των συλλεκτών συνεπάγεται αύξηση του αντικτύπου σε όλες εξ' αυτών.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος μείζονος σημασίας είναι ο σχεδιασμός αυτού ώστε να μειωθεί η μάζα των μετάλλων και ίσως η αντικατάσταση του χαλκού ορισμένων εξαρτημάτων του συστήματος με άλλα μέταλλα ή υλικά .

6.2. Αξιοπιστία δεδομένων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Προκειμένου να αξιολογηθεί η παρούσα μελέτη, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα αυτής. Αρχικά πρέπει να εξακριβωθεί η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του συστήματος σε επίπεδο συλλογής, προτού μοντελοποιηθούν μέσω της βάσης δεδομένων της ecoinvent. Επιπλέον, πρέπει να διαπιστωθεί η επίδραση της επιλογής της βάσης δεδομένων της

ecoinvent όσον αφορά την αντιπροσωπευτικότητα αυτής, καθώς τα δεδομένα της αφορούν ήδη εμπορικές τεχνολογίες, ενώ το υπό εξέταση σύστημα είναι υπό ανάπτυξη. Ανάλογη εκτίμηση πρέπει να γίνει και για την επίδραση της μεθόδου ReCiPe.

Κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος ψύξης ZEOSOL δε συμπεριλήφθηκαν όλες οι συνιστώσες αυτού λόγω έλλειψης δεδομένων. Επιπλέον, έγιναν διάφορες προσεγγίσεις σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του συστήματος, με σημαντικότερη ίσως τις προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης του συστήματος, καθώς όπως διαπιστώθηκε έχει μεγάλη επίδραση σε πολλές κατηγορίες επιπτώσεων. Αντίστοιχα ισχύουν και για τη συμβατική αντλία θερμότητας, η ηλεκτρική κατανάλωση της οποίας υπολογίστηκε, λόγω έλλειψης ακριβών δεδομένων, με προσέγγιση του συντελεστή συμπεριφοράς αυτής (COP).

Επομένως, ένα σημείο για περαιτέρω έρευνα είναι η πλήρης και ακριβής καταγραφή των πρώτων υλών καθώς και της προέλευσης αυτών, των διαδικασιών παραγωγής που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή του συστήματος, της ηλεκτρικής κατανάλωσης σε πραγματικές συνθήκες, του τρόπου καθώς και των αποστάσεων μεταφοράς και των διαδικασιών επεξεργασίας των αποβλήτων. Όσον αφορά τη συμβατική αντλία θερμότητας, πρέπει να γίνει αντίστοιχη καταγραφή για μία σύγχρονη αντλία θερμότητας τύπου αέρα – νερού και αντίστοιχης ονομαστικής ισχύος.

Δεδομένων των υψηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων τις οποίες συνεπάγεται η χρήση χαλκού, θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί η αντικατάσταση των στοιχείων σύνδεσης των συνιστωσών της εγκατάστασης και κυρίως των σωληνώσεων, με άλλα υλικά όπως για παράδειγμα πλαστικό.

Επιπλέον, θα ήταν ενδιαφέρουσα η διεξαγωγή παρόμοιας μελέτης για ένα σύστημα ηλιακής ψύξης με ψύκτη απορρόφησης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το σύστημα ZEOSOL, καθώς και η μελέτη της περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συνολικά για τον κλιματισμό του κτηρίου, δηλαδή και για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης.

Ένα ακόμα σημείο για μελλοντική μελέτη είναι η χρήση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων, προκειμένου να διαπιστωθεί η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων.

Παράρτημα Α. Πίνακες εισόδου του συστήματος

Πιν. Α.1. Είσοδοι για τη βοηθητική αντλία θερμότητας και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent

Συνιστώσα ή μέρος του κύκλου ζωής του προϊόντος	Είσοδοι (Πρώτες ύλες, Κατεργασίες, Ενέργεια)	Τιμή	Μονάδα	Σετ δεδομένων ecoinvent
Συμπιεστής	Χυτοσίδηρος	33.18	kg	Cast iron (GLO) market for Cut-off, U
	Ανοξείδωτος χάλυβας	21.49	kg	Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for Cut-off, U
	Χαλκός	5.16	kg	Copper (GLO) market for Cut-off, U
Ψυκτικό μέσο	R-134a	3.31	kg	Refrigerant R134a (RER) production Cut-off, U
Λιπαντικό έλαιο	Πολυεστερικό έλαιο	5,80	kg	Lubricating oil (RER) production Cut-off, U
Κατασκευή Συμπιεστή	Ηλεκτρισμός (Μεσαίας τάσης)	83.89	kWh	Electricity, medium voltage (RER) market group for Cut-off, U
Πλακοειδείς Εναλλάκτες	Ανοξείδωτος χάλυβας	30	kg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled (GLO) market for Cut-off, U
Κατασκευή πλακοειδών εναλλακτών	Ηλεκτρισμός (Μεσαίας τάσης)	12.042	MJ	Electricity, medium voltage (RER) market group for Cut-off, U
	Θερμότητα (Φυσικό αέριο)	12.042	MJ	Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U

Πιν. Α.2 Είσοδοι για τη συμβατική αντλία θερμότητας και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent

Συνιστώσα ή μέρος του κύκλου ζωής του προϊόντος	Είσοδοι (Πρώτες ύλες, Κατεργασίες, Ενέργεια)	Τιμή	Μονάδα	Σετ δεδομένων ecoinvent
Ατμοποιητής και συμπυκνωτής	Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	40	kg	Steel, low-alloyed, hot rolled (GLO) market for Cut-off, U
	Κατεργασία χάλυβα	40	kg	Metal working, average for steel product manufacturing (RER) processing Cut-off, U
Περίβλημα και συμπιεστής	Χάλυβας (Reinforcing steel)	150	kg	Reinforcing steel (GLO) market for Cut-off, U
	Κατεργασία χάλυβα	150	kg	Metal working, average for steel product manufacturing (RER) processing Cut-off, U
Καλωδίωση, σωλήνωση και	Χαλκός	44	kg	Copper (GLO) market for Cut-off, U

εκτονωτική βαλβίδα	Κατεργασία χαλκού	44	kg	Metal working, average for copper product manufacturing (RER) processing Cut-off, U
Μόνωση σωλήνωσης	Ελαστομερές	20	kg	Tube insulation, elastomere (GLO) market for Cut-off, U
Μόνωση καλωδίωσης	Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	2	kg	Polyvinylchloride, suspension polymerised (GLO) market for Cut-off, U
Λιπαντικό έλαιο	Πολυεστερικό έλαιο	3.375	kg	Lubricating oil (RER) production Cut-off, U
Ανεμιστήρας	Χαλκός	1.75	kg	Copper (GLO) market for Cut-off, U
	Κατεργασία χαλκού	1.75	kg	Metal working, average for copper product manufacturing (RER) processing Cut-off, U
	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	0.625	kg	Polyethylene, high density, granulate (GLO) market for Cut-off, U
Ψυκτικό μέσο	Χύτευση με έγχυση R-134a	0.625	kg	Injection moulding (RER) processing Cut-off, U
	R-134a	13.66	kg	Refrigerant R134a (RER) production Cut-off, U
Συναρμολόγηση αντλίας	Ηλεκτρισμός (Μεσαίας τάσης)	630	MJ	Electricity, medium voltage (RER) market group for Cut-off, U
	Θερμότητα (Φυσικό αέριο)	1750	MJ	Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U

Πιν. Α.3 Είσοδοι για τα στοιχεία σύνδεσης των συνιστωσών της εγκατάστασης και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent

Συνιστώσα ή μέρος του κύκλου ζωής του προϊόντος	Είσοδοι (Πρώτες ύλες, Κατεργασίες, Ενέργεια)	Τιμή	Μονάδα	Σετ δεδομένων ecoinvent
Δοχείο διαστολής	Ανοξείδωτος χάλυβας	10.4	kg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled (GLO) market for Cut-off, U
Σωλήνωση χαλκού Φ 22x0.9 (6 m)	Χαλκός	3.186	kg	Copper (GLO) market for Cut-off, U
	Κατεργασία (διέλαση) χαλκού	3.186	kg	Wire drawing, copper (RER) processing Cut-off, U
Σωλήνωση χαλκού Φ 35x1.0 (21 m)	Χαλκός	19.95	kg	Copper (GLO) market for Cut-off, U
	Κατεργασία (διέλαση) χαλκού	19.95	kg	Wire drawing, copper (RER) processing Cut-off, U
Πολυστρωματική μόνωση σωλήνωσης Φ 26 (PEX)	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	17	kg	Polyethylene, high density, granulate (GLO) market for Cut-off, U
	Εξέλαση πλαστικού σωλήνα	17	kg	Extrusion, plastic pipes (RER) production Cut-off, U
Πολυστρωματική μόνωση σωλήνωσης Φ 26 (PEX)	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	2.5	kg	Polyethylene, high density, granulate (GLO) market for Cut-off, U
	Εξέλαση πλαστικού σωλήνα	2.5	kg	Extrusion, plastic pipes (RER) production Cut-off, U
Ορειχάλκινα εξαρτήματα	Ορειχάλκος	90.359	kg	Brass (RoW) market for brass Cut-off, U
	Κατεργασία ορειχάλκου	50.263	kg	Brass removed by drilling, computer numerical controlled (RER) brass

Χάλκινα εξαρτήματα				drilling, computer numerical controlled Cut-off, U
	Χαλκός	3.14	kg	Copper (GLO) market for Cut-off, U
	Κατεργασία χαλκού	3.14	kg	Metal working, average for copper product manufacturing (RER) processing Cut-off, U

Πιν. Α.4 Αποστάσεις μεταφοράς και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent

Οδικές Μεταφορές			
Αφετηρία	Προορισμός	Απόσταση (km)	Σετ δεδομένων ecoinvent
Γερμανία (Λειψία)	Ελλάδα (Αθήνα)	2450	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER) transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
	Ιταλία (Νάπολη)	1550	
	Ισπανία (Μαδρίτη)	2250	
	Πορτογαλία (Λισαβόνα)	2710	
Ιταλία (Βόρεια Ιταλία)	Ελλάδα (Αθήνα)	2100	
	Ιταλία (Νάπολη)	800	
	Ισπανία (Μαδρίτη)	1700	
	Πορτογαλία (Λισαβόνα)	2200	
Ολλανδία (Ρότερνταμ)	Γερμανία (Λειψία)	600	
Λοιπές μεταφορές εντός Ευρώπης		1000	
Χώρος Εγκατάστασης	Χώρος Ταφής/Καύσης αποβλήτων	24	Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry (RoW) processing Cut-off, U
Θαλάσσιες Μεταφορές			
Αφετηρία	Προορισμός	Απόσταση (km)	Σετ δεδομένων ecoinvent
Ελλάδα (Πειραιάς)	Κύπρος (Λάρνακα)	1100	Transport, freight, sea, transoceanic ship (GLO) market for Cut-off, U

Παράρτημα Β. Υπολογισμός ηλεκτρικής κατανάλωσης

Η μοντελοποίηση του συστήματος ψύξης ZEOSOL χωρίστηκε σε τρία μέρη προκειμένου να γίνει μια πιο ακριβής εκτίμηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας:

- τη μοντελοποίηση των ηλιακών συλλεκτών και του δοχείου αποθήκευσης
- τη μοντελοποίηση του υποσυστήματος ψύκτης προσρόφησης- ξηρός πύργος ψύξης- βοηθητική αντλία θερμότητας και
- τη στρατηγική ελέγχου για την κάλυψη των φορτίων ενός τυπικού σπιτιού στην Αθήνα με σχετικές θερμικές ανάγκες.

Ηλιακοί Συλλέκτες

Η απόδοση των συλλεκτών υπολογίστηκε με τη χρήση μιας εμπειρικής πολυωνυμικής σχέσης:

$$\eta_{col} = c_0 - c_1\theta - c_2I_{sol}\theta^2 \quad (1)$$

όπου

$$\theta = \frac{T_{col} - T_{amb}}{I_{sol}} \quad (2)$$

με I_{sol} να αναφέρεται στην ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Οι τιμές των συντελεστών των συλλεκτών είναι εμπιστευτικοί και δε δημοσιεύονται. Η απόδοση των συλλεκτών δίνεται στην Εικ. 3.7.

Βάση της εξίσωσης (1) προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση των συλλεκτών, η θερμοκρασία του συλλέκτη, T_{col} , πρέπει να είναι ήδη καθορισμένη. Για την απλοποίηση των υπολογισμών η θερμοκρασία που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (1), έχει θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην εξερχόμενη θερμοκρασία του συλλέκτη, $T_{col,out}$. Ωστόσο, αυτή η θερμοκρασία είναι η κύρια παράμετρος εξόδου που χρειάζεται για τη μοντελοποίηση των ηλιακών συλλεκτών. Ως εκ τούτου, γίνεται μία αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας και εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία για τον καθορισμό αυτής. Εντός της επαναληπτικής διαδικασίας η εκτιμώμενη θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αντίστοιχης απόδοσης. Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της απόδοσης των συλλεκτών μπορεί να καθορισθεί η θερμότητα που απορροφάται, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{col}}{A_{col}I_{sol}} \Rightarrow \dot{Q}_{col} = \eta_{col}A_{col}I_{sol} \quad (3)$$

Επομένως, η θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού όταν εξέρχεται από τους συλλέκτες μπορεί να καθορισθεί ως εξής:

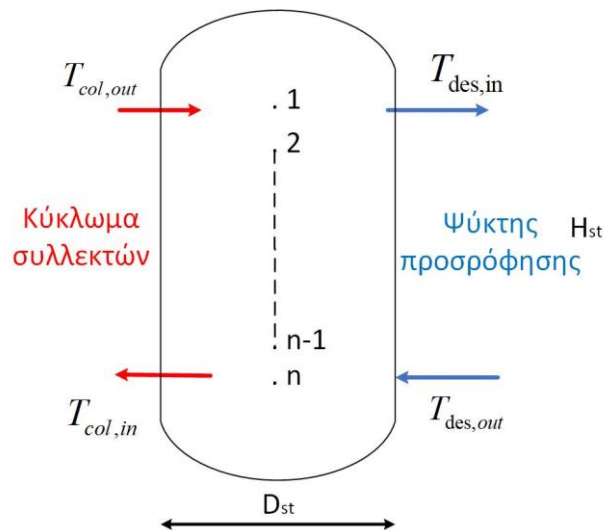
$$T_{col,out} = T_{col,in} + \frac{\dot{Q}_{col}}{\dot{m}_{col}c_{p,T_{col,in}}} \quad (4)$$

Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το σχετικό σφάλμα μεταξύ της εκτίμησης της θερμοκρασίας $T_{col,out}$ και της υπολογιζόμενης μέσω της σχέσης (4) τιμής να βρίσκεται εντός ενός αποδεκτού εύρους:

$$abs(rel. error) = \left| \frac{T_{col,out} - T_{guess}}{T_{guess}} \right| < 0.75\% \quad (5)$$

Δοχείο Αποθήκευσης

Η εφαρμογή μιας τεχνολογίας αποθήκευσης μεταξύ του ψύκτη προσρόφησης και των ηλιακών συλλεκτών είναι απαραίτητη για την απορρόφηση των αιχμών ενέργειας που σχετίζονται με τα τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα και την παροχή μιας πιο σταθερής εισόδου στον εκροφητή. Η μοντελοποίηση του δοχείου αποθήκευσης βασίζεται στην υπόθεση ύπαρξης ενός αριθμού ζωνών ανάμιξης εντός αυτού. Για κάθε ζώνη ανάμιξης θεωρείται μία ομοιόμορφη θερμοκρασία. Σε κάθε ζώνη εφαρμόζεται ισοζύγιο ενέργειας και μάζας προκειμένου να μοντελοποιηθεί η μεταφορά θερμότητας και μάζας μεταξύ των ορίων αυτής. Δεδομένου ότι το μοντέλο του δοχείου αποθήκευσης αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε ένα πιο σύνθετο σύστημα με μεταβλητά μετεωρολογικά δεδομένα σε ωριαία βάση, επιλέχθηκε διακριτοποίηση με την έμμεση μέθοδο Euler (Euler implicit), ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του μαθηματικού συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή [65].



Εικ. Β.1 Απεικόνιση διακριτοποίησης δοχείου αποθήκευσης

Για έναν αριθμό n στοιχείων εντός του δοχείου αποθήκευσης και για ένα χρονικό διάστημα Δt (για χρόνο $t-1$ έως t) πρέπει να ικανοποιούνται τα ακόλουθα ισοζύγια ενέργειας [66]:

Στοιχείο 1:

$$\begin{aligned} \frac{M_{st}}{n} c_p \frac{T_{st}(t, 1) - T_{st}(t-1, 1)}{\Delta t} &= \dot{m}_{col} c_p [T_{col,out} - T_{st}(t, 1)] \\ &+ \dot{m}_{des} c_p [T_{st}(t, 2) - T_{st}(t, 1)] - U_l A_{st}(1) [T_{st}(t, 1) - T_{amb}] \end{aligned} \quad (6)$$

Στοιχεία [2, 3, ..., n-1]:

$$\begin{aligned} \frac{M_{st}}{n} c_p \frac{T_{st}(t,j) - T_{st}(t-1,j)}{\Delta t} &= \dot{m}_{col} c_p [T_{st}(t,j-1) - T_{st}(t,j)] \\ &+ \dot{m}_{des} c_p [T_{st}(t,j+1) - T_{st}(t,j)] - U_l A_{st}(j) [T_{st}(t,j) - T_{amb}] \end{aligned} \quad (7)$$

Στοιχείο n:

$$\begin{aligned} \frac{M_{st}}{n} c_p \frac{T_{st}(t,n) - T_{st}(t-1,n)}{\Delta t} &= \dot{m}_{col} c_p [T_{st}(t,n-1) - T_{st}(t,n)] \\ &+ \dot{m}_{des} c_p [T_{des,out} - T_{st}(t,n)] - U_l A_{st}(n) [T_{st}(t,n) - T_{amb}] \end{aligned} \quad (8)$$

Ο συντελεστής απωλειών του δοχείου αποθήκευσης, U_l , θεωρείται ίσος με $0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Η συνολική μάζα του δοχείου αποθήκευσης υπολογίζεται από την χωρητικότητα του δοχείου αποθήκευσης:

$$M_{st} = \rho_{eg(aq)} V_{st} \quad (9)$$

Η συνολική επιφάνεια των ζωνών ανάμιξης υπολογίζεται ως εξής:

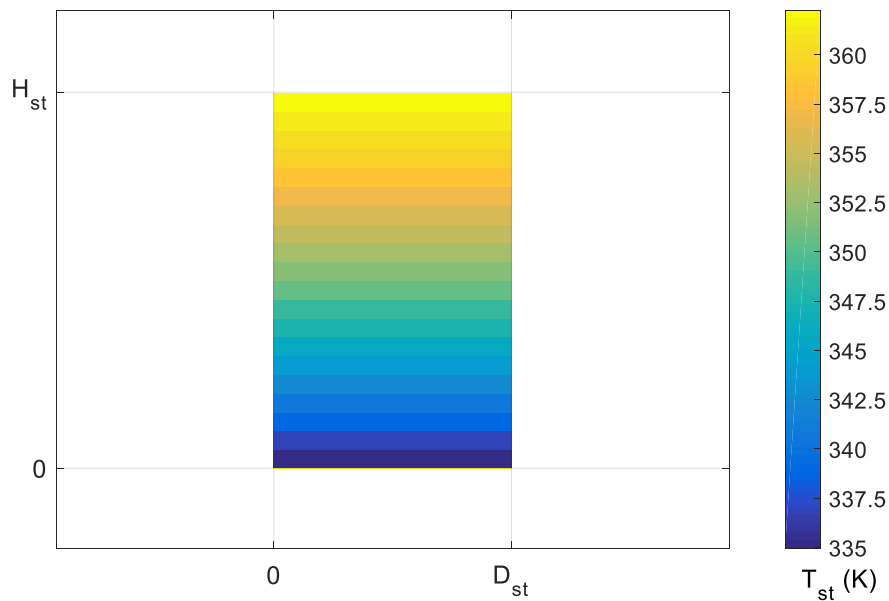
Στοιχεία 1 and n:

$$A_{st}(1) = \frac{\pi D_{st}^2}{4} + \frac{\pi H_{st} D_{st}}{n} \quad (10)$$

Στοιχεία [2, 3, ..., n-1]:

$$A_{st}(j) = \frac{\pi H_{st} D_{st}}{n} \quad (11)$$

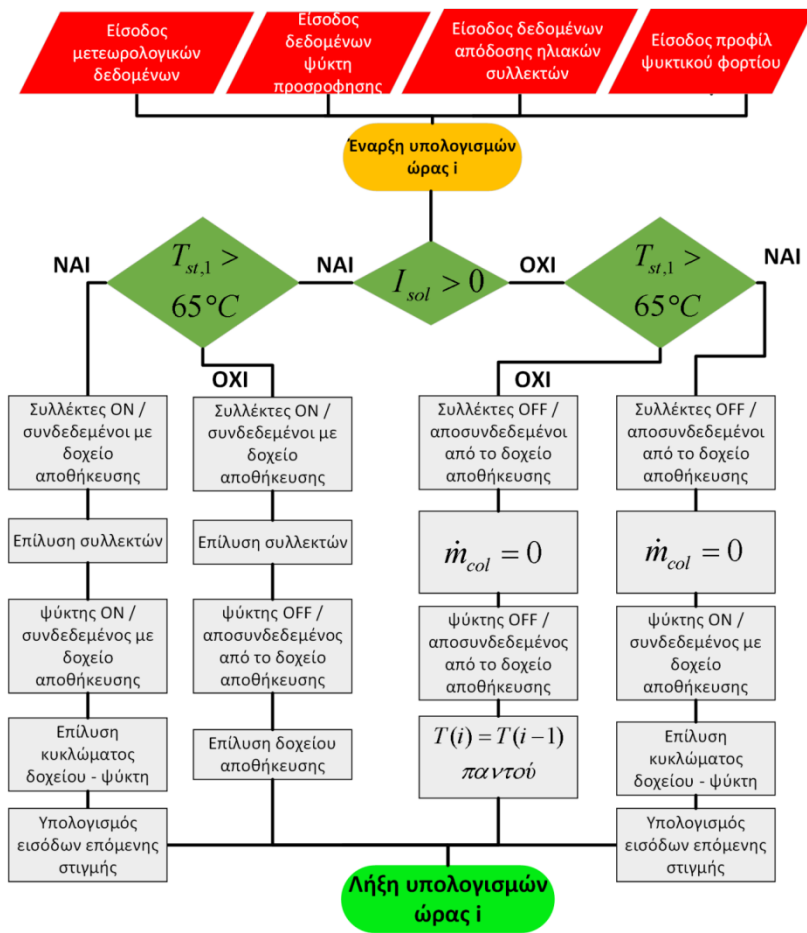
Τροποποιώντας το άνωθεν σύστημα εξισώσεων σε πινακοειδή μορφή, μπορεί να μοντελοποιηθεί και να επιλυθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους εισόδου τις παροχές μάζας των κυκλωμάτων των ηλιακών συλλεκτών και του κυκλώματος υψηλής θερμοκρασίας (HT) του ψύκτη προσρόφησης, \dot{m}_{col} και \dot{m}_{des} αντίστοιχα, καθώς και τη θερμοκρασία εξόδου από τους συλλέκτες $T_{col,out}$ και τη θερμοκρασία εξόδου από τον εκροφητή, $T_{des,out}$. Η θερμοκρασία εξόδου από το δοχείο αποθήκευσης προς τον εκροφητή, $T_{des,in}$, θεωρήθηκε ότι είναι ίση με τη θερμοκρασία του πρώτου στοιχείου, ενώ η θερμοκρασία εξόδου προς τους συλλέκτες, $T_{col,in}$, θεωρήθηκε ίση με τη θερμοκρασία του τελευταίου (κατώτερου) στοιχείου του δοχείου αποθήκευσης.



Εικ. Β.2 Θερμική διαστρωμάτωση εντός του δοχείου αποθήκευσης θεωρώντας 20 κόμβους ($T_{col,out}=90$ °C, $T_{des,out}=60$ °C, $T_{amb}=25$ °C)

Σύζευξη του δοχείου αποθήκευσης με τους ηλιακούς συλλέκτες

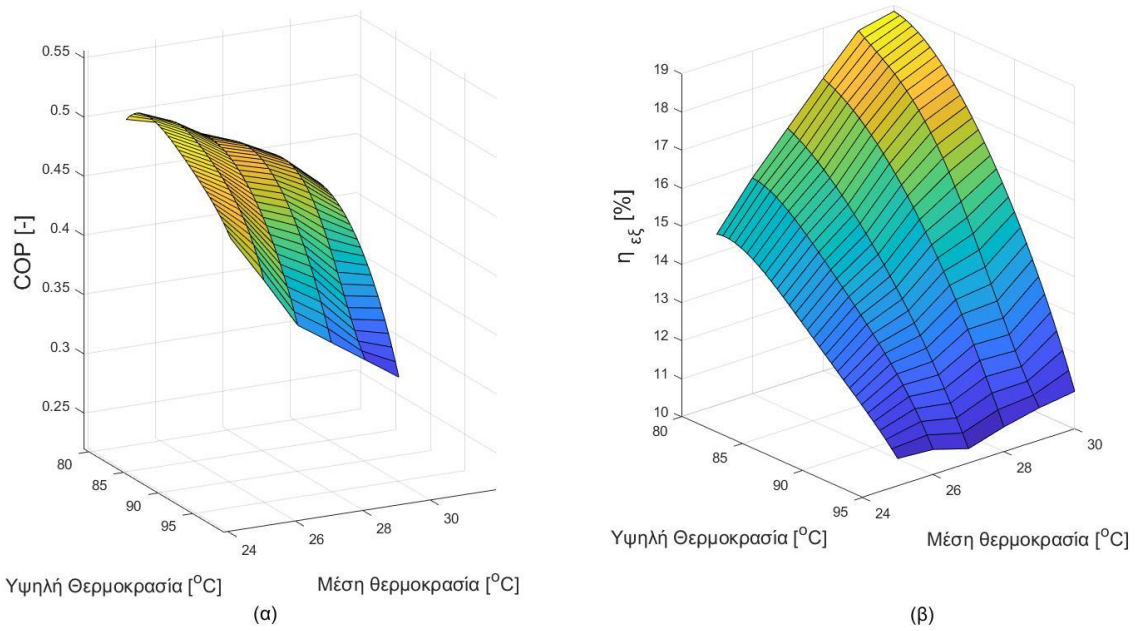
Για το υποσύστημα των ηλιακών συλλεκτών και το υποσύστημα δοχείο αποθήκευσης – ψύκτης προσρόφησης, επιλέχθηκε μία ON-OFF στρατηγική. Ως αποτέλεσμα, όταν υπάρχει πλήρης έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας οι ηλιακοί συλλέκτες αποσυνδέονται από το δοχείο αποθήκευσης, ενώ όταν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, το εργαζόμενο ρευστό του κυκλώματος των ηλιακών συλλεκτών ρέει με την ονομαστική παροχή μεταφέροντας θερμότητα στο δοχείο αποθήκευσης. Όσον αφορά το υποσύστημα του ψύκτη προσρόφησης, επιλέχθηκε να ορισθεί μία θερμοκρασία κατωφλίου της τάξης των 65 °C, πάνω από την οποία ο ψύκτης προσρόφησης τροφοδοτείται με θερμότητα από το δοχείο αποθήκευσης. Η προαναφερθείσα στρατηγική συνοψίζεται στην Εικ. Β.3.



Εικ. Β.3 Διάγραμμα ροής για την επίλυση του μοντέλου ZEOSOL

Μοντέλο υπολογισμού ψύκτη προσρόφησης

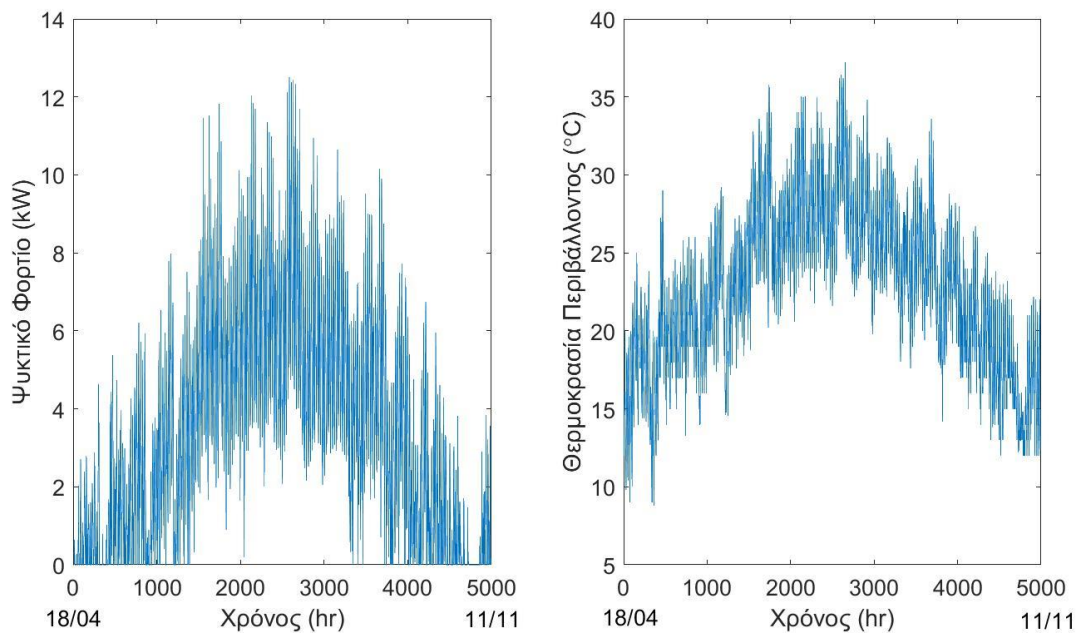
Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η απόδοση του ψύκτη προσρόφησης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα προηγούμενης μελέτης. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν αναφορικά με έναν ψύκτη προσρόφησης ζεολίθου – νερού ισχύος 10 kW [47, 67]. Μέσω αριθμητικής παρεμβολής των εν λόγω αποτελεσμάτων εφικτό να υπολογιστούν οι ίδιες παράμετροι που υπολογίζει και το πραγματικό μοντέλο του ψύκτη προσρόφησης με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και σε πολύ μικρότερο χρόνο. Για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος παρεμβολής “thin-plate spline”. Ως εκ τούτου, κατά την εκτέλεση του συγκεντρωτικού μοντέλου του ZEOSOL το εν λόγω μοντέλο παρεμβολής χρησιμοποιεί σαν εισόδους τη θερμοκρασία του θερμού νερού που έρχεται από το δοχείο αποθήκευσης και τη θερμοκρασία του νερού που επιστρέφει από τον ξηρό πύργο ψύξης και δίδει σαν έξοδο το COP. Μία παρόμοια συνάρτηση παρεμβολής έχει αναπτυχθεί και για τον ακριβή υπολογισμό παραγωγής ψύξης από τον ψύκτη προσρόφησης.



Εικ. Β.4 Καμπύλες λειτουργίας ψύκτη προσρόφησης

Ψυκτικό Φορτίο

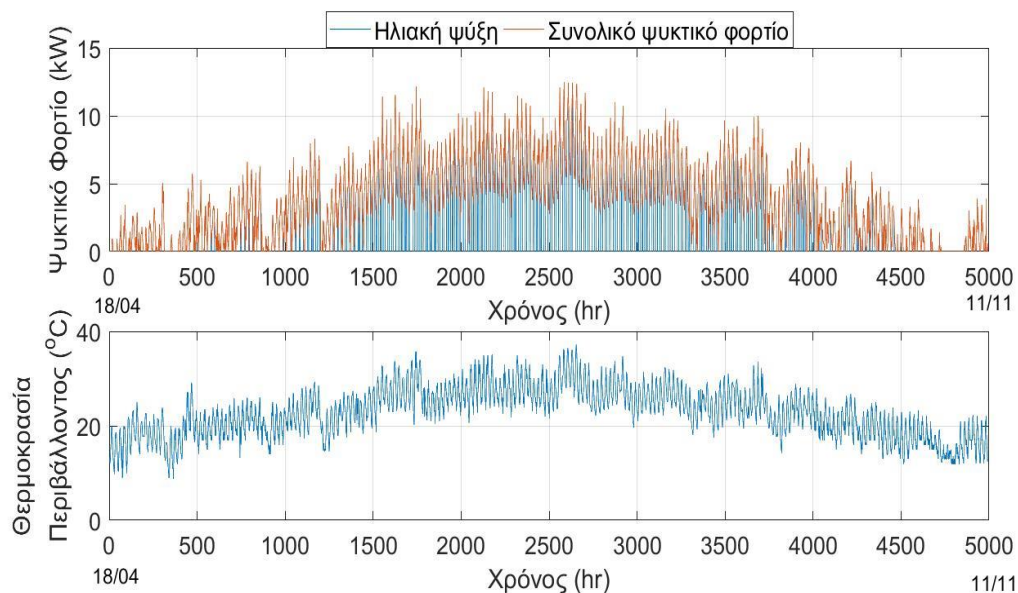
Προκειμένου να εξασφαλιστεί αυξημένη ακρίβεια, αναπτύχθηκε ένα απλό μοντέλο κτηρίου τέτοιο ώστε να έχει μέγιστο ψυκτικό φορτίο ίσο με 12.5 kW, χρησιμοποιώντας το λογισμικό EnergyPlus, και προσομοιώθηκε με τα μετεωρολογικά δεδομένα της Αθήνας. Ως εκ τούτου, ένα αρκετά ακριβές μοντέλο των ψυκτικών φορτίων για μία ολόκληρη ψυκτική περίοδο μπορεί να εξαχθεί και τελικά να χρησιμοποιηθεί στη σύζευξη με το μοντέλο του συστήματος ZesosoI, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση αυτού. Η απεικόνιση του προφίλ του ψυκτικού φορτίου για ολόκληρη την ψυκτική περίοδο δίνεται στην Εικ. Β. 5.



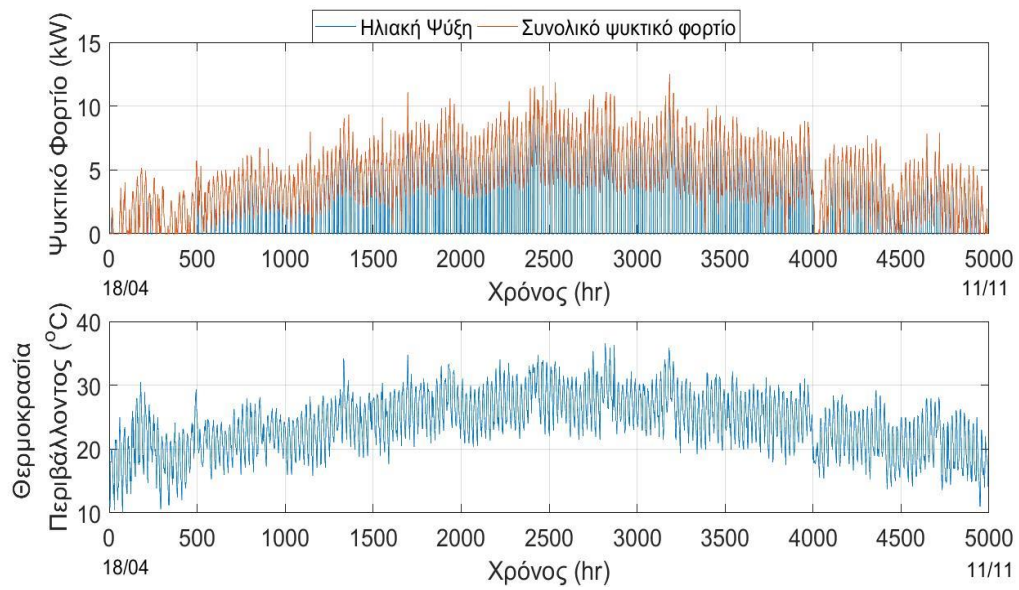
Εικ. Β.5 Απεικόνιση του ψυκτικού φορτίου και της θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την ψυκτική περίοδο στην Αθήνα όπως υπολογίστηκαν από το EnergyPlus

Αποτελέσματα μοντελοποίησης ZEOSOL

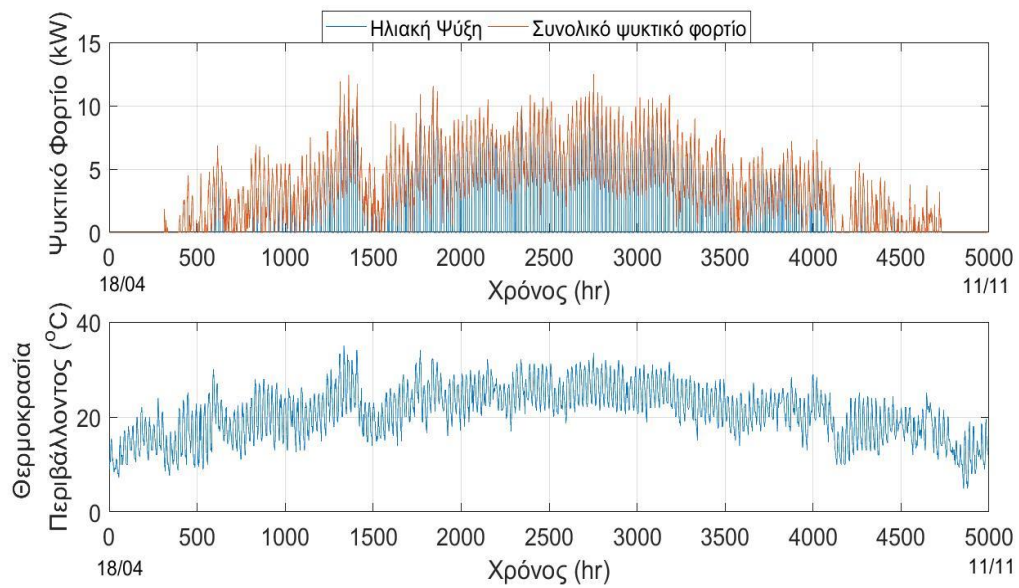
Εισαγάγοντας τα μοντέλα των επιμέρους συστημάτων και τα δεδομένα για το μερικό φορτίο του ξηρού πύργου ψύξης, καθώς επίσης θέτοντας την επιφάνεια των συλλεκτών ίση με 40 m², το μοντέλο εκτελέστηκε για τα μετεωρολογικά δεδομένα της Αθήνας (το αρχείο με τα μετεωρολογικά δεδομένα ελήχθει από το λογισμικό EnergyPlus έτσι ώστε να διατηρείται η ομοιογένεια των υπολογισμών). Τα τελικά αποτελέσματα για μία ψυκτική περίοδο συνοψίζονται στην Εικ. Β. 6. Πιο συγκεκριμένα, για ένα μέγιστο ψυκτικό φορτίο 12.5 kW, οι συνολικές ψυκτικές απαιτήσεις του κτηρίου υπολογίστηκαν από το EnergyPlus ίσες με 4896,26 kWh, που αντιστοιχεί σε ηλεκτρική κατανάλωση ίση με 1664,6 kWh. Από την άλλη πλευρά η ηλιακή κάλυψη που επιτυγχάνεται με το σύστημα ZEOSOL ανήλθε, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, σε ποσοστό 66%, οδηγώντας σε μία εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας περί τις 3231 kWh. Ανάλογα, προέκυψαν αποτελέσματα και για τις άλλες υπό εξέταση πόλεις (Εικ. Β. 7 έως Εικ. Β. 10), τα οποία συγκεντρώνονται στον Πιν. Β. 1. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και τα αποτελέσματα για τη διαφορετική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών.



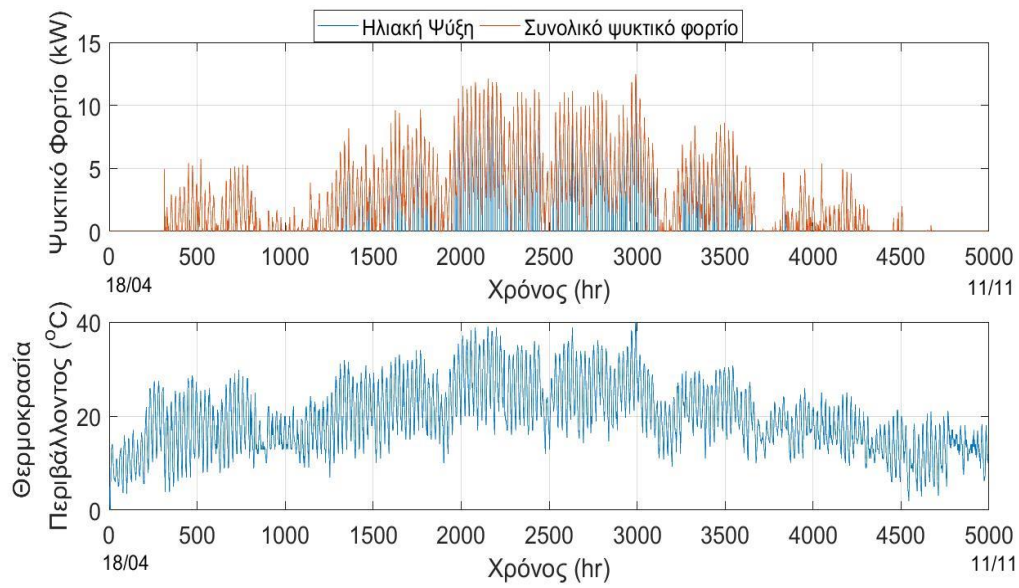
Εικ. Β.6 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για την Αθήνα



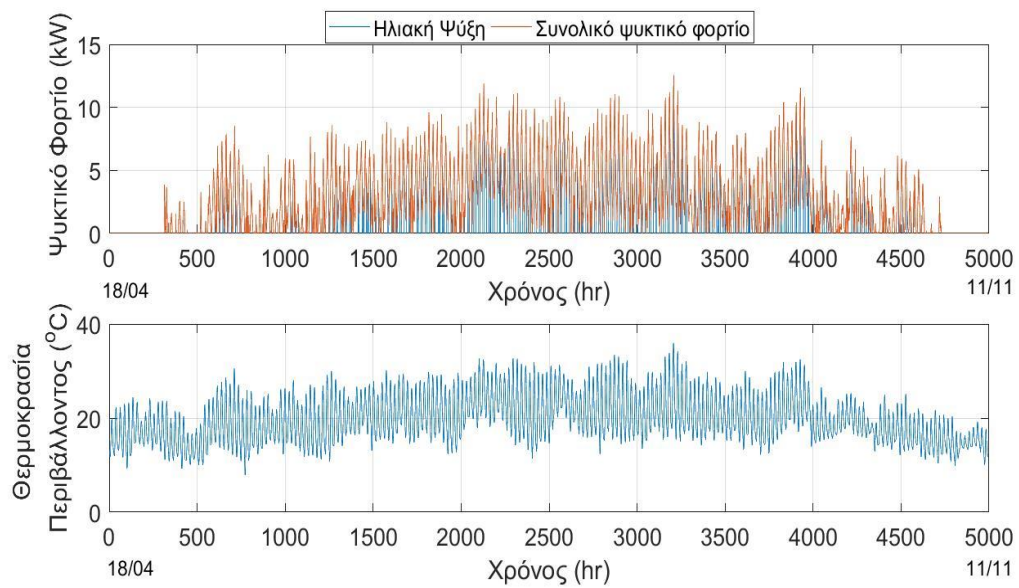
Εικ. Β.7 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Λάρνακα



Εικ. Β.8 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Νάπολη



Εικ. Β.9 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Μαδρίτη



Εικ. Β.10 Τελικά αποτελέσματα μοντέλου ZEOSOL για τη Λισαβόνα

Πιν. Β.1 Αποτελέσματα υπολογισμού ηλεκτρικών καταναλώσεων για όλα τα υπό εξέταση σενάρια

Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 40 m²						
Πόλη	Συνολική ζήτηση ψύξης (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρισμού συμβατική αντλίας θερμότητας (kWh)	Ηλιακή ψύξη (kWh)-	Ηλιακή κάλυψη (%)	Κατανάλωση ηλεκτρισμού συστήματος ZEOSOL (kWh)	Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)
Αθήνα	18654.39	4896.26	12312.45	66.00	1664.60	3231.66
Νάπολη	16950.56	4449.05	10515.01	62.03	1689.20	2759.85
Λάρνακα	21981.52	5769.54	14564.34	66.26	1946.80	3822.74
Μαδρίτη	11342.02	2976.97	8271.52	72.93	805.92	2171.05
Λισαβόνα	13947.18	3660.75	10267.58	73.62	965.80	2694.95
Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 30 m²						
Αθήνα	18654.39	4896.26	10549.00	56.55	2127.40	2768.90
Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 15 m²						
Αθήνα	18654.39	4896.26	6177.30	33.11	3274.90	1621.40

Παράρτημα Γ. Πίνακες αποτελεσμάτων ΑΚΖ

Πιν. Γ.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο "midpoint" για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ψύκτης Προσρόφησης	Βοηθ. Αντλία Θερμ/τας & Εναλλάκτες	Δεξαμενή Αποθήκευσης	Συλλέκτες Κενού	Ξηρός Πύργος Ψύξης	Παρελκόμενα ηλιακού κυκλώματος	Λοιπές σωληνώσεις και εξαρτήματα
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	$1.37 \cdot 10^{-1}$	$8.13 \cdot 10^{-2}$	$8.27 \cdot 10^{-3}$	$1.70 \cdot 10^{-2}$	$3.90 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$6.21 \cdot 10^{-3}$	$1.09 \cdot 10^{-3}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	$6.70 \cdot 10^{-8}$	$2.58 \cdot 10^{-8}$	$5.52 \cdot 10^{-9}$	$1.28 \cdot 10^{-8}$	$2.36 \cdot 10^{-9}$	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$2.91 \cdot 10^{-9}$	$1.54 \cdot 10^{-9}$	$3.81 \cdot 10^{-9}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	$5.75 \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-3}$	$5.48 \cdot 10^{-4}$	$1.09 \cdot 10^{-4}$	$1.72 \cdot 10^{-4}$	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	$6.43 \cdot 10^{-5}$	$1.35 \cdot 10^{-4}$
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	$2.34 \cdot 10^{-4}$	$9.99 \cdot 10^{-5}$	$2.78 \cdot 10^{-5}$	$4.03 \cdot 10^{-6}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$4.90 \cdot 10^{-5}$	$1.65 \cdot 10^{-5}$	$7.12 \cdot 10^{-6}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	$4.13 \cdot 10^{-4}$	$1.98 \cdot 10^{-4}$	$4.86 \cdot 10^{-5}$	$5.84 \cdot 10^{-6}$	$1.70 \cdot 10^{-5}$	$6.44 \cdot 10^{-5}$	$2.39 \cdot 10^{-5}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$3.87 \cdot 10^{-5}$
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO _{x,eq})	$2.38 \cdot 10^{-4}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$2.86 \cdot 10^{-5}$	$4.20 \cdot 10^{-6}$	$1.21 \cdot 10^{-5}$	$5.00 \cdot 10^{-5}$	$1.71 \cdot 10^{-5}$	$7.32 \cdot 10^{-6}$	$1.80 \cdot 10^{-5}$
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	$1.01 \cdot 10^{-3}$	$4.18 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$	$1.21 \cdot 10^{-5}$	$4.44 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	$6.12 \cdot 10^{-5}$	$4.64 \cdot 10^{-5}$	$1.11 \cdot 10^{-4}$

Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	$3.57 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$3.09 \cdot 10^{-5}$	$2.36 \cdot 10^{-6}$	$1.10 \cdot 10^{-5}$	$4.13 \cdot 10^{-5}$	$1.44 \cdot 10^{-5}$	$1.22 \cdot 10^{-5}$	$2.88 \cdot 10^{-5}$
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N _{eq})	$2.17 \cdot 10^{-5}$	$1.32 \cdot 10^{-5}$	$1.95 \cdot 10^{-6}$	$1.35 \cdot 10^{-7}$	$6.31 \cdot 10^{-7}$	$2.50 \cdot 10^{-6}$	$9.08 \cdot 10^{-7}$	$6.84 \cdot 10^{-7}$	$1.67 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	3.40	$1.53 \cdot 10^{-1}$	$7.35 \cdot 10^{-1}$	$6.24 \cdot 10^{-2}$	$2.38 \cdot 10^{-1}$	$8.40 \cdot 10^{-1}$	$2.91 \cdot 10^{-1}$	$3.05 \cdot 10^{-1}$	$7.72 \cdot 10^{-1}$
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB _{eq})	$3.11 \cdot 10^{-2}$	$7.82 \cdot 10^{-3}$	$5.31 \cdot 10^{-3}$	$3.89 \cdot 10^{-4}$	$1.71 \cdot 10^{-3}$	$6.42 \cdot 10^{-3}$	$2.15 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-3}$	$5.19 \cdot 10^{-3}$
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4- DCB _{eq})	$4.42 \cdot 10^{-2}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-3}$	$5.66 \cdot 10^{-4}$	$2.48 \cdot 10^{-3}$	$9.23 \cdot 10^{-3}$	$3.10 \cdot 10^{-3}$	$3.15 \cdot 10^{-3}$	$7.57 \cdot 10^{-3}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4- DCB _{eq})	$2.06 \cdot 10^{-2}$	$1.09 \cdot 10^{-2}$	$2.31 \cdot 10^{-3}$	$5.21 \cdot 10^{-4}$	$8.38 \cdot 10^{-4}$	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$1.23 \cdot 10^{-3}$	$5.60 \cdot 10^{-4}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4- DCB _{eq})	1.01	$1.65 \cdot 10^{-1}$	$1.92 \cdot 10^{-1}$	$1.36 \cdot 10^{-2}$	$6.26 \cdot 10^{-2}$	$2.26 \cdot 10^{-1}$	$7.60 \cdot 10^{-2}$	$8.07 \cdot 10^{-2}$	$1.96 \cdot 10^{-1}$
Χρήση γης (m ²)	$1.68 \cdot 10^{-3}$	$2.49 \cdot 10^{-4}$	$2.71 \cdot 10^{-4}$	$4.31 \cdot 10^{-5}$	$9.96 \cdot 10^{-5}$	$6.32 \cdot 10^{-4}$	$1.50 \cdot 10^{-4}$	$6.60 \cdot 10^{-5}$	$1.72 \cdot 10^{-4}$
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	$2.40 \cdot 10^{-3}$	$5.42 \cdot 10^{-5}$	$5.52 \cdot 10^{-4}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$2.10 \cdot 10^{-4}$	$5.83 \cdot 10^{-4}$	$2.51 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-4}$	$4.61 \cdot 10^{-4}$

Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil_{eq})	$3.59 \cdot 10^{-2}$	$2.62 \cdot 10^{-2}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	$9.58 \cdot 10^{-4}$	$4.06 \cdot 10^{-3}$	$1.49 \cdot 10^{-3}$	$2.52 \cdot 10^{-4}$	$6.38 \cdot 10^{-4}$
Χρήση νερού (m³)	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$5.38 \cdot 10^{-4}$	$1.00 \cdot 10^{-4}$	$1.11 \cdot 10^{-5}$	$3.97 \cdot 10^{-5}$	$2.23 \cdot 10^{-4}$	$6.49 \cdot 10^{-5}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$3.28 \cdot 10^{-5}$

Πιν. Γ.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Βλάβης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ψύκτης Προσρόφησης	Βοηθ. Αντλία Θερμ/τας & Εναλλάκτες	Δεξαμενή Αποθήκευσης	Συλλέκτες Κενού	Ξηρός Πύργος Ψύξης	Παρελκόμενα ηλιακού κυκλώματος	Λοιπές σωληνώσεις και εξαρτήματα
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$6.88 \cdot 10^{-7}$	$2.75 \cdot 10^{-7}$	$8.99 \cdot 10^{-8}$	$2.43 \cdot 10^{-8}$	$3.15 \cdot 10^{-8}$	$1.18 \cdot 10^{-7}$	$4.24 \cdot 10^{-8}$	$3.15 \cdot 10^{-8}$	$7.58 \cdot 10^{-8}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$9.62 \cdot 10^{-10}$	$4.92 \cdot 10^{-10}$	$9.21 \cdot 10^{-11}$	$5.38 \cdot 10^{-11}$	$3.48 \cdot 10^{-11}$	$1.43 \cdot 10^{-10}$	$4.95 \cdot 10^{-11}$	$2.81 \cdot 10^{-11}$	$6.83 \cdot 10^{-11}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$4.98 \cdot 10^{-3}$	$2.25 \cdot 10^{-3}$	$5.98 \cdot 10^{-4}$	$1.03 \cdot 10^{-4}$	$2.59 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$3.61 \cdot 10^{-4}$	$9.90 \cdot 10^{-5}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$

Πιν. Γ.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύστημα ZEOSOL	Συμβατική Αντλία Θερμότητας
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	1.37·10 ⁻¹	2.81·10 ⁻¹
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	6.70·10 ⁻⁸	1.07·10 ⁻⁷
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	5.75·10 ⁻³	8.16·10 ⁻³
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	2.34·10 ⁻⁴	3.08·10 ⁻⁴
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	4.13·10 ⁻⁴	6.05·10 ⁻⁴
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO _{x,eq})	2.38·10 ⁻⁴	3.12·10 ⁻⁴
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	1.01·10 ⁻³	1.29·10 ⁻³
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	3.57·10 ⁻⁴	6.51·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N _{eq})	2.17·10 ⁻⁵	3.96·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	3.40	7.72·10 ⁻¹
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB _{eq})	3.11·10 ⁻²	2.54·10 ⁻²
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	4.42·10 ⁻²	3.42·10 ⁻²
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	2.06·10 ⁻²	3.33·10 ⁻²
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	1.01	5.73·10 ⁻¹
Χρήση γης (m ²)	1.68·10 ⁻³	8.78·10 ⁻⁴
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	2.40·10 ⁻³	3.96·10 ⁻⁴
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil _{eq})	3.59·10 ⁻²	7.83·10 ⁻²
Χρήση νερού (m ³)	1.02·10 ⁻³	1.63·10 ⁻³

Πιν. Γ.4 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Βλάβης	Σύστημα ZEOSOL	Συμβατική αντλία θερμότητας
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	6.88·10 ⁻⁷	8.86·10 ⁻⁷
Οικοσυστήματα (species·yr)	9.62·10 ⁻¹⁰	1.60·10 ⁻⁹
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	4.98·10 ⁻³	6.98·10 ⁻³

Πιν. Γ.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τα δύο σενάρια του τέλους του κύκλου ζωής του σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία Επίπτωσης	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	2.05·10 ⁴	2.08·10 ⁴
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	1.52·10 ⁻²	1.54·10 ⁻²
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	1.16·10 ³	1.15·10 ³
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	5.02·10 ¹	4.99·10 ¹
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	8.02·10 ¹	8.01·10 ¹
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO _{x,eq})	5.16·10 ¹	5.12·10 ¹
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	2.21·10 ²	2.21·10 ²
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	5.26·10 ¹	5.26·10 ¹
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N _{eq})	3.30	3.17
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	1.21·10 ⁶	1.21·10 ⁶
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB _{eq})	8.70·10 ³	8.70·10 ³
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	1.26·10 ⁴	1.26·10 ⁴
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	3.61·10 ³	3.62·10 ³
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	3.16·10 ⁵	3.16·10 ⁵
Χρήση γης (m ²)	5.37·10 ²	5.35·10 ²
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	8.74·10 ²	8.74·10 ²
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil _{eq})	3.64·10 ³	3.62·10 ³
Χρήση νερού (m ³)	1.81·10 ²	1.81·10 ²

Πιν. Γ.6 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για τα δύο σενάρια του τέλους του κύκλου ζωής του σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία Βλάβης	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	1.54·10 ⁻¹	1.54·10 ⁻¹
Οικοσυστήματα (species·yr)	1.75·10 ⁻⁴	1.75·10 ⁻⁴
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	1.03·10 ³	1.02·10 ³

Πιν. Γ.7 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Κύπρο σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ψύκτης Προσρόφησης	Βοηθ. Αντλία Θερμ/τας & Εναλλάκτες	Δεξαμενή Αποθήκευσης	Συλλέκτες Κενού	Ξηρός Πύργος Ψύξης	Παρελκόμενα ηλιακού κυκλώματος	Λοιπές σωληνώσεις και εξαρτήματα
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	1.41·10 ⁻¹	9.34·10 ⁻²	7.04·10 ⁻³	1.44·10 ⁻²	3.35·10 ⁻³	1.40·10 ⁻²	5.38·10 ⁻³	9.26·10 ⁻⁴	2.39·10 ⁻³
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	1.07·10 ⁻⁷	7.16·10 ⁻⁸	4.70·10 ⁻⁹	1.08·10 ⁻⁸	2.10·10 ⁻⁹	1.04·10 ⁻⁸	2.84·10 ⁻⁹	1.30·10 ⁻⁹	3.23·10 ⁻⁹
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	3.57·10 ⁻³	9.69·10 ⁻⁴	4.65·10 ⁻⁴	9.22·10 ⁻⁵	1.43·10 ⁻⁴	1.47·10 ⁻³	2.69·10 ⁻⁴	5.46·10 ⁻⁵	1.15·10 ⁻⁴
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	4.25·10 ⁻⁴	3.09·10 ⁻⁴	2.38·10 ⁻⁵	3.46·10 ⁻⁶	1.04·10 ⁻⁵	4.19·10 ⁻⁵	1.58·10 ⁻⁵	6.06·10 ⁻⁶	1.50·10 ⁻⁵
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	3.85·10 ⁻⁴	2.03·10 ⁻⁴	4.14·10 ⁻⁵	4.97·10 ⁻⁶	1.45·10 ⁻⁵	5.48·10 ⁻⁵	2.04·10 ⁻⁵	1.37·10 ⁻⁵	3.29·10 ⁻⁵
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO _{x,eq})	4.32·10 ⁻⁴	3.12·10 ⁻⁴	2.45·10 ⁻⁵	3.60·10 ⁻⁶	1.09·10 ⁻⁵	4.27·10 ⁻⁵	1.63·10 ⁻⁵	6.23·10 ⁻⁶	1.53·10 ⁻⁵
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	1.15·10 ⁻³	6.43·10 ⁻⁴	1.12·10 ⁻⁴	1.03·10 ⁻⁵	3.83·10 ⁻⁵	1.57·10 ⁻⁴	5.39·10 ⁻⁵	3.94·10 ⁻⁵	9.46·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	1.21·10 ⁻⁴	3.50·10 ⁻⁶	2.62·10 ⁻⁵	2.01·10 ⁻⁶	8.92·10 ⁻⁶	3.51·10 ⁻⁵	1.05·10 ⁻⁵	1.04·10 ⁻⁵	2.44·10 ⁻⁵

Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N_{eq})	$7.35 \cdot 10^{-6}$	$2.83 \cdot 10^{-7}$	$1.66 \cdot 10^{-6}$	$1.15 \cdot 10^{-7}$	$5.11 \cdot 10^{-7}$	$2.12 \cdot 10^{-6}$	$6.69 \cdot 10^{-7}$	$5.81 \cdot 10^{-7}$	$1.42 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB_{eq})	3.13	$3.72 \cdot 10^{-1}$	$6.24 \cdot 10^{-1}$	$5.30 \cdot 10^{-2}$	$2.03 \cdot 10^{-1}$	$7.13 \cdot 10^{-1}$	$2.48 \cdot 10^{-1}$	$2.59 \cdot 10^{-1}$	$6.55 \cdot 10^{-1}$
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB_{eq})	$2.22 \cdot 10^{-2}$	$2.44 \cdot 10^{-3}$	$4.50 \cdot 10^{-3}$	$3.30 \cdot 10^{-4}$	$1.44 \cdot 10^{-3}$	$5.45 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-3}$	$1.84 \cdot 10^{-3}$	$4.40 \cdot 10^{-3}$
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4- DCB_{eq})	$3.19 \cdot 10^{-2}$	$3.27 \cdot 10^{-3}$	$6.52 \cdot 10^{-3}$	$4.80 \cdot 10^{-4}$	$2.09 \cdot 10^{-3}$	$7.83 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-3}$	$6.42 \cdot 10^{-3}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4- DCB_{eq})	$9.03 \cdot 10^{-3}$	$9.04 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$4.42 \cdot 10^{-4}$	$6.92 \cdot 10^{-4}$	$2.53 \cdot 10^{-3}$	$9.61 \cdot 10^{-4}$	$4.75 \cdot 10^{-4}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCB_{eq})	$7.34 \cdot 10^{-1}$	$1.77 \cdot 10^{-2}$	$1.63 \cdot 10^{-1}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$	$5.29 \cdot 10^{-2}$	$1.92 \cdot 10^{-1}$	$6.33 \cdot 10^{-2}$	$6.85 \cdot 10^{-2}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$
Χρήση γης (m²)	$1.41 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-4}$	$2.30 \cdot 10^{-4}$	$3.66 \cdot 10^{-5}$	$8.45 \cdot 10^{-5}$	$5.36 \cdot 10^{-4}$	$1.27 \cdot 10^{-4}$	$5.60 \cdot 10^{-5}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu_{eq})	$2.05 \cdot 10^{-3}$	$5.77 \cdot 10^{-5}$	$4.68 \cdot 10^{-4}$	$8.60 \cdot 10^{-5}$	$1.79 \cdot 10^{-4}$	$4.95 \cdot 10^{-4}$	$2.13 \cdot 10^{-4}$	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$3.91 \cdot 10^{-4}$
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil_{eq})	$3.81 \cdot 10^{-2}$	$2.98 \cdot 10^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$2.83 \cdot 10^{-4}$	$8.24 \cdot 10^{-4}$	$3.45 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$2.14 \cdot 10^{-4}$	$5.42 \cdot 10^{-4}$

Χρήση νερού (m ³)	6.61·10 ⁻⁴	2.51·10 ⁻⁴	8.51·10 ⁻⁵	9.45·10 ⁻⁶	3.31·10 ⁻⁵	1.89·10 ⁻⁴	5.29·10 ⁻⁵	1.20·10 ⁻⁵	2.78·10 ⁻⁵
-------------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Πιν. Γ.8 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ισπανία σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ψύκτης Προσρόφησης	Βοηθ. Αντλία Θερμ/τας & Εναλλάκτες	Δεξαμενή Αποθήκευσης	Συλλέκτες Κενού	Ξηρός Πύργος Ψύξης	Παρελκόμενα ηλιακού κυκλώματος	Λοιπές σωληνώσεις και εξαρτήματα
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	1.17·10 ⁻¹	2.67·10 ⁻²	1.36·10 ⁻²	2.79·10 ⁻²	6.20·10 ⁻³	2.70·10 ⁻²	9.45·10 ⁻³	1.79·10 ⁻³	4.62·10 ⁻³
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	7.94·10 ⁻⁸	1.21·10 ⁻⁸	9.04·10 ⁻⁹	2.10·10 ⁻⁸	3.82·10 ⁻⁹	2.01·10 ⁻⁸	4.60·10 ⁻⁹	2.52·10 ⁻⁹	6.26·10 ⁻⁹
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	1.97·10 ⁻²	1.43·10 ⁻²	9.07·10 ⁻⁴	1.78·10 ⁻⁴	3.40·10 ⁻⁴	2.84·10 ⁻³	7.80·10 ⁻⁴	1.06·10 ⁻⁴	2.22·10 ⁻⁴
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	2.97·10 ⁻⁴	7.75·10 ⁻⁵	4.57·10 ⁻⁵	6.60·10 ⁻⁶	1.89·10 ⁻⁵	8.03·10 ⁻⁵	2.70·10 ⁻⁵	1.17·10 ⁻⁵	2.91·10 ⁻⁵
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	4.17·10 ⁻⁴	6.62·10 ⁻⁵	7.99·10 ⁻⁵	9.59·10 ⁻⁶	2.74·10 ⁻⁵	1.06·10 ⁻⁴	3.76·10 ⁻⁵	2.66·10 ⁻⁵	6.37·10 ⁻⁵
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO _{x,eq})	3.03·10 ⁻⁴	7.79·10 ⁻⁵	4.69·10 ⁻⁵	6.88·10 ⁻⁶	1.99·10 ⁻⁵	8.20·10 ⁻⁵	2.79·10 ⁻⁵	1.20·10 ⁻⁵	2.97·10 ⁻⁵
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	1.14·10 ⁻³	1.69·10 ⁻⁴	2.16·10 ⁻⁴	1.98·10 ⁻⁵	7.21·10 ⁻⁵	3.04·10 ⁻⁴	9.74·10 ⁻⁵	7.64·10 ⁻⁵	1.83·10 ⁻⁴

Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	$2.38 \cdot 10^{-4}$	$1.01 \cdot 10^{-5}$	$5.07 \cdot 10^{-5}$	$3.89 \cdot 10^{-6}$	$1.73 \cdot 10^{-5}$	$6.80 \cdot 10^{-5}$	$2.06 \cdot 10^{-5}$	$2.01 \cdot 10^{-5}$	$4.74 \cdot 10^{-5}$
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N _{eq})	$1.46 \cdot 10^{-5}$	$8.65 \cdot 10^{-7}$	$3.21 \cdot 10^{-6}$	$2.23 \cdot 10^{-7}$	$9.93 \cdot 10^{-7}$	$4.11 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-6}$	$1.13 \cdot 10^{-6}$	$2.75 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	5.39	$6.21 \cdot 10^{-2}$	1.21	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$3.91 \cdot 10^{-1}$	1.38	$4.76 \cdot 10^{-1}$	$5.02 \cdot 10^{-1}$	1.27
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB _{eq})	$4.06 \cdot 10^{-2}$	$2.30 \cdot 10^{-3}$	$8.72 \cdot 10^{-3}$	$6.40 \cdot 10^{-4}$	$2.79 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	$3.45 \cdot 10^{-3}$	$3.57 \cdot 10^{-3}$	$8.53 \cdot 10^{-3}$
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4- DCB _{eq})	$5.83 \cdot 10^{-2}$	$2.88 \cdot 10^{-3}$	$1.26 \cdot 10^{-2}$	$9.30 \cdot 10^{-4}$	$4.05 \cdot 10^{-3}$	$1.52 \cdot 10^{-2}$	$4.99 \cdot 10^{-3}$	$5.18 \cdot 10^{-3}$	$1.24 \cdot 10^{-2}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4- DCB _{eq})	$1.69 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$3.80 \cdot 10^{-3}$	$8.57 \cdot 10^{-4}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$	$4.90 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	$9.21 \cdot 10^{-4}$	$2.06 \cdot 10^{-3}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4- DCB _{eq})	1.41	$1.87 \cdot 10^{-2}$	$3.15 \cdot 10^{-1}$	$2.23 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-1}$	$3.72 \cdot 10^{-1}$	$1.23 \cdot 10^{-1}$	$1.33 \cdot 10^{-1}$	$3.22 \cdot 10^{-1}$
Χρήση γης (m ²)	$3.13 \cdot 10^{-3}$	$7.68 \cdot 10^{-4}$	$4.43 \cdot 10^{-4}$	$7.02 \cdot 10^{-5}$	$1.64 \cdot 10^{-4}$	$1.03 \cdot 10^{-3}$	$2.56 \cdot 10^{-4}$	$1.08 \cdot 10^{-4}$	$2.82 \cdot 10^{-4}$
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	$3.91 \cdot 10^{-3}$	$5.41 \cdot 10^{-5}$	$9.08 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$3.46 \cdot 10^{-4}$	$9.59 \cdot 10^{-4}$	$4.13 \cdot 10^{-4}$	$3.02 \cdot 10^{-4}$	$7.58 \cdot 10^{-4}$

Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil_{eq})	$2.18 \cdot 10^{-2}$	$6.30 \cdot 10^{-3}$	$3.20 \cdot 10^{-3}$	$5.43 \cdot 10^{-4}$	$1.50 \cdot 10^{-3}$	$6.65 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-3}$	$4.12 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$
Χρήση νερού (m³)	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$2.42 \cdot 10^{-4}$	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-5}$	$6.43 \cdot 10^{-5}$	$3.66 \cdot 10^{-4}$	$1.03 \cdot 10^{-4}$	$2.32 \cdot 10^{-5}$	$5.39 \cdot 10^{-5}$

Πιν. Γ.9 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ιταλία σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ψύκτης Προσρόφησης	Βοηθ. Αντλία Θερμ/τας & Εναλλάκτες	Δεξαμενή Αποθήκευσης	Συλλέκτης Κενού	Ξηρός Πύργος Ψύξης	Παρελκόμενα ηλιακού κυκλώματος	Λοιπές σωληνώσεις και εξαρτήματα
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO_{2,eq})	$1.02 \cdot 10^{-1}$	$4.22 \cdot 10^{-2}$	$8.99 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-2}$	$4.09 \cdot 10^{-3}$	$1.79 \cdot 10^{-2}$	$6.31 \cdot 10^{-3}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11_{eq})	$7.46 \cdot 10^{-8}$	$2.96 \cdot 10^{-8}$	$5.99 \cdot 10^{-9}$	$1.40 \cdot 10^{-8}$	$2.53 \cdot 10^{-9}$	$1.34 \cdot 10^{-8}$	$3.15 \cdot 10^{-9}$	$1.68 \cdot 10^{-9}$	$4.18 \cdot 10^{-9}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60_{eq})	$1.01 \cdot 10^{-2}$	$6.67 \cdot 10^{-3}$	$6.01 \cdot 10^{-4}$	$1.19 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$	$3.97 \cdot 10^{-4}$	$7.03 \cdot 10^{-5}$	$1.48 \cdot 10^{-4}$
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO_{x,eq})	$2.14 \cdot 10^{-4}$	$6.92 \cdot 10^{-5}$	$3.03 \cdot 10^{-5}$	$4.36 \cdot 10^{-6}$	$1.23 \cdot 10^{-5}$	$5.33 \cdot 10^{-5}$	$1.75 \cdot 10^{-5}$	$7.79 \cdot 10^{-6}$	$1.94 \cdot 10^{-5}$
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM_{2.5,eq})	$3.00 \cdot 10^{-4}$	$6.66 \cdot 10^{-5}$	$5.34 \cdot 10^{-5}$	$6.39 \cdot 10^{-6}$	$1.82 \cdot 10^{-5}$	$7.07 \cdot 10^{-5}$	$2.48 \cdot 10^{-5}$	$1.78 \cdot 10^{-5}$	$4.26 \cdot 10^{-5}$
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO_{x,eq})	$2.19 \cdot 10^{-4}$	$7.02 \cdot 10^{-5}$	$3.11 \cdot 10^{-5}$	$4.54 \cdot 10^{-6}$	$1.29 \cdot 10^{-5}$	$5.44 \cdot 10^{-5}$	$1.81 \cdot 10^{-5}$	$8.01 \cdot 10^{-6}$	$1.98 \cdot 10^{-5}$

Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	8.92·10 ⁻⁴	2.45·10 ⁻⁴	1.44·10 ⁻⁴	1.32·10 ⁻⁵	4.81·10 ⁻⁵	2.03·10 ⁻⁴	6.51·10 ⁻⁵	5.11·10 ⁻⁵	1.23·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	1.65·10 ⁻⁴	1.25·10 ⁻⁵	3.39·10 ⁻⁵	2.60·10 ⁻⁶	1.16·10 ⁻⁵	4.55·10 ⁻⁵	1.38·10 ⁻⁵	1.34·10 ⁻⁵	3.17·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N _{eq})	1.01·10 ⁻⁵	9.15·10 ⁻⁷	2.15·10 ⁻⁶	1.49·10 ⁻⁷	6.63·10 ⁻⁷	2.75·10 ⁻⁶	8.73·10 ⁻⁷	7.53·10 ⁻⁷	1.84·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	3.65	9.10·10 ⁻²	8.07·10 ⁻¹	6.83·10 ⁻²	2.60·10 ⁻¹	9.21·10 ⁻¹	3.18·10 ⁻¹	3.36·10 ⁻¹	8.49·10 ⁻¹
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB _{eq})	2.87·10 ⁻²	3.05·10 ⁻³	5.84·10 ⁻³	4.28·10 ⁻⁴	1.87·10 ⁻³	7.06·10 ⁻³	2.31·10 ⁻³	2.39·10 ⁻³	5.71·10 ⁻³
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	4.09·10 ⁻²	3.83·10 ⁻³	8.45·10 ⁻³	6.22·10 ⁻⁴	2.71·10 ⁻³	1.02·10 ⁻²	3.34·10 ⁻³	3.47·10 ⁻³	8.33·10 ⁻³
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	1.18·10 ⁻²	1.25·10 ⁻³	2.54·10 ⁻³	5.73·10 ⁻⁴	8.96·10 ⁻⁴	3.28·10 ⁻³	1.25·10 ⁻³	6.16·10 ⁻⁴	1.38·10 ⁻³
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	9.54·10 ⁻¹	2.46·10 ⁻²	2.11·10 ⁻¹	1.49·10 ⁻²	6.85·10 ⁻²	2.49·10 ⁻¹	8.21·10 ⁻²	8.88·10 ⁻²	2.15·10 ⁻¹
Χρήση γης (m ²)	3.01·10 ⁻³	1.46·10 ⁻³	2.90·10 ⁻⁴	4.55·10 ⁻⁵	1.05·10 ⁻⁴	6.80·10 ⁻⁴	1.70·10 ⁻⁴	7.16·10 ⁻⁵	1.87·10 ⁻⁴

Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	2.64·10 ⁻³	6.49·10 ⁻⁵	6.07·10 ⁻⁴	1.12·10 ⁻⁴	2.31·10 ⁻⁴	6.41·10 ⁻⁴	2.76·10 ⁻⁴	2.02·10 ⁻⁴	5.07·10 ⁻⁴
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil _{eq})	2.15·10 ⁻²	1.13·10 ⁻²	2.11·10 ⁻³	3.56·10 ⁻⁴	9.80·10 ⁻⁴	4.40·10 ⁻³	1.45·10 ⁻³	2.72·10 ⁻⁴	6.96·10 ⁻⁴
Χρήση νερού (m ³)	1.32·10 ⁻³	7.83·10 ⁻⁴	1.10·10 ⁻⁴	1.22·10 ⁻⁵	4.37·10 ⁻⁵	2.44·10 ⁻⁴	7.29·10 ⁻⁵	1.55·10 ⁻⁵	3.60·10 ⁻⁵

Πιν. Γ.10 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Πορτογαλία σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ψύκτης Προσρόφησης	Βοηθ. Αντλία Θερμ/τας & Εναλλάκτες	Δεξαμενή Αποθήκευσης	Συλλέκτες Κενού	Ξηρός Πύργος Ψύξης	Παρελκόμενα ηλιακού κυκλώματος	Λοιπές σωληνώσεις και εξαρτήματα
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	1.03·10 ⁻¹	2.92·10 ⁻²	1.11·10 ⁻²	2.27·10 ⁻²	5.12·10 ⁻³	2.21·10 ⁻²	7.78·10 ⁻³	1.46·10 ⁻³	3.77·10 ⁻³
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	6.52·10 ⁻⁸	1.02·10 ⁻⁸	7.40·10 ⁻⁹	1.71·10 ⁻⁸	3.14·10 ⁻⁹	1.64·10 ⁻⁸	3.75·10 ⁻⁹	2.06·10 ⁻⁹	5.09·10 ⁻⁹
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	6.47·10 ⁻³	2.33·10 ⁻³	7.35·10 ⁻⁴	1.45·10 ⁻⁴	2.33·10 ⁻⁴	2.31·10 ⁻³	4.50·10 ⁻⁴	8.61·10 ⁻⁵	1.81·10 ⁻⁴
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	2.52·10 ⁻⁴	7.24·10 ⁻⁵	3.73·10 ⁻⁵	5.42·10 ⁻⁶	1.56·10 ⁻⁵	6.57·10 ⁻⁵	2.21·10 ⁻⁵	9.54·10 ⁻⁶	2.37·10 ⁻⁵
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	3.46·10 ⁻⁴	6.03·10 ⁻⁵	6.51·10 ⁻⁵	7.82·10 ⁻⁶	2.24·10 ⁻⁵	8.62·10 ⁻⁵	3.05·10 ⁻⁵	2.17·10 ⁻⁵	5.18·10 ⁻⁵

Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO_{x,eq})	2.57·10 ⁻⁴	7.27·10 ⁻⁵	3.83·10 ⁻⁵	5.64·10 ⁻⁶	1.63·10 ⁻⁵	6.71·10 ⁻⁵	2.28·10 ⁻⁵	9.81·10 ⁻⁶	2.41·10 ⁻⁵
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO_{2,eq})	9.72·10 ⁻⁴	1.83·10 ⁻⁴	1.76·10 ⁻⁴	1.62·10 ⁻⁵	5.89·10 ⁻⁵	2.47·10 ⁻⁴	7.96·10 ⁻⁵	6.21·10 ⁻⁵	1.49·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P_{eq})	1.96·10 ⁻⁴	1.03·10 ⁻⁵	4.13·10 ⁻⁵	3.16·10 ⁻⁶	1.41·10 ⁻⁵	5.53·10 ⁻⁵	1.67·10 ⁻⁵	1.63·10 ⁻⁵	3.85·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N_{eq})	1.18·10 ⁻⁵	6.68·10 ⁻⁷	2.61·10 ⁻⁶	1.81·10 ⁻⁷	8.07·10 ⁻⁷	3.34·10 ⁻⁶	1.06·10 ⁻⁶	9.15·10 ⁻⁷	2.24·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB_{eq})	4.40	5.85·10 ⁻²	9.84·10 ⁻¹	8.37·10 ⁻²	3.19·10 ⁻¹	1.12	3.88·10 ⁻¹	4.08·10 ⁻¹	1.03
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB_{eq})	3.33·10 ⁻²	2.22·10 ⁻³	7.10·10 ⁻³	5.20·10 ⁻⁴	2.27·10 ⁻³	8.59·10 ⁻³	2.81·10 ⁻³	2.90·10 ⁻³	6.94·10 ⁻³
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB_{eq})	4.78·10 ⁻²	2.78·10 ⁻³	1.03·10 ⁻²	7.57·10 ⁻⁴	3.30·10 ⁻³	1.23·10 ⁻²	4.06·10 ⁻³	4.21·10 ⁻³	1.01·10 ⁻²
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCB_{eq})	1.39·10 ⁻²	1.04·10 ⁻³	3.09·10 ⁻³	6.97·10 ⁻⁴	1.09·10 ⁻³	3.99·10 ⁻³	1.52·10 ⁻³	7.49·10 ⁻⁴	1.67·10 ⁻³

Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	1.15	1.85·10 ⁻²	2.56·10 ⁻¹	1.81·10 ⁻²	8.34·10 ⁻²	3.03·10 ⁻¹	9.99·10 ⁻²	1.08·10 ⁻¹	2.62·10 ⁻¹
Χρήση γης (m ²)	3.10·10 ⁻³	1.15·10 ⁻³	3.65·10 ⁻⁴	5.83·10 ⁻⁵	1.40·10 ⁻⁴	8.50·10 ⁻⁴	2.19·10 ⁻⁴	8.86·10 ⁻⁵	2.30·10 ⁻⁴
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	3.17·10 ⁻³	4.12·10 ⁻⁵	7.38·10 ⁻⁴	1.36·10 ⁻⁴	2.82·10 ⁻⁴	7.80·10 ⁻⁴	3.36·10 ⁻⁴	2.45·10 ⁻⁴	6.16·10 ⁻⁴
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil _{eq})	1.89·10 ⁻²	6.15·10 ⁻³	2.62·10 ⁻³	4.47·10 ⁻⁴	1.24·10 ⁻³	5.45·10 ⁻³	1.78·10 ⁻³	3.38·10 ⁻⁴	8.54·10 ⁻⁴
Χρήση νερού (m ³)	9.86·10 ⁻⁴	3.37·10 ⁻⁴	1.34·10 ⁻⁴	1.49·10 ⁻⁵	5.29·10 ⁻⁵	2.98·10 ⁻⁴	8.57·10 ⁻⁵	1.89·10 ⁻⁵	4.39·10 ⁻⁵

Πιν. Γ.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL σε σύγκριση με μία συμβατική αντλία θερμότητας για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση χώρες σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης

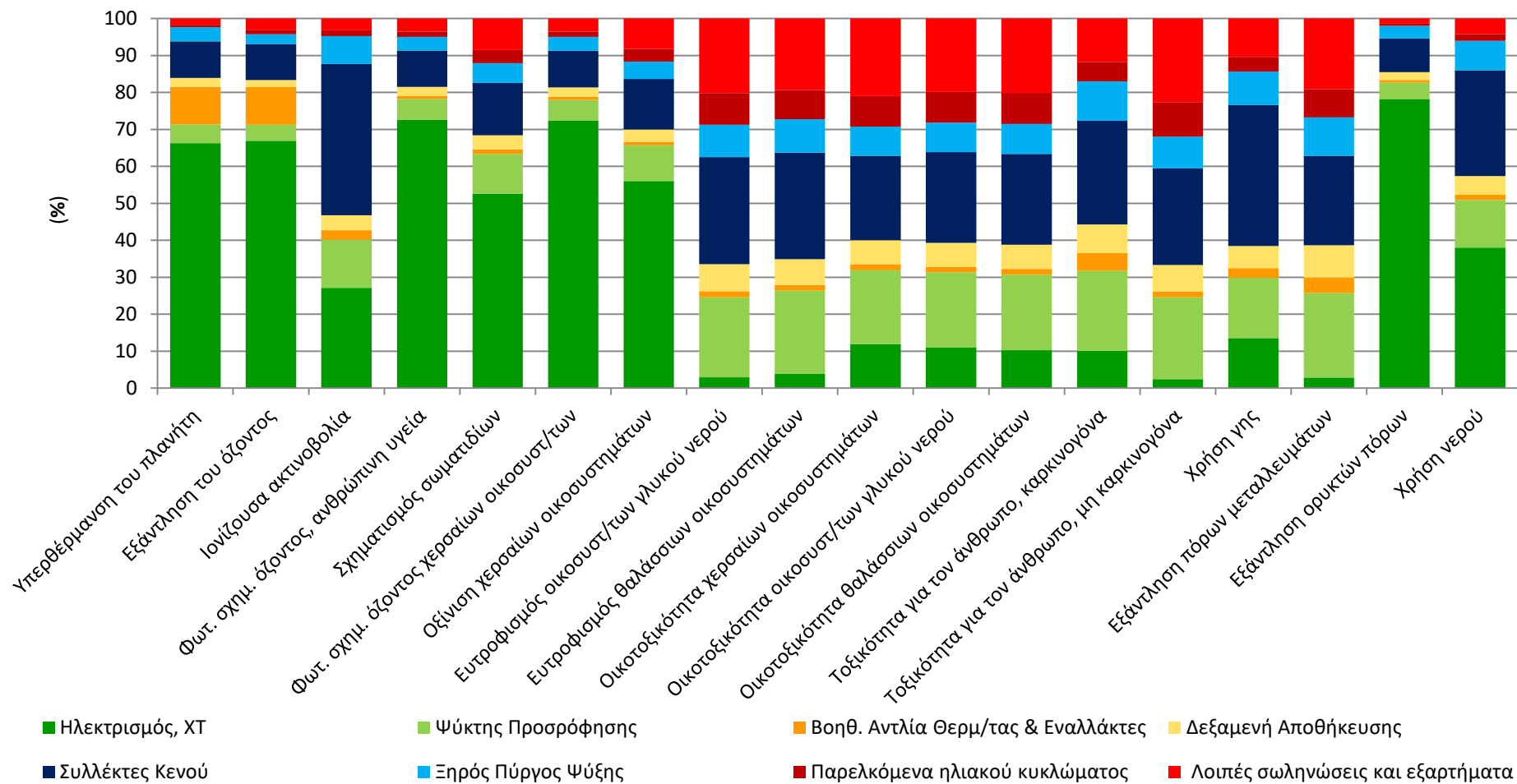
Κατηγορία Βλάβης	Κύπρος		Ισπανία		Ιταλία		Πορτογαλία	
	Σύστημα ZEOSOL	Συμβατική αντλία θερμότητας	Σύστημα ZEOSOL	Συμβατική αντλία θερμότητας	Σύστημα ZEOSOL	Συμβατική αντλία θερμότητας	Σύστημα ZEOSOL	Συμβατική αντλία θερμότητας
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	5.72·10 ⁻⁷	7.23·10 ⁻⁷	7.51·10 ⁻⁷	4.04·10 ⁻⁷	5.44·10 ⁻⁷	3.28·10 ⁻⁷	6.23·10 ⁻⁷	3.81·10 ⁻⁷
Οικοσυστήματα (species-yr)	8.51·10 ⁻¹⁰	1.46·10 ⁻⁹	9.05·10 ⁻¹⁰	7.60·10 ⁻¹⁰	7.25·10 ⁻¹⁰	7.28·10 ⁻¹⁰	7.78·10 ⁻¹⁰	7.82·10 ⁻¹⁰
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	1.57·10 ⁻²	3.97·10 ⁻²	5.85·10 ⁻³	5.73·10 ⁻³	5.98·10 ⁻³	8.42·10 ⁻³	4.66·10 ⁻³	4.24·10 ⁻³

Πιν. Γ.12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για διαφορετική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “midpoint” για μία kWh ψύξης

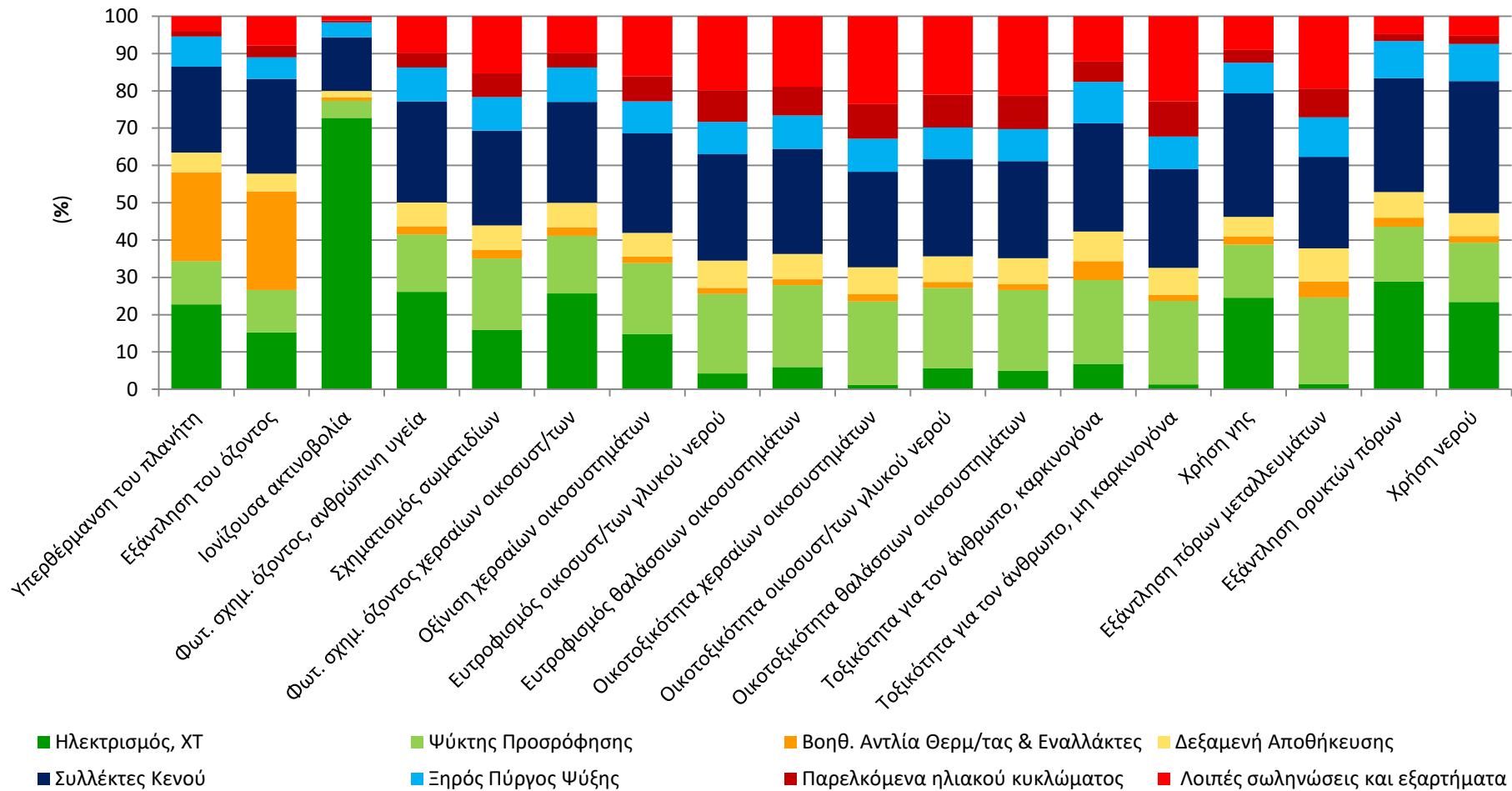
Κατηγορία Επίπτωσης	40 m ²	30 m ²	15 m ²	Συμβατική Αντλία Θερμότητας
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO _{2,eq})	1.37·10 ⁻¹	1.55·10 ⁻¹	2.05·10 ⁻¹	2.81·10 ⁻¹
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 _{eq})	6.70·10 ⁻⁸	7.08·10 ⁻⁸	8.36·10 ⁻⁸	1.07·10 ⁻⁷
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 _{eq})	5.75·10 ⁻³	6.05·10 ⁻³	7.23·10 ⁻³	8.16·10 ⁻³
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO _{x,eq})	2.34·10 ⁻⁴	2.48·10 ⁻⁴	2.96·10 ⁻⁴	3.08·10 ⁻⁴
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM _{2.5,eq})	4.13·10 ⁻⁴	4.48·10 ⁻⁴	5.56·10 ⁻⁴	6.05·10 ⁻⁴
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO _{x,eq})	2.38·10 ⁻⁴	2.52·10 ⁻⁴	3.01·10 ⁻⁴	3.12·10 ⁻⁴
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO _{2,eq})	1.01·10 ⁻³	1.07·10 ⁻³	1.28·10 ⁻³	1.29·10 ⁻³
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P _{eq})	3.57·10 ⁻⁴	4.05·10 ⁻⁴	5.35·10 ⁻⁴	6.51·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N _{eq})	2.17·10 ⁻⁵	2.46·10 ⁻⁵	3.25·10 ⁻⁵	3.96·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	3.40	3.16	2.86	7.72·10 ⁻¹
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB _{eq})	3.11·10 ⁻²	3.13·10 ⁻²	3.36·10 ⁻²	2.54·10 ⁻²
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB _{eq})	4.42·10 ⁻²	4.42·10 ⁻²	4.69·10 ⁻²	3.42·10 ⁻²
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	2.06·10 ⁻²	2.28·10 ⁻²	2.90·10 ⁻²	3.33·10 ⁻²
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCB _{eq})	1.01	9.84·10 ⁻¹	9.87·10 ⁻¹	5.73·10 ⁻¹
Χρήση γης (m ²)	1.68·10 ⁻³	1.58·10 ⁻³	1.50·10 ⁻³	8.78·10 ⁻⁴
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu _{eq})	2.40·10 ⁻³	2.23·10 ⁻³	1.99·10 ⁻³	3.96·10 ⁻⁴
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil _{eq})	3.59·10 ⁻²	4.21·10 ⁻²	5.86·10 ⁻²	7.83·10 ⁻²
Χρήση νερού (m ³)	1.02·10 ⁻³	1.12·10 ⁻³	1.40·10 ⁻³	1.63·10 ⁻³

Πιν. Γ.13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για διαφορετική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και εγκατάσταση στην Ελλάδα σε επίπεδο “endpoint” για μία kWh ψύξης

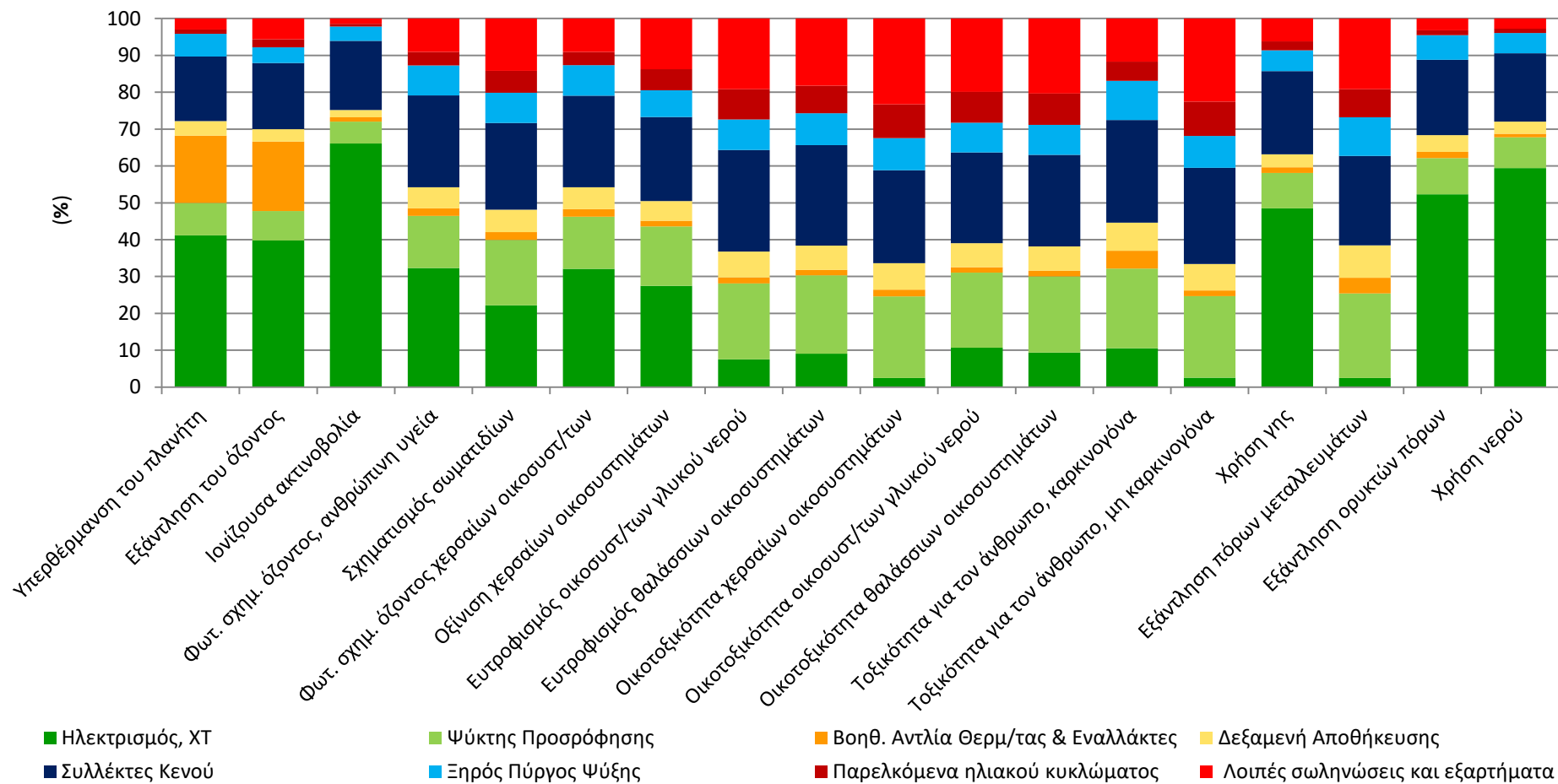
Κατηγορία Βλάβης	40 m ²	30 m ²	15 m ²	Συμβατική αντλία θερμότητας
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$6.88 \cdot 10^{-7}$	$7.29 \cdot 10^{-7}$	$8.65 \cdot 10^{-7}$	$8.86 \cdot 10^{-7}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$9.62 \cdot 10^{-10}$	$1.06 \cdot 10^{-9}$	$1.33 \cdot 10^{-9}$	$1.60 \cdot 10^{-9}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$4.98 \cdot 10^{-3}$	$5.33 \cdot 10^{-3}$	$6.47 \cdot 10^{-3}$	$6.98 \cdot 10^{-3}$



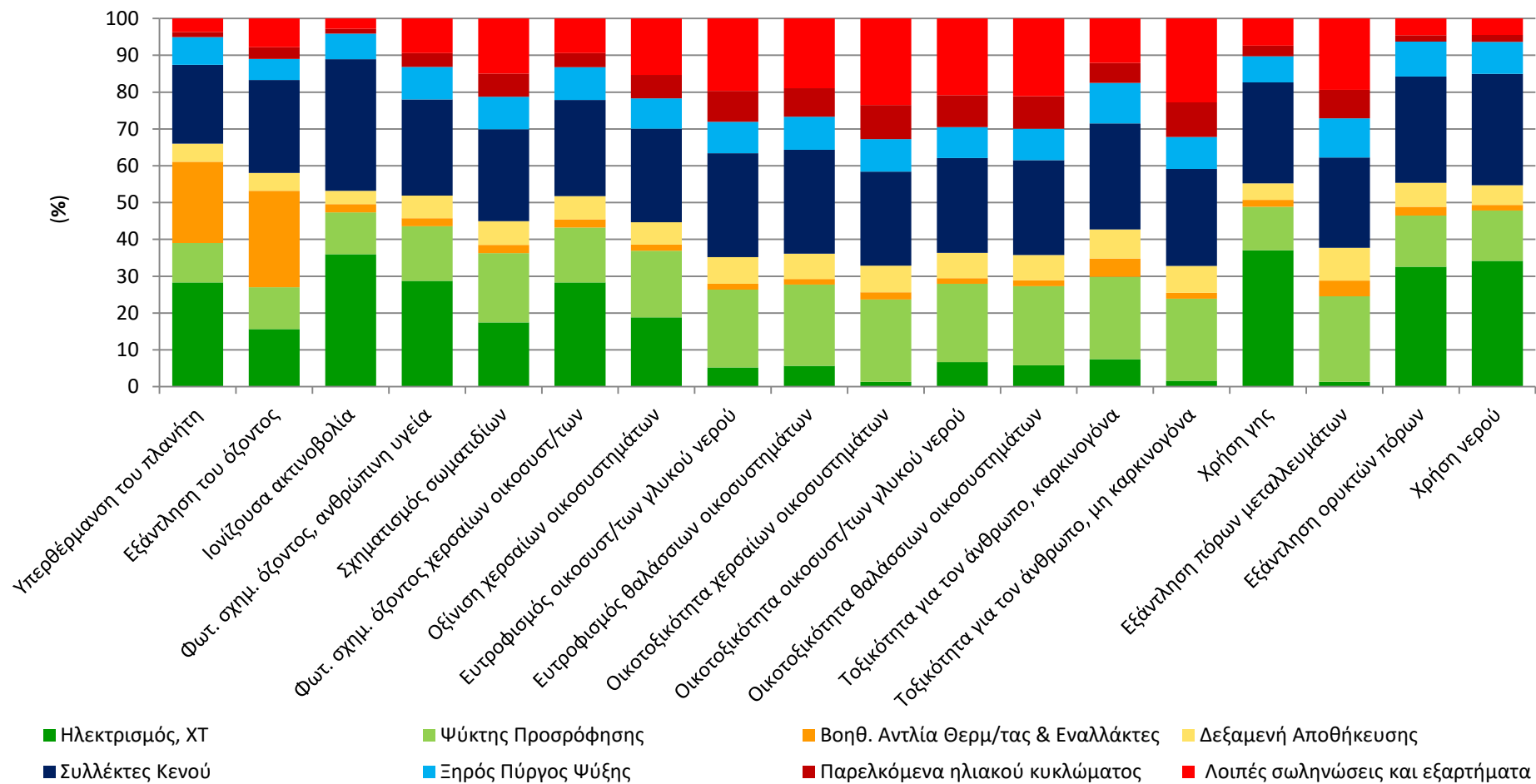
Εικ. Γ.1 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Κύπρο σε επίπεδο "midpoint"



Εικ. Γ.2 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ισπανία σε επίπεδο "midpoint"



Εικ. Γ.3 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Ιταλία σε επίπεδο "midpoint"



Εικ. Γ.4 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ZEOSOL για εγκατάσταση στην Πορτογαλία σε επίπεδο "midpoint"

Βιβλιογραφία

1. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2017*. Available from: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/weo-2017-en>.
2. BP p.l.c., *BP Statistical Review of World Energy 2017*. 2017, London BP p.l.c. p.
3. Χατζηδάκης, Σ., *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΨΥΞΗΣ Α' ΚΑΙ Β' ΜΕΡΟΣ*. 2003, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π. 70. p.
4. Κορωνάκη, Ε., *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ 2015*, Αθήνα Εκδόσεις Ε.Μ.Π. 205. p.
5. ΙΑΤΡΙΔΗΣ, Μ., *Οδηγός Ψύξης*. 1996, Πικέρμι Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. 57. p.
6. Κουρεμένος, Δ.Α., *Ψυκτικές Μηχανές και Εγκαταστάσεις*. 2003, Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου p.
7. Παπουτσής, Ε.Γ. (2018). Θερμοδυναμική Ανάλυση Ψυκτικών Συστημάτων Προσρόφησης. (Διδακτορική Διατριβή), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα.
8. Shmroukh, A.N., A.H.H. Ali, and S. Ookawara, *Adsorption working pairs for adsorption cooling chillers: A review based on adsorption capacity and environmental impact*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 50: p. 445-456.
9. Cao, Q., K.-C. Xie, Y.-K. Lv, and W.-R. Bao, *Process effects on activated carbon with large specific surface area from corn cob*. *Bioresource Technology*, 2006. 97(1): p. 110-115.
10. Deng, J., R.Z. Wang, and G.Y. Han, *A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011. 37(2): p. 172-203.
11. Tso, C.Y. and C.Y.H. Chao, *Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems*. *International Journal of Refrigeration*, 2012. 35(6): p. 1626-1638.
12. Cooper, C.D. and F.C. Alley, in *ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ*. 2015, Εκδόσεις Τζιόλα: Θεσσαλονίκη. p. 412.
13. Ng, K.C., H.T. Chua, C.Y. Chung, C.H. Loke, T. Kashiwagi, A. Akisawa, and B.B. Saha, *Experimental investigation of the silica gel–water adsorption isotherm characteristics*. *Applied Thermal Engineering*, 2001. 21(16): p. 1631-1642.
14. Structure Commission of the International Zeolite Association. *The Database of Zeolite Structures*. [cited 2018 6/7/2018]; Available from: <http://www.iza-structure.org/DatabaseHistory.htm>.
15. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα*. 2015, Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ. 652. p.
16. Wang, R.Z. and R.G. Oliveira, *Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006. 32(4): p. 424-458.
17. Τσούτος, Θ., Έ. Κορμά, Μ. Καράγιωργας, Β. Δρόσου, and Α. Αηδόνης, in *Οδηγός Ηλιακού Κλιματισμού 2004*, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας p. 30.
18. Koronaki, I.P., M. Nitsas, E.G. Papoutsis, and V. Papaefthimiou, *Performance Analysis of A Silica Gel-Water Adsorption Cooler-Impact of Nanofluids on Cooler Performance and Size*. 2015. p.
19. Eicker, U., *Solar Technologies for Buildings*. 2003: Wiley. p.
20. Henning, H.-M., *Solar assisted air conditioning of buildings – an overview*. *Applied Thermal Engineering*, 2007. 27(10): p. 1734-1749.

21. Kalogirou, S.A., *Solar thermal collectors and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2004. 30(3): p. 231-295.
22. Αντωνόπουλος, Κ.Α., *ΘΕΡΜΙΚΑ - ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 2015*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π. p. 99.
23. *GreenSpec*. [cited 2018 27/6/2018]; Available from: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/solar-collectors/>.
24. Kalogirou, S.A., *Solar Energy Engineering in Processes and Systems*. 2014, Elsevier: United States of America. p. 819.
25. Foster, R., M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar Energy Renewable Energy and the Environment*. Energy and the Environment ed. A. Ghassemi. 2010, United States: CRS Press Taylor & Francis Group. 352. p.
26. *Sunbank Solar, Inc.* [cited 2018 28/6/2018]; Available from: <https://thesunbank.com/evacuated-tube-solar-collectors/>.
27. Cabrera, F.J., A. Fernández-García, R.M.P. Silva, and M. Pérez-García, *Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 20: p. 103-118.
28. Suman, S., M.K. Khan, and M. Pathak, *Performance enhancement of solar collectors—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 49: p. 192-210.
29. Fernández-García, A., E. Zarza, L. Valenzuela, and M. Pérez, *Parabolic-trough solar collectors and their applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. 14(7): p. 1695-1721.
30. Karellas, S., T.C. Roumpedakis, and N. Tzouganatos, *Solar Cooling Technologies*. 2018: Taylor & Francis Group. p.
31. Baldwin, C. and C.A. Cruickshank, *A review of solar cooling technologies for residential applications in Canada*. Energy Procedia, 2012. 30: p. 495-504.
32. United Nations Environment Programme. *Assessment on the Commercial Viability of Solar Cooling Technologies and Applications in the Arab Region*. Available from: http://www.solarthermalworld.org/sites/gstec/files/news/file/2016-04-30/solar_cooling_roadmap_arab_states_march_2016.pdf.
33. Hartmann, N., C. Glueck, and F.P. Schmidt, *Solar cooling for small office buildings: Comparison of solar thermal and photovoltaic options for two different European climates*. Renewable Energy, 2011. 36(5): p. 1329-1338.
34. Jakob, U., *6 - Solar cooling technologies A2 - Stryi-Hipp, Gerhard*, in *Renewable Heating and Cooling*. 2016, Woodhead Publishing. p. 119-136.
35. International Organization for Standardization, *ISO:14040*, in *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. 2006: Geneva.
36. Κορωναίος, Χ., *Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Η ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Προσέγγιση στην Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη*.
37. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ. p. 723.
38. International Organization for Standardization, *ISO:14044*, in *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. 2006: Geneva.
39. Finnveden, G., M.Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinée, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington, and S. Suh, *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management, 2009. 91(1): p. 1-21.
40. Matthews, H.S., C.T. Hendrickson, and D.H. Matthews, *Life cycle assessment: quantitative approaches for decisions that matter*. Retrieved June. Vol. 1. 2015. p. 320.
41. ecoinvent. [cited 2018 4/9/2018]; Available from: <https://www.ecoinvent.org/>.

42. Goedkoop, M., R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R. Van Zelm, *Recipe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level Report I: Characterisation*. First ed. 2013. 126. p.
43. Pre Sustainability BV, v.a., *SimaPro Database Manual Methods Library*. 2018. 65. p. 18-20.
44. Goedkoop, M. and R. Spriensma, *Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology report*. Third ed. 2001, Amersfoort, Ολλανδία: Pre Consultants B.V. 132. p.
45. Thompson M., E.R., Wildavsky A., *Cultural Theory*. 1990: Westview Print Boulder. p.
46. Huijbregts, M., Z. Steinmann, P. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, A. Hollander, M. Zijp, and R. van Zelm, *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. 2016.
47. Fahrenheit©. *Fahrenheit: eZea*. 2018 January 2017]; Available from: <https://fahrenheit.cool/en/zeo/>.
48. GmbH, A. [cited 2018 6/9/2018]; Available from: <https://akotec.eu/en/products/collectors/stc-single-tube-collector/>.
49. Copeland, *ZR144KCE-TFD*. 2009.
50. Kelvion Brazed PHE GmbH. *GBS-Series: Powerful models in a flexible range of sizes*. Available from: <https://www.kelvion.com/products/product/gbs-series/>.
51. Greening, B. and A. Azapagic, *Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK*. *Energy*, 2012. 39(1): p. 205-217.
52. Symeonidis, A. 2017 [cited 2018 7/9/2018]; Available from: <https://www.ecoinvent.org/support/ecoinvent-forum/topic.html?&tid=429>.
53. Dillinger Hutte GTS. *Unalloyed carbon-steels: Specification DH-E38-D*. Available from: <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/7147>.
54. Saeki, Y. and T. Emura, *Technical progresses for PVC production*. *Progress in Polymer Science*, 2002. 27(10): p. 2055-2131.
55. ΧΑΛΚΟΡ, ΨΥΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. 2018.
56. Heck, T., heat pump production, brine-water, 10kW, CH, Allocation cut-off, ecoinvent database version 3.4
57. Shi, J., T. Li, H.-C. Zhang, S. Peng, Z.-C. Liu, and Q. Jiang, *Energy consumption and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology*. Vol. 20. 2015. p.
58. Adolffson M., R.S. (2016). *Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Heat Exchangers*. (Master's Thesis), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Σουηδία 2016.
59. Google. 2018 [cited 2018 11/9/2018]; Available from: <https://www.google.gr/maps/>.
60. EnergyPlus Development Team. 2010. *EnergyPlus engineering reference: The reference to EnergyPlus calculations*. EnergyPlus Versions 6.0. US Department of Energy.
61. Lenova, T., treatment of used refrigerant R134a, reclamation, GLO, Allocation cut-off, ecoinvent database version 3.4
62. El-Khozondar, B. and M.A. Koksai. *Investigating the water consumption for electricity generation at Turkish power plants*. in *E3S Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
63. Atilgan, B. and A. Azapagic, *Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey*. *Journal of Cleaner Production*, 2015. 106: p. 555-564.
64. Panato, V.H., M.P. Porto, and E.P. Bandarra Filho, *Experimental performance of an R-22-based refrigeration system for use with R-1270, R-438A, R-404A and R-134a*. *International Journal of Refrigeration*, 2017. 83: p. 108-117.

65. Γιαννάκογλου, Κ.Χ., Ι. Αναγνωστόπουλος, and Γ. Μπεργελές, *Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς*. 3η ed. 2003, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π. ρ.
66. Wischhusen, S. *An enhanced discretization method for storage tank models within energy systems*. in *Proc. of the 5-th International Modelica Conference*. 2006.
67. Roumpedakis, T.C., T. Christou, K. Braimakis, E. Varvagiannis, and S. Karellas, *Integrated ORC-Adsorption cycle: A first and second law analysis of potential configurations*, in *ECOS 2018*. 2018: GUIMARÃES, PORTUGAL.