



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

*Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών*

*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Ανάλυση Κύκλου Ζωής καινοτόμου συστήματος θέρμανσης  
για βορειοευρωπαϊκά κλίματα*

**Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Κάλλη Γεωργίου

**Επιβλέπων**

Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

---

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	«Ανάλυση Κύκλου Ζωής καινοτόμου συστήματος θέρμανσης για βορειοευρωπαϊκά κλίματα»
<b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>	Κάλλης Γεώργιος
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	2020-21

## Σύνοψη

Στο πλαίσιο της μείωσης της εξάρτησης του κτηριακού τομέα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων τους, η χρήση της ηλιακής ενέργειας αποτελεί μία καθαρή και ανεξάντλητη εναλλακτική. Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών, τα συστήματα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, αποτελούν μία βασική τεχνολογία για την επίλυση του προβλήματος της ετεροχρονισμένης διαθεσιμότητας της ηλιακής ενέργειας και της κατανάλωσης, με σκοπό την πλήρη κάλυψη των θερμικών αναγκών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην ποσοτική αποτίμηση του περιβαλλοντικού οφέλους ενός τέτοιου συστήματος, οικιακής κλίμακας, το οποίο βασίζεται στην αποθήκευση θερμότητας σε προσροφητικό μέσο. Για την πλήρη και διεξοδική αξιολόγηση του συστήματος, μελετήθηκαν δυο βασικές διατάξεις αυτού βάσει της τοποθεσίας εγκατάστασης. Η πρώτη αφορά τις χώρες της κεντρικής Ευρώπης, ενώ η δεύτερη προσανατολίζεται στις χώρες της βόρειας Ευρώπης, με κύρια διαφοροποίηση τη μάζα του προσροφητικού μέσου και την επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, το υπό εξέταση σύστημα παρουσιάζει χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση από το σύστημα αναφοράς σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων οι οποίες εξετάστηκαν, λόγω της μεγάλης μάζας των πρώτων υλών, κυρίως μετάλλων, από τα οποία αποτελείται, σε ποσοστό περίπου ίσο με 95% για τις μονάδες εποχιακής αποθήκευσης.

## Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, τροφοδοτούμενο από ηλιακούς συλλέκτες κενού, το οποίο βασίζεται σε καινοτόμο υλικό προσρόφησης. Η μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SimaPro, περιλάμβανε την κατά το δυνατό 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 διάταξη εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας με βάση το νερό. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου ReCiPe 2016. Από τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι το σύστημα αναφοράς παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων που

λήφθηκαν υπόψη, τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε επίπεδο “endpoint”, το οποίο αφενός οφείλεται στη μεγάλη μάζα των πρώτων υλών του υπό εξέταση συστήματος, και κυρίως του χάλυβα και του χαλκού, ενώ αφετέρου υποδεικνύει ότι χρειάζονται εκτεταμένες βελτιώσεις στο σχεδιασμό αυτού, προκειμένου η λειτουργία του να οδηγήσει σε περιβαλλοντικά οφέλη.

Επιπρόσθετα, το σύστημα αξιολογήθηκε και για μια σειρά από μελέτες περιπτώσεων και αναλύσεις ευαισθησίας. Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής της τοποθεσίας εγκατάστασης του συστήματος στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτού. Επομένως, πλην των δύο βασικών πόλεων, δηλαδή του Ρέγκενσμπουργκ στη Γερμανία και της Στοκχόλμης στη Σουηδία, εξετάστηκε η εγκατάσταση του συστήματος σε τέσσερις επιπλέον πόλεις της Ευρώπης (Ζυρίχη, Βουκουρέστι, Δουβλίνο και Βαρσοβία). Από τα αποτελέσματα, έγινε φανερό, όπως αναμενόταν, ότι το σύστημα παρουσιάζει χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο στις τοποθεσίες όπου απαιτείται η μικρότερη μάζα προσροφητικού υλικού, το οποίο οδηγεί και σε χαμηλότερη συνολική μάζα του συστήματος. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η σύγκριση του συστήματος με μία βελτιστοποιημένη εκδοχή του συστήματος αναφοράς, προκειμένου να αναδειχθεί το περιθώριο μείωσης του περιβαλλοντικού αντικτύπου, μόνο από τη βελτιστοποίηση της φάσης χρήσης του συστήματος. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος, του συντελεστή κλίμακας, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μετάβαση από την κλίμακα των πρωτότυπων μονάδων, οι οποίες περιέχουν μία μικρή ποσότητα προσροφητικού υλικού, στην πραγματική εγκατάσταση, όπου χρησιμοποιούνται μερικοί τόνοι από αυτό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μείωση του συντελεστή στο 0.3, οδηγεί σε μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της τάξης του 50%, σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος στα αποτελέσματα, όπου παρατηρήθηκε ότι η αύξηση κατά δέκα έτη της διάρκειας ζωής του προσροφητικού υλικού, οδηγεί σε μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου κατά περίπου 30%.

<b>POST-GRADUATE THESIS:</b>	<b>«Life Cycle Analysis of an innovative heating system for north european climates»</b>
<b>STUDENT:</b>	<b>Kallis George</b>
<b>SUPERVISOR:</b>	<b>Karellas Sotirios, Professor, School of Mechanical Engineering</b>
<b>ACADEMIC YEAR:</b>	<b>2020-21</b>

## **Abstract**

In the context of reducing the dependence of the building sector on the use of fossil fuels and their environmental footprints, the use of solar energy consists a clean and abundant alternative. Among the various technologies, seasonal thermal energy storage systems are a key technology for solving the problem of delayed availability of solar energy in respect to the consumption, in order to fully cover the thermal loads throughout the year. The present study aims to quantify the environmental benefit of such a system at domestic scale, which is based on an adsorbent material. For the complete and thorough evaluation of the system, two basic configurations were evaluated, depending on the location of installation. The first one, corresponds to central European countries, while the second one is oriented towards the countries of northern Europe, with the main differences being the mass of the adsorbent material and the surface of the solar collectors. According to the results of the Life Cycle Analysis, the investigated system presents worse environmental performance in respect to the reference system in all impact categories, due to the large mass of raw materials, mainly metals, of which it is composed, which correspond to almost 95% of the total mass for the seasonal heat storage units.

## **Summary**

In the current master's thesis, the Life Cycle Analysis of a seasonal thermal energy storage system, powered by evacuated tube collectors, which is based on an innovative adsorbent material, was conducted. The study carried out, using SimaPro software, included the detailed listing of the raw materials, their transformation processes, the involved transportations, the consumptions (raw materials and energy) and all the processes relevant to the waste management at the system's end-of-life, in order to assess its environmental impact compared to a conventional, water-based, seasonal thermal energy storage reference system. The analysis was conducted using the ReCiPe 2016 impact assessment method. From the results, it was observed that the reference system presents better environmental performance in all impact categories considered, both at midpoint and endpoint level, which on the one hand is due to the large mass of raw materials, and especially steel and copper, of the system under investigation, while on the other hand indicates that extensive

improvements on the current design are necessary, in order for the system's operation to lead to environmental benefits.

Additionally, the system was also evaluated for a number of case studies and sensitivity analyses. The first part of the case studies involved, the investigation of the installation location on the system's environmental performance. Therefore, excluding the two main cities, namely Regensburg, Germany and Stockholm, Sweden, it was considered the installation of the system in four different European cities (Zurich, Bucharest, Dublin and Warsaw). The results indicated, as expected, that the system presents lower environmental impact in the locations where the least mass of adsorbent material is required, which also leads to a lower overall mass of the system. Moreover, the comparison of the system with an optimized version of the reference system was studied, in order to highlight the margin of reduction of the environmental footprint, deriving solely from the optimization of the use phase. In addition, it was assessed, the influence of the scaling factor, which is used for the transition from the scale of the prototype units, where a small amount of adsorbent material is contained, to the actual system, which includes a few tons of the material. The results showed that lowering the factor to the value of 0.3, leads to a reduction on the environmental footprint of the system of around 50%, in all impact categories. Finally, an investigation towards the influence of the system's lifespan on the results was conducted, where it was observed that considering the lifetime of the adsorbent material to be extended by ten years, leads to a lower environmental footprint of approximately 30%.

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα, ο οποίος με εμπιστεύθηκε και μου ανέθεσε την εργασία, δίνοντάς μου την ευκαιρία να εργαστώ σε αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για την πολύτιμη βοήθεια και τη συμβολή του προς την ολοκλήρωση της εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σύνοψη .....	ii
Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iv
Summary.....	iv
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	vi
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	ix
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....	xvi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες.....	1
1.1.1 Επίπεδοι συλλέκτες .....	2
1.1.2 Συλλέκτες κενού .....	3
1.1.3 Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου .....	6
1.2 Εποχιακή Αποθήκευση Θερμότητας.....	8
1.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας.....	9
1.2.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	13
1.2.3 Χημική αποθήκευση θερμότητας.....	14
1.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) .....	16
1.3.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής .....	17
1.3.2 Βάσεις δεδομένων και λογισμικά.....	22
1.3.3 Η μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe 2016 .....	23
1.4 ΑΚΖ σε συστήματα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας.....	26
1.5 Αντικείμενο μεταπτυχιακής διατριβής .....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	34
2.1 Αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης.....	34
2.2 Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης.....	35
2.3 Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού.....	36
2.4 Δεξαμενή αποθήκευσης (αισθητής) θερμότητας κενού .....	38
2.5 Δοχείο αδράνειας (με υλικά αλλαγής φάσης).....	39
2.6 Εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου .....	40
2.7 Κυκλοφορητές.....	41

2.8 Σύστημα αναφοράς.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΚΖ ΓΙΑ ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	44
3.1 Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης .....	44
3.1.1 Στόχος της μελέτης .....	44
3.1.2 Πεδίο εφαρμογής της μελέτης .....	44
3.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα .....	49
3.2.1 Εξαγωγή πρώτων υλών/Κατασκευή.....	50
3.2.2 Μεταφορά .....	53
3.2.3 Φάση Χρήσης.....	54
3.2.4 Τέλος κύκλου ζωής .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	57
4.1 Αποτελέσματα για το βασικό σενάριο.....	57
4.1.1 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό αντίκτυπο του υπό εξέταση συστήματος .....	57
4.1.2 Συνεισφορά των φάσεων του κύκλου ζωής στο συνολικό αντίκτυπο του συστήματος .....	63
4.1.3 Σύγκριση με το σύστημα αναφοράς.....	64
4.2 Μελέτη σεναρίων .....	68
4.2.1 Επίδραση της τοποθεσίας εγκατάστασης .....	68
4.2.2 Σύγκριση με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς .....	72
4.2.3 Επίδραση του συντελεστή κλίμακας .....	74
4.2.4 Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	81
5.1 Συμπεράσματα.....	81
5.2 Αξιοπιστία δεδομένων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ. ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΚΖ.....	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	119



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικ. 1.1 Σχηματική απεικόνιση επίπεδου συλλέκτη [11] .....	3
Εικ. 1.2 Συλλέκτης κενού [15].....	4
Εικ. 1.3 Σωλήνας κενού άμεσης ροής. (α) ομοαξονικός (β) τύπου “U” (γ) θερμοσιφωνικού τύπου [14, 18] .....	5
Εικ. 1.4 Σωλήνας κενού με θερμικό σωλήνα [19] .....	6
Εικ. 1.5 Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου (α) μέρη συλλέκτη (β) λεπτομέρεια συλλέκτη και αρχή λειτουργίας [20] .....	7
Εικ. 1.6 Ταξινόμηση μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας [25] .....	8
Εικ. 1.7 Συστήματα αποθήκευσης με βάση το νερό. (α) σύστημα δεξαμενής νερού (β) σύστημα αποθήκευσης σε υδροφόρο ορίζοντα [26] .....	11
Εικ. 1.8 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με μέσο αποθήκευσης μείγμα νερού και χαλκιού [29] .....	12
Εικ. 1.9 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος [26].....	13
Εικ. 1.10 Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [38] .....	17
Εικ. 1.11 Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [34] .....	18
Εικ. 1.12 Επισκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας [44].....	25
Εικ. 1.13 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής του κάθε συστήματος θέρμανσης [48] .....	28
Εικ. 1.14 Συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (kg CO <sub>2</sub> e) κατά τη διάρκεια ζωής των υπό εξέταση συστημάτων [50] .....	29
Εικ. 1.15 Ετήσιες ισοδύναμες εκπομπές CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq) για κάθε υπό εξέταση διάταξη [53] .....	30
Εικ. 1.16 Σύστημα BTES σε σύγκριση με το σύστημα αναφοράς για τις κατηγορίες της υπερθέρμανσης του πλανήτη, της τοξικότητας για τον άνθρωπο και του δυναμικού οξίνισης [54] .....	31
Εικ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του συστήματος κατά τις περιόδους του καλοκαιριού (αριστερά) και του χειμώνα (δεξιά) .....	35
Εικ. 2.2 Προσοφητικό υλικό (SWS) βερμικουλίτη/LiCl ανεπτυγμένο από την εταιρεία BIC	36

Εικ. 2.3 Τμήμα του νέου ηλιακού συλλέκτη κενού του συστήματος SWS-Heating (δεξιά). Αριστερά απεικονίζεται ο εμπορικός συλλέκτης κενού OEM Vario 1000 της εταιρείας Akotec .....	37
Εικ. 2.4. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για διάφορους εμπορικούς συλλέκτες, για $I=1000 \text{ W/m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $25^\circ\text{C}$ . DF: direct flow, HP: Heat Pipe [61] .....	37
Εικ. 2.5 Απεικόνιση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού .....	38
Εικ. 2.6 Δοχείο αδράνειας με υλικά αλλαγής φάσης. (α) Λεπτομέρεια δοχείου όπου φαίνεται η τοποθέτηση των πλακών (β) πλαστική συσκευασία (πλάκα) όπου περιέχεται το υλικό αλλαγής φάσης .....	39
Εικ. 2.7 Απεικόνιση του λέβητα φυσικού αερίου .....	40
Εικ. 2.8 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος αναφοράς .....	42
Εικ. 2.9 Σχηματική απεικόνιση του βελτιστοποιημένου συστήματος αναφοράς .....	43
Εικ. 3.1 Όρια (διακεκομμένη μαύρη γραμμή) και διάγραμμα ροής των διεργασιών του υπό εξέταση συστήματος .....	47
Εικ. 4.1 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	58
Εικ. 4.2 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	58
Εικ. 4.3 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “midpoint” .....	59
Εικ. 4.4 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “midpoint” .....	60
Εικ. 4.5 Συνεισφορά των φάσεων του κύκλου ζωής στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	64
Εικ. 4.6 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	66
Εικ. 4.7 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	66

Εικ. 4.8 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating (Λ.Μ. 1 kWh) για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες, σε επίπεδο “endpoint” .....	70
Εικ. 4.9 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating (Λ.Μ. 1 m <sup>2</sup> ) για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες, σε επίπεδο “endpoint”.....	70
Εικ. 4.10 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating (Λ.Μ. 1kWh) για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες, σε επίπεδο “midpoint” .....	71
Εικ. 4.11 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	72
Εικ. 4.12 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	73
Εικ. 4.13 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	75
Εικ. 4.14 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	75
Εικ. 4.15 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας για συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε επίπεδο “midpoint” .....	77
Εικ. 4.16 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας για συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε επίπεδο “midpoint” .....	78
Εικ. 4.17 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	80
Εικ. 4.18 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή διάρκεια ζωής ίση με 30 έτη, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	80
Εικ. Β.1 Απεικόνιση διακριτοποίησης της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας .....	90
Εικ. Β.2 (α) Προφίλ φόρτισης της πάνω ζώνης της δεξαμενής κατά τις πρώτες τέσσερις μέρες των προσομοιώσεων στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και (β) ηλιακή ακτινοβολία για τις ίδιες μέρες.....	91
Εικ. Β.3 Θερμική διαστρωμάτωση εντός του δοχείου αδράνειας.....	92

Εικ. Β.4 Καμπύλες ισχύος των υπό εξέταση κυκλοφορητών .....	93
Εικ. Β.5 Διάγραμμα ροής για την επίλυση του μοντέλου του συστήματος αναφοράς.....	94

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πιν. 1.1 Θερμοχωρητικότητα στους 20°C ορισμένων κοινών υλικών για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας [25].....	10
Πιν. 1.2 Ταξινόμηση και ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης [32] .....	14
Πιν. 1.3 Πιθανά αναγνωρισθέντα υλικά για αποθήκευση θερμότητας μέσω χημικών αντιδράσεων κατά το Έργο 32 του προγράμματος ΗΘΨ του ΔΟΕ [33].....	15
Πιν. 1.4 Αναγνωρισθέντα ζεύγη ρόφησης κατά το Έργο 32 του προγράμματος ΗΘΨ του ΔΟΕ [33] .....	16
Πιν. 1.5 Κατηγορίες επιπτώσεων σε επίπεδο “midpoint” της μεθόδου ReCiPe 2016 [43]....	24
Πιν. 2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού .....	39
Πιν. 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του λέβητα RIELLO residence 25 KIS e [64].....	40
Πιν. 2.3 Επιλεγμένοι κυκλοφορητές για το σύστημα αναφοράς [66] .....	43
Πιν. 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές του λέβητα φυσικού αερίου συμπύκνωσης “Victrix” [74].	51
Πιν. 3.2 Συνιστώσες του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Γερμανία .....	53
Πιν. 3.3 Συνιστώσες του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Σουηδία.....	53
Πιν. 3.4 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος SWS-Heating και του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Γερμανία.....	55
Πιν. 3.5 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος SWS-Heating και του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Σουηδία .....	55
Πιν. 4.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά λειτουργική μονάδα και για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, σε επίπεδο “midpoint” .....	61
Πιν. 4.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, σε επίπεδο “midpoint” .....	67
Πιν. 4.3 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint” .....	69
Πιν. 4.4 Διαστασιολόγηση και ετήσια κατανάλωση ενέργειας του βελτιστοποιημένου συστήματος αναφοράς .....	73
Πιν. 4.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating, λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, ανά λειτουργική μονάδα και για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, σε επίπεδο “midpoint” .....	76

Πιν. Α.1 Είσοδοι για τον εφεδρικό λέβητα φυσικού αερίου και αντίστοιχα σεν δεδομένων από τη βάση της ecoinvent.....	84
Πιν. Α.2 Αποστάσεις μεταφοράς και αντίστοιχα σεν δεδομένων από την ecoinvent .....	86
Πιν. Β.1 Συντελεστές απόδοσης για το μοντέλο επίπεδου συλλέκτη που χρησιμοποιείται στη μελέτη [90] .....	88
Πιν. Γ.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας ανά θερμική kWh, σε επίπεδο “midpoint” .....	95
Πιν. Γ.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας ανά θερμική kWh, σε επίπεδο “midpoint” .....	97
Πιν. Γ.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας ανά m <sup>2</sup> επιφάνειας του κτηρίου, σε επίπεδο “midpoint” ..	99
Πιν. Γ.4 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας ανά m <sup>2</sup> επιφάνειας του κτηρίου, σε επίπεδο “midpoint” .....	101
Πιν. Γ.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint” .....	103
Πιν. Γ.6 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint” .....	104
Πιν. Γ.7 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “midpoint” .....	105
Πιν. Γ.8 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	106
Πιν. Γ.9 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “midpoint” .....	107
Πιν. Γ.10 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	108
Πιν. Γ.11 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες ανά θερμική kWh, σε επίπεδο “midpoint” .....	109
Πιν. Γ.12 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες ανά m <sup>2</sup> επιφάνειας κτηρίου, σε επίπεδο “midpoint” .....	110

Πιν. Γ.13 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint” ...	112
Πιν. Γ.14 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	113
Πιν. Γ.15 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint” .....	113
Πιν. Γ.16 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “midpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας .....	114
Πιν. Γ.17 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “midpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας .....	115
Πιν. Γ.18 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας .....	117
Πιν. Γ.19 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας .....	118

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$A$	Επιφάνεια	$m^2$
$c_p$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$d$	Πάχος	$m$
$D$	Διάμετρος	$m$
$H$	Ύψος	$m$
$h$	Ενθαλπία	$kJ\ kg^{-1}$
$I$	Ακτινοβολία	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
$M$	Μάζα	$kg$
$\dot{m}$	Παροχή μάζας	$kg\ s^{-1}$
$R$	Θερμική αντίσταση	$W^{-1}\ m\ K$
$t$	Χρόνος	$s$
$T$	Θερμοκρασία	$K$
$U$	Εσωτερική ενέργεια	$J$
$U_l$	Συντελεστής θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$

### Ελληνικά Σύμβολα

$\Delta t$	Χρονικό διάστημα	$s$
$\Delta x$	Απόσταση	$m$
$\theta$	Θερμοκρασία	$^{\circ}C$
$\lambda$	Θερμική αγωγιμότητα	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$

### Δείκτες

$amb$	Περιβάλλον
$bt$	Δοχείο αδράνειας
$col$	Συλλέκτης
$DHW$	Ζεστό νερό χρήσης



<i>grnd</i>	Έδαφος
<i>ins</i>	Μόνωση
<i>SH</i>	Θέρμανση χώρου
<i>sol</i>	Σχετιζόμενα με την ηλιακή ακτινοβολία
<i>st</i>	Τοίχωμα
<i>uSTES</i>	Υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας
<u>Ακρωνύμια</u>	
<i>ATES</i>	Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε υδροφόρο ορίζοντα
<i>BTES</i>	Αποθήκευση θερμότητας στο έδαφος
<i>BCS</i>	Κατιόντα βάσης του εδάφους
<i>CFC</i>	Φθοροχλωράνθρακες
<i>CML</i>	Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών του πανεπιστημίου Λέιντεν, Ολλανδία
<i>CSPP</i>	Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκεντρωτικά κάτοπτρα
<i>DALY</i>	Αναπροσαρμοσμένα λόγω αναπηρίας έτη ζωής
<i>DBC</i>	Διχλωροβενζόλιο
<i>ED</i>	Ποιότητα των οικοσυστημάτων
<i>EPDM</i>	Αιθυλένιο μονομερούς διένιο προπυλενίου
<i>ES</i>	Αποθήκευση ενέργειας
<i>ETC</i>	Συλλέκτης κενού
<i>FPC</i>	Επίπεδος Ηλιακός συλλέκτης
<i>GRP</i>	Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού
<i>GSHP</i>	Γεωθερμική αντλία θερμότητας
<i>HH</i>	Ανθρώπινη υγεία
<i>ISO</i>	Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης
<i>PCM</i>	Υλικά αλλαγής φάσης

<i>PM</i>	<i>Σωματίδια</i>
<i>PTC</i>	<i>Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου</i>
<i>PVC</i>	<i>Πολυβινυλοχλωρίδιο</i>
<i>RA</i>	<i>Διαθεσιμότητα πόρων</i>
<i>RIVM</i>	<i>Ολλανδικό Βασιλικό Ινστιτούτο για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον</i>
<i>SAT</i>	<i>Τριένυδρο οξικό νάτριο</i>
<i>SETAC</i>	<i>Society for Environmental Toxicology and Chemistry</i>
<i>SHC</i>	<i>Ηλιακή θέρμανση και ψύξη</i>
<i>STES</i>	<i>Εποχιακή αποθήκευση θερμότητας</i>
<i>STS</i>	<i>Ηλιοθερμικό σύστημα</i>
<i>SWS</i>	<i>Υδατικό υλικό προσρόφησης</i>
<i>TES</i>	<i>Αποθήκευση θερμότητας</i>
<i>TRL</i>	<i>Επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας</i>
<i>TTES</i>	<i>Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με δεξαμενή νερού</i>
<i>UTES</i>	<i>Υπόγεια αποθήκευση θερμότητας</i>
<i>AKZ</i>	<i>Ανάλυση Κύκλου Ζωής / Life Cycle Analysis (LCA)</i>
<i>ΔΟΕ</i>	<i>Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας</i>
<i>ZNX</i>	<i>Ζεστό Νερό Χρήσης</i>
<i>ΚΑΠΕ</i>	<i>Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας</i>
<i>ΧΥΤΑ</i>	<i>Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων</i>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια απαίτηση πρωτογενούς ενέργειας, η οποία εκτιμάται ότι ανήλθε σε 14314 Μtoe το 2018, προβλέπεται να έχει μία ετήσια αύξηση της τάξης του 1.0% έως το 2040, στο πλαίσιο του σεναρίου «δηλωμένων πολιτικών» (“Stated Policies”) του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας [1], κυρίως ως συνέπεια της ταχείας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης των αναπτυσσομένων χωρών. Παρά το γεγονός ότι η Κίνα παραμένει ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 22% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, η Ινδία παρουσιάζει διπλασιασμό της ενεργειακής ζήτησης, με αποτέλεσμα να αποτελεί τη μοναδική μεγαλύτερη πηγή αύξησης της ζήτησης έως το 2040 (Σενάριο δηλωμένων πολιτικών) [1]. Παρά το γεγονός ότι στις προηγμένες οικονομίες υπάρχει μια πτωτική τάση στην κατανάλωση ενέργειας, σήμερα, το 81% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας ικανοποιείται από τα ορυκτά καύσιμα, ενώ το μερίδιο αυτό αναμένεται να παραμείνει πάνω από 70% έως το 2040 [1]. Ο κτηριακός τομέας αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας το 40% αυτής στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με τα νοικοκυριά να αντιπροσωπεύουν το 26.1% [2, 3]. Παράλληλα, σχεδόν το 80% αυτού αντιστοιχεί σε ανάγκες θέρμανσης και καλύπτεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο, πετρέλαιο), με το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να φθάνει το 19.5% (2018).

Ωστόσο, η γρήγορη εξάντληση αυτών των συμβατικών πόρων, σε συνδυασμό με τις εκπομπές και τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά προβλήματα με τα οποία συνδέεται η χρήση αυτών – υπερθέρμανση του πλανήτη, μείωση της στοιβάδας του όζοντος, οξίνιση των χερσαίων και υδάτινων οικοσυστημάτων – δημιούργησε την ανάγκη να υπάρξει μία πιο δυναμική μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν θεσπιστεί οδηγίες (στόχοι ΕΕ 2030) που υποστηρίζουν τη διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών, όπως ο επιμέρους στόχος της ΕΕ για ετήσια αύξηση ίση με 1.3% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης, σε μία περίοδο 5 ετών, ξεκινώντας από το 2021, τονίζοντας κατά αυτό τον τρόπο τη σημασία των συστημάτων ηλιακής θέρμανσης στον οικιακό τομέα [4].

### 1.1 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την πιο ευρέως διαθέσιμη και άφθονη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στη Γη, ενώ προέρχεται από πυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα του Ήλιου. Ο Ήλιος είναι στην πραγματικότητα ένας τεράστιος και συνεχής αντιδραστήρας σύντηξης, στον οποίο το υδρογόνο ( $H_2$ ) μετατρέπεται σε ήλιο ( $He$ ). Έχει θερμοκρασία μέλανος σώματος ίση με 5762 K, ενώ η θερμοκρασία στον πυρήνα του είναι πολύ υψηλότερη και εκτιμάται από  $80 \times 10^6$  έως  $40 \times 10^6$  K [5]. Η συνολική παραγωγή ενέργειας, με τη μορφή ακτινοβολίας, είναι ίση με  $3.8 \times 10^{20}$  MW, η οποία αντιστοιχεί σε  $63 \text{ MW/m}^2$  της επιφάνειάς του. Δεδομένου ότι η ενέργεια ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις, η Γη δέχεται μόνο ένα μικρό κλάσμα αυτής, ίσο με  $1.7 \times 10^{14}$  kW. Ωστόσο, ακόμη και με αυτό το μικρό κλάσμα, εκτιμάται ότι η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη Γη σε διάστημα 84 λεπτών, ισοδυναμεί με την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας για ένα έτος [6].

Για τη συλλογή και χρήση της ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιούνται ηλιοθερμικοί συλλέκτες και φωτοβολταϊκά πάνελ. Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες είναι συσκευές οι οποίες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο (νερό, αέρα ή λάδι), αυξάνοντας τη θερμοκρασία του [7]. Αυτή η ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί άμεσα, για την παροχή ζεστού νερού χρήσης ή την κάλυψη αναγκών θέρμανσης, ή να μεταφερθεί σε μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για μελλοντική χρήση. Συνήθως, διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, με βάση το λόγο συγκέντρωσης:

- μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες και
- συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Σε ένα μη συγκεντρωτικό συλλέκτη, η επιφάνεια στην οποία προσπίπτει και η επιφάνεια στην οποία γίνεται η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας συμπίπτουν, σε αντίθεση με ένα συγκεντρωτικό συλλέκτη, όπου χρησιμοποιούνται κοίλες ανακλαστικές επιφάνειες για τη συλλογή και την εστίαση της ακτινοβολίας σε μια μικρότερη περιοχή (δέκτης), αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση ενέργειας.

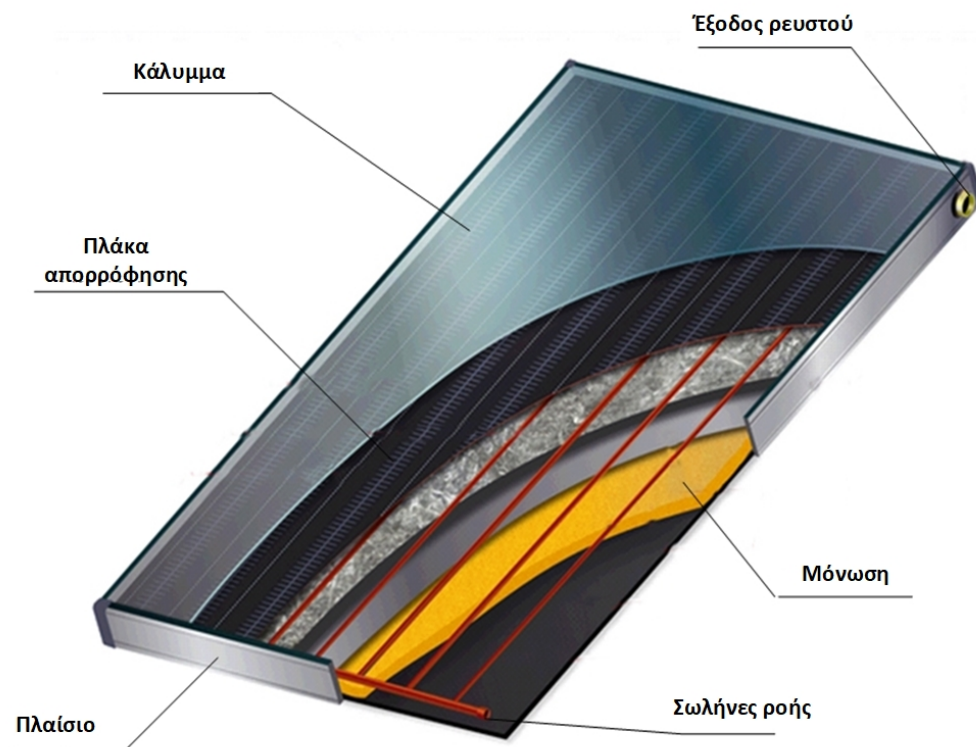
Μερικοί από τους πιο συνηθισμένους τύπους ηλιοθερμικών συλλεκτών παρουσιάζονται παρακάτω.

### **1.1.1 Επίπεδοι συλλέκτες**

Ο επίπεδος συλλέκτης (Flat Plate Collector – FPC), είναι μακράν ο πιο συνηθισμένος και χρησιμοποιούμενος τύπος ηλιοθερμικού συλλέκτη σε παγκόσμιο επίπεδο. Χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας κάτω από 100°C, συνήθως στην περιοχή από 30 °C έως 80 °C, όπως η θέρμανση χώρων, η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, καθώς και για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας, όπως για διαδικασίες προθέρμανσης [8]. Υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση κενού ή διαφανούς μόνωσης (transparent insulation - TI) [9] και εξαιρετικά επιλεκτικών επιστρώσεων (π.χ. TiNOX). Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένας επίπεδος συλλέκτης, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.1, είναι τα ακόλουθα [10]:

- Η πλάκα απορρόφησης, η οποία μπορεί να είναι επίπεδη, κυματοειδής ή με αυλακώσεις και πάνω στην οποία συνδέονται τα μέρη του συστήματος μεταφοράς θερμότητας. Είναι συνήθως βαμμένη με μαύρο ή κάποιο άλλο σκούρο χρώμα, ενώ επιλεκτικές επιστρώσεις χρησιμοποιούνται για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συλλέκτη.
- Το σύστημα μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή σωλήνες, πτερύγια ή δίοδοι μέσω των οποίων το εργαζόμενο ρευστό ρέει από την είσοδο στην έξοδο.
- Το κάλυμμα, το οποίο αποτελείται από ένα ή περισσότερα φύλλα από γυαλί ή άλλα υλικά (όπως πλαστικό) μέσω των οποίων διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία, και το οποίο έχει ως σκοπό τον περιορισμό των θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.
- Η μόνωση στο πίσω μέρος και στις παράπλευρες επιφάνειες του συλλέκτη, η οποία χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών.

- Το πλαίσιο, δηλαδή το περίβλημα που περιβάλλει όλα τα προαναφερθέντα μέρη του συλλέκτη και παρέχει προστασία έναντι της σκόνης, της υγρασίας καθώς και άλλων διαβρωτικών παραγόντων.



Εικ. 1.1 Σχηματική απεικόνιση επίπεδου συλλέκτη [11]

Οι επίπεδοι συλλέκτες παρουσιάζουν χαμηλό κόστος κατασκευής, ενώ συλλέγουν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία. Η θέση τους είναι μόνιμα σταθερή και επομένως δεν απαιτείται σύστημα παρακολούθησης του Ηλίου. Ο συλλέκτης πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό, με κατάλληλη κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει όσο το δυνατόν πιο κάθετα στην επιφάνειά του.

### 1.1.2 Συλλέκτες κενού

Οι συλλέκτες κενού (Evacuated Tube Collectors – ETC) αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων των επίπεδων συλλεκτών, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι για λειτουργία σε περιοχές με ηλιοφάνεια και θερμό κλίμα [12]. Οι συλλέκτες κενού παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση από τους επίπεδους συλλέκτες, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ αποτελούν μία αποτελεσματική εναλλακτική αυτών σε περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες θερμοκρασίες, έντονους ανέμους και υψηλές περιόδους νέφωσης, όπου η απόδοση των τελευταίων μειώνεται σημαντικά [5]. Το θερμοκρασιακό εύρος των συλλεκτών κενού κυμαίνεται από 50 °C έως και πάνω από 200 °C [10, 13]. Χρησιμοποιούνται σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές τόσο θέρμανσης, όσο και ψύξης, μέσω θερμικά εκκινούμενων συστημάτων ψύξης [14].

Οι συλλέκτες κενού αποτελούνται από παράλληλα τοποθετημένους υάλινους σωλήνες κενού, οι οποίοι συνδέονται σε ένα κεντρικό σωλήνα συλλογής, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.2.

Εντός των σωλήνων βρίσκεται μία απορροφητική επιφάνεια, ενώ ο αέρας στο εσωτερικό τους έχει αφαιρεθεί, με αποτέλεσμα να επικρατούν συνθήκες κενού, με την πίεση να είναι της τάξεως των  $10^{-3}$  mbar [14]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ισχυρών συνθηκών μόνωσης, το οποίο συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας.



Εικ. 1.2 Συλλέκτης κενού [15]

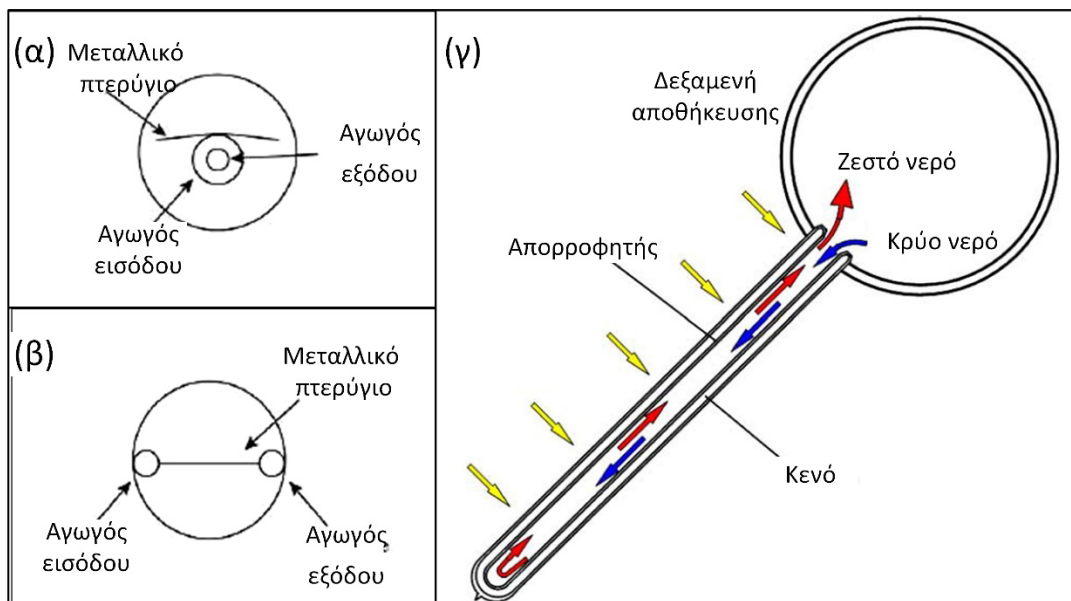
Οι σωλήνες κενού διακρίνονται σε διπλού (Dewar-type) και μονού τοιχώματος [16, 17]. Οι σωλήνες διπλού τοιχώματος, οι οποίοι αποτελούν το συνηθέστερο τύπο, περιλαμβάνουν δύο ομόκεντρους υάλινους σωλήνες, έναν εξωτερικό και ένα εσωτερικό, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι στο ένα τους άκρο. Σε αυτή την περίπτωση, το κενό διατηρείται στο χώρο ανάμεσα στους δύο σωλήνες. Η εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα καλύπτεται με επιλεκτική επίστρωση, η οποία παρουσιάζει υψηλή απορροφητικότητα και χαμηλό συντελεστή εκπομπής, λειτουργώντας ως η απορροφητική επιφάνεια. Στους σωλήνες μονού τοιχώματος επικρατούν συνθήκες κενού σε ολόκληρο το εσωτερικό αυτού, όπου βρίσκεται ο απορροφητικός σωλήνας (χάλκινος ή υάλινος), ο οποίος είναι προσκολλημένος σε επικαλυμμένο με επιλεκτική επίστρωση, επίπεδο ή καμπύλο μεταλλικό έλασμα. Οι σωλήνες διπλού τοιχώματος είναι πιο αποτελεσματικοί ως προς τη διατήρηση του κενού, καθώς δεν απαιτείται σφράγιση γυαλιού-μετάλλου, ωστόσο οι σωλήνες μονού τοιχώματος απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας και έχουν καλύτερη απόδοση [13].

Ανάλογα με το μηχανισμό με τον οποίο απάγεται η θερμότητα από τον απορροφητή, οι συλλέκτες κενού χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

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

## I. Συλλέκτες άμεσης ροής

Στους συλλέκτες άμεσης ροής, το εργαζόμενο μέσο ρέει εντός του απορροφητή. Εντός κάθε σωλήνα κενού, ο οποίος μπορεί να είναι μονού ή διπλού τοιχώματος, βρίσκεται ένα μεταλλικό πτερύγιο με επιλεκτική επίστρωση, στο οποίο είναι προσκολλημένοι ο απορροφητικός σωλήνας. Ανάλογα με το σχήμα του σωλήνα, το ρευστό μπορεί να ρέει είτε ομοαξονικά, είτε ακολουθώντας μία διαδρομή τύπου “U” (U-ribe ETC), Εικ. 1.3 (α), (β), ωστόσο και στις δύο περιπτώσεις, εισέρχεται και εξέρχεται από την ίδια μεριά του σωλήνα κενού. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι συλλέκτες κενού θερμοσιφωνικού τύπου, στους οποίους το εργαζόμενο μέσο ρέει ελεύθερα εντός ενός σωλήνα κενού, ο οποίος είναι διπλού τοιχώματος, μέσω του φαινομένου της φυσικής συναγωγής, Εικ. 1.3 (γ).



Εικ. 1.3 Σωλήνας κενού άμεσης ροής. (α) ομοαξονικός (β) τύπου “U” (γ) θερμοσιφωνικού τύπου [14, 18]

## II. Συλλέκτες θερμικού σωλήνα

Οι συλλέκτες θερμικού σωλήνα περιλαμβάνουν έναν μεταλλικό αγωγό (θερμικός σωλήνας) ο οποίος βρίσκεται εντός ενός υάλινου σωλήνα κενού διπλού τοιχώματος. Ο αγωγός, ο οποίος είναι συνήθως χάλκινος, είναι κλειστός στο ένα του άκρο, ενώ στο άλλο άκρο του προσαρμόζεται ένας επίσης κλειστός μεταλλικός αγωγός μικρού μήκους (συμπυκνωτής). Ο θερμικός σωλήνας είναι προσκολλημένος σε ένα κυκλικού σχήματος έλασμα αλουμινίου ή χαλκού (απορροφητική πλάκα) το οποίο βρίσκεται παράλληλα σε επαφή και με το εσωτερικό του σωλήνα κενού, ώστε μέσω της επιφάνειάς του να μεταφέρεται η θερμότητα με αγωγή στον πρώτο. Εντός του θερμικού σωλήνα, στο εσωτερικό του οποίου επικρατούν συνθήκες κενού, βρίσκεται μία μικρή ποσότητα υγρού, όπως νερό ή μεθανόλη [10, 14]. Σκοπός του κενού είναι η ελάττωση του σημείου βρασμού του υγρού, ώστε να είναι εύκολη η μετάβαση από την υγρή στην αέρια φάση, για λειτουργία του συλλέκτη σε τυπικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του υγρού εντός του θερμικού σωλήνα, αυτό ατμοποιείται και ανεβαίνει στην κορυφή αυτού. Εκεί συμπυκνώνεται, μεταφέροντας τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησής του στο εργαζόμενο

ρευστό του συλλέκτη, το οποίο είναι σε επαφή με το συμπυκνωτή. Στη συνέχεια, το συμπύκνωμα επιστρέφει λόγω βαρύτητας στο χαμηλότερο σημείο του θερμικού σωλήνα και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

*Εικ. 1.4 Σωλήνας κενού με θερμικό σωλήνα [19]*

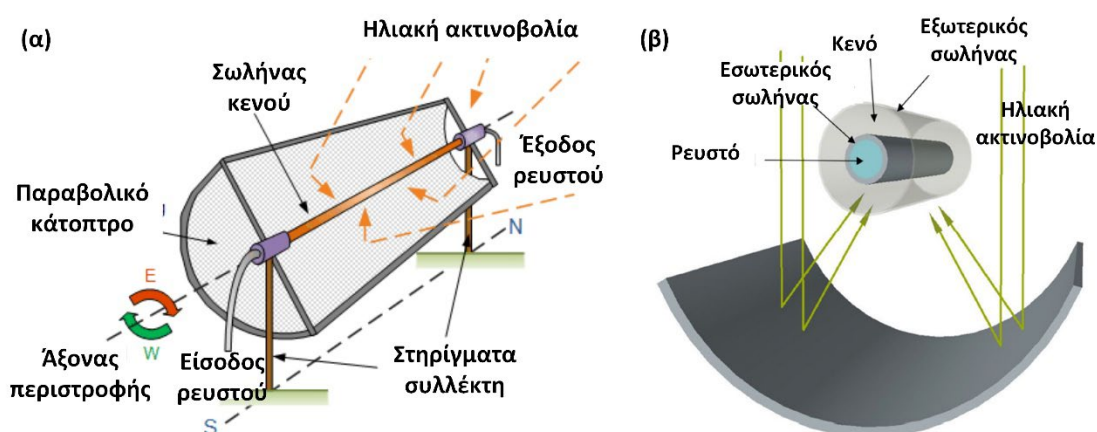
Συγκρίνοντας τους δύο παραπάνω τύπους συλλεκτών, η απόδοση αυτών είναι παρόμοια, με τους συλλέκτες άμεσης ροής να παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για πιο οικονομικούς και συμπαγείς συλλέκτες, οι οποίοι μπορούν να εγκατασταθούν είτε οριζόντια είτε κάθετα, το οποίο τους καθιστά μοναδική επιλογή σε περιπτώσεις όπου δε μπορεί να εγκατασταθεί άλλο είδος συλλέκτη. Αντίθετα, οι συλλέκτες θερμικού σωλήνα απαιτούν μία κλίση τουλάχιστον 25°, ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή του εσωτερικού υγρού του σωλήνα στο κάτω μέρος αυτού [14]. Επιπρόσθετα, λόγω της αρχής λειτουργίας τους οι συλλέκτες άμεσης ροής έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια απορρόφησης της ακτινοβολίας (aperture area) σε σχέση με τους συλλέκτες θερμικού σωλήνα για δεδομένη μεικτή επιφάνεια συλλέκτη (gross area). Από την άλλη μεριά, οι συλλέκτες θερμικού σωλήνα έχουν εξαιρετική προστασία έναντι του σχηματισμού πάγου και της υπερθέρμανσης, καθώς δεν είναι δυνατή η υπέρβαση της θερμοκρασίας στην οποία γίνεται η αλλαγή φάσης του εσωτερικού υγρού. Επιπλέον, η εγκατάσταση και συντήρηση αυτών είναι πιο εύκολη λόγω του αρθρωτού σχεδιασμού τους, όπου η αντικατάσταση ενός σωλήνα κενού μπορεί να γίνει χωρίς την εκκένωση ολόκληρου του συστήματος, σε αντίθεση με τους συλλέκτες άμεσης ροής όπου αυτό είναι απαραίτητο.

### **1.1.3 Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου**

Οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου (Parabolic Trough Collectors – PTC) ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτικών συλλεκτών και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών και αποδόσεων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία συλλεκτών αποτελεί την πιο ώριμη τεχνολογία η οποία μπορεί να παράξει αποτελεσματικά θερμότητα σε θερμοκρασίες από 50 °C έως 400 °C [10].



Οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου αποτελούνται από μία κοίλη ανακλαστική επιφάνεια στο σχήμα της παραβολής και ένα σωλήνα κενού (δέκτης), ο οποίος είναι τοποθετημένος στην εστιακή γραμμή της παραβολής και σε όλο το μήκος του συλλέκτη, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.5 (α). Το κάτοπτρο κατασκευάζεται είτε από στιλβωμένα μεταλλικά φύλλα τα οποία κάμπτονται κατάλληλα, είτε από κοίλους καθρέπτες. Ο δέκτης περιλαμβάνει έναν εσωτερικό μεταλλικό σωλήνα μαύρου χρώματος, η επιφάνεια του οποίου επικαλύπτεται με επιλεκτική επίστρωση, καθώς και έναν εξωτερικό υάλινο σωλήνα. Ο αέρας στο χώρο μεταξύ των δύο σωληνών αφαιρείται ώστε εντός αυτού να επικρατούν συνθήκες κενού, για τη μείωση των θερμικών απωλειών.



Εικ. 1.5 Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου (α) μέρη συλλέκτη (β) λεπτομέρεια συλλέκτη και αρχή λειτουργίας [20]

Ο τρόπος λειτουργίας του συγκεκριμένου συλλέκτη βασίζεται στη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά μήκος της εστιακής γραμμής της παραβολής, όπου είναι τοποθετημένος ο δέκτης και εντός του οποίου ρέει το εργαζόμενο ρευστό, Εικ. 1.5 (β). Οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου εκμεταλλεύονται μόνο την άμεση ακτινοβολία, η οποία πρέπει να πέφτει κάθετα, και για αυτό το λόγο απαιτούν σύστημα παρακολούθησης του Ηλίου (ενός άξονα).

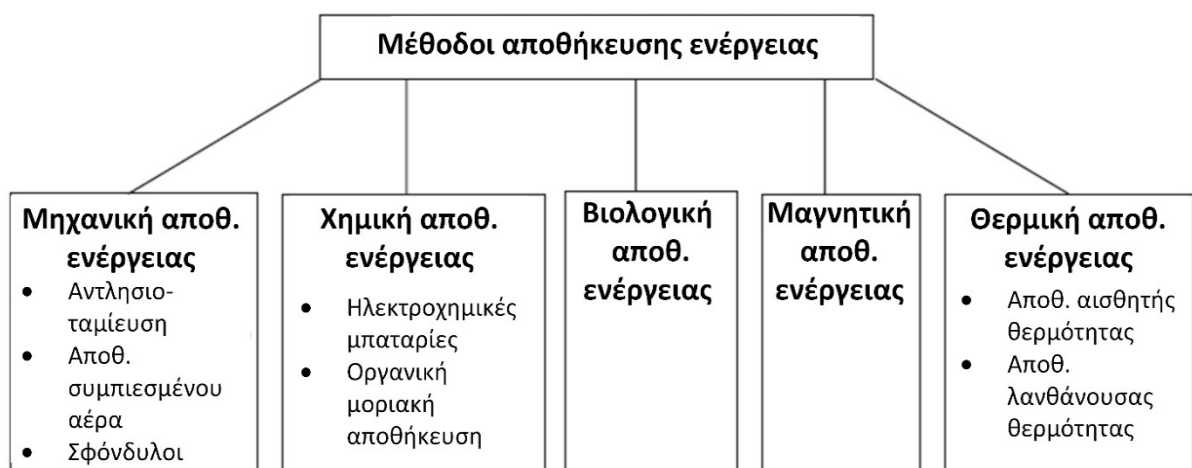
Οι εφαρμογές των συλλεκτών παραβολικού κατόπτρου περιλαμβάνουν δύο βασικές κατηγορίες [21]. Η πρώτη και σημαντικότερη αφορά τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Concentrated Solar Power Plants – CSP), όπου οι συλλέκτες τροφοδοτούν κύκλους νερού – αμού είτε άμεσα, είτε έμμεσα και οι θερμοκρασίες είναι της τάξεως των 300 °C έως 400 °C [22]. Η άλλη κατηγορία περιλαμβάνει εφαρμογές όπου η θερμοκρασία κυμαίνεται από 100 °C έως 250 °C, όπως η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες, η κάλυψη αναγκών σε θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλού ρυθμού κατανάλωσης (ζεστό νερό χρήσης, θέρμανση χώρων και πισινών) και η τροφοδότηση θερμικά εκκινούμενων ψυκτικών κύκλων. Επιπλέον, πρόσθετες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση τους σε συστήματα άντλησης νερού άρδευσης, για την αφαλάτωση και την αποστείρωση αυτού [22].

## 1.2 Εποχιακή Αποθήκευση Θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η, σε παγκόσμια κλίμακα, συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας συνεπάγεται τόσο επιπτώσεις στο περιβάλλον όσο και την εξάντληση των συμβατικών πηγών. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, η αξιοσημείωτη πρόοδος στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τις έχει καταστήσει ανταγωνιστικές των συμβατικών σε όρους αποδοτικότητας και αξιοπιστίας [23]. Η αποθήκευση ενέργειας (Energy Storage – ES) παίζει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από πηγές οι οποίες χαρακτηρίζονται από διακοπτόμενη παραγωγή (π.χ. ηλιακή, αιολική ενέργεια) το οποίο αποτελεί ένα εγγενές χαρακτηριστικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [24], ενώ συνεπάγεται οφέλη όπως μειωμένο κόστος ενέργειας, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, αυξημένη ευελιξία, χαμηλότερες εκπομπές ρυπαντών κ.α.. Για την αποθήκευση της ενέργειας υπάρχει ένα πλήθος διαθέσιμων μεθόδων, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με το μηχανισμό αποθήκευσης και περιλαμβάνουν [25]:

- Μηχανική αποθήκευση ενέργειας
- Χημική αποθήκευση ενέργειας
- Βιολογική αποθήκευση ενέργειας
- Μαγνητική αποθήκευση ενέργειας
- Θερμική αποθήκευση ενέργειας

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 1.6), κάθε μέθοδος αποθήκευσης περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες για τη υλοποίηση αυτής. Στη συγκεκριμένη υποενότητα, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, θα παρουσιαστεί η θερμική αποθήκευση ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES) και θα αναλυθούν οι επιμέρους τεχνολογίες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, ενώ θα δοθεί έμφαση στην εποχιακή αποθήκευση θερμότητας (Seasonal Thermal Energy Storage – STES).



Εικ. 1.6 Ταξινόμηση μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας [25]

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας αφορά ουσιαστικά τη δέσμευση αυτής και τη χρήση της σε μεταγενέστερο χρόνο, όταν θα είναι απαραίτητη, ενώ εισήχθη και διερευνήθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970, για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης [23]. Η θερμοκρασία στην οποία αποθηκεύεται η θερμότητα, καθώς και η τεχνολογία αποθήκευσης η οποία θα χρησιμοποιηθεί, καθορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή, ενώ η τελευταία εξαρτάται από παράγοντες όπως η απαιτούμενη περίοδος αποθήκευσης, οι συνθήκες λειτουργίας κλπ. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης έχει πληθώρα εφαρμογών, οι περισσότερες εξ' αυτών σχετίζονται με την παροχή ψύξης και θέρμανσης, όπου λειτουργούν ως ένας ρυθμιστής μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης.

Ανάλογα με τη διάρκεια της αποθήκευσης της ενέργειας, αυτή ταξινομείται σε δύο κατηγορίες. Συγκεκριμένα διακρίνεται η βραχυπρόθεσμη (short-term) αποθήκευση, η οποία συχνά αποκαλείται και ημερήσια αποθήκευση και χρησιμοποιείται για την κάλυψη αιχμών εντός της ημέρας, καθιστώντας δυνατή τη μείωση της ονομαστικής ισχύος των συστημάτων κατά τη διαστασιολόγησή τους. Από την άλλη μεριά, στη μακροπρόθεσμη (long-term) αποθήκευση, η θερμότητα χρησιμοποιείται για την κάλυψη φορτίων με μία υστέρηση ορισμένων εβδομάδων ή μηνών. Η συγκεκριμένη περίπτωση, περιλαμβάνει σχεδόν αποκλειστικά τη συλλογή και αποθήκευση ηλιακής ενέργειας κατά την καλοκαιρινή περίοδο και τη χρήση αυτής το χειμώνα για παροχή θέρμανσης, η οποία είναι επίσης γνωστή ως εποχιακή αποθήκευση θερμότητας. Με αυτό τον τρόπο, η ηλιακή ενέργεια καθίσταται ικανή τόσο για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης (ZNX), όσο και για την παροχή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου, αντιμετωπίζοντας κατά αυτό τον τρόπο το θεμελιώδες πρόβλημα της ετεροχρονισμένης διαθεσιμότητας αυτής με την κατανάλωση.

### **1.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας**

Στη μέθοδο της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, η (ηλιακή) ενέργεια συλλέγεται και αποθηκεύεται σε συγκεκριμένα υλικά/μέσα αποθήκευσης, αυξάνοντας τη θερμοκρασία αυτών, και ανακτάται όταν αυτό είναι αναγκαίο. Τα συστήματα αισθητής αποθήκευσης αποτελούνται από το μέσο αποθήκευσης, ένα δοχείο αποθήκευσης, το οποίο περιορίζει τις απώλειες, και συσκευές εισόδου/εξόδου. Η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από τη μάζα και την ειδική θερμοχωρητικότητα του εκάστοτε υλικού καθώς και τη θερμοκρασιακή αύξηση αυτού. Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται απλή, χαμηλού κόστους, αξιόπιστη και σχετικά ώριμη ως τεχνολογία εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, και για αυτό το λόγο έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα έργων. Αυτή τη στιγμή, πολυάριθμες εγκαταστάσεις βρίσκονται σε λειτουργία στη Σουηδία, την Ολλανδία, τη Γερμανία, καθώς και σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες, όπως και στον Καναδά και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, οι οποίες περιλαμβάνουν αποθήκευση με βάση το νερό, αποθήκευση σε λίθους (κυρίως με τη χρήση χαλικιού) και αποθήκευση στο έδαφος/χώμα. Οι συγκεκριμένοι τύποι αποθήκευσης θα αναλυθούν παρακάτω.

Όσον αφορά τα μέσα αποθήκευσης, διακρίνεται ποικιλία αυτών, ενώ κάθε ένα παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, το νερό έχει υψηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα ( $\approx 4.2 \text{ kJ/kgK}$ ) σε σχέση με την πέτρα ή το χώμα ( $\approx 0.84 \text{ kJ/kgK}$ ) [25]. Από

την άλλη, η χαμηλή τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας αυτών των υλικών, αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα επίτευξης μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών καθώς και την υψηλή πυκνότητα αυτών. Γενικά, προκειμένου ένα υλικό να είναι κατάλληλο για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας, θα πρέπει να είναι φθηνό και να έχει καλή τιμή θερμοχωρητικότητας. Ορισμένα από τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας καθώς και οι ιδιότητές τους δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πιν. 1.1 Θερμοχωρητικότητα στους 20 °C ορισμένων κοινών υλικών για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας [25]

Υλικό	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg K)	Ογκομετρική θερμοχωρητικότητα (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K)
Πηλός	1458	879	1.28
Τούβλο	1800	837	1.51
Αμμόπετρα	2200	712	1.57
Ξύλο	700	2390	1.67
Σκυρόδεμα	2000	880	1.76
Γυαλί	2710	837	2.27
Αλουμίνιο	2710	896	2.43
Σίδηρος	7900	452	3.57
Ατσάλι	7840	465	3.68
Χαλικώδες έδαφος	2050	1840	3.77
Μαγνητίτης	5177	752	3.89
Νερό	988	4182	4.17

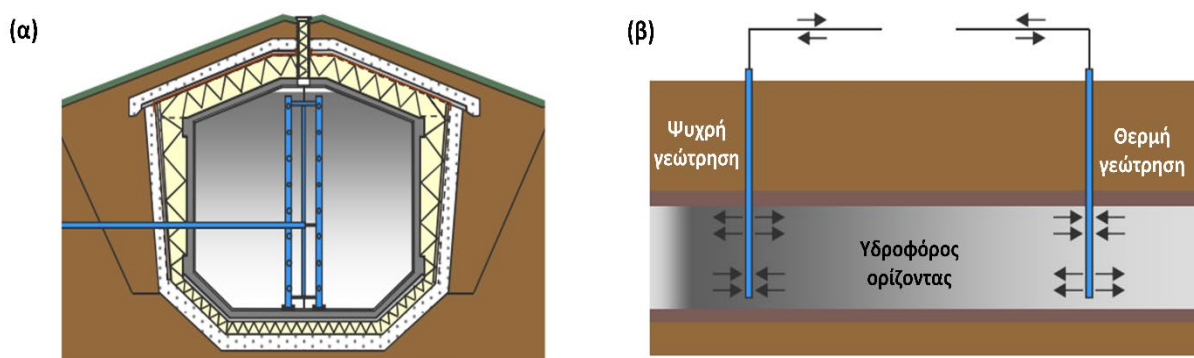
#### I. Αποθήκευση με βάση το νερό

Το νερό αποτελεί ένα προτιμητέο μέσο αποθήκευσης θερμότητας λόγω της υψηλής ειδικής θερμοχωρητικότητάς του (συγκρινόμενο με άλλα μέσα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας) καθώς και του υψηλού ρυθμού φόρτισης και αποφόρτισής του. Τα συστήματα αποθήκευσης με βάση το νερό, χρησιμοποιούν το τελευταίο ως μέσο αποθήκευσης και μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε συστήματα δεξαμενής νερού (Tank Thermal Energy Systems – TTES) και σε συστήματα αποθήκευσης σε υδροφόρο ορίζοντα (Aquifer Thermal Energy Systems – ATES).

Τα συστήματα δεξαμενής νερού, Εικ. 1.7 (α), αποτελούνται από τεχνητές κατασκευές, οι οποίες κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, ή από ανοξείδωτο χάλυβα, είτε από

ενισχυμένο με υαλόνημα πλαστικό, ενώ η εξωτερική τους επιφάνεια καλύπτεται με μόνωση μεγάλου πάχους για τη μείωση των θερμικών απωλειών [26]. Οι δεξαμενές συνήθως τοποθετούνται θαμμένες κάτω από το έδαφος (σε αυτή την περίπτωση ονομάζονται επίσης «λάκκοι νερού»– water pits), είτε τοποθετούνται στη οροφή ή στο εξωτερικό ενός κτηρίου πάνω από το επίπεδο του εδάφους, το οποίο αποτελεί και την τεχνολογία αιχμής. Τα συγκεκριμένα συστήματα λειτουργούν με θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση, με το νερό να είναι θερμότερο στην κορυφή της δεξαμενής και ψυχρότερο στον πυθμένα αυτής, ενώ η διατήρηση της διαστρωμάτωσης και ο περιορισμός φαινομένων ανάμιξης είναι απαραίτητοι για την αποφυγή της μείωσης του βαθμού απόδοσης αυτού. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί δεξαμενές οι οποίες περιλαμβάνουν εσωτερικά χωρίσματα [27]. Επιπρόσθετα, προκειμένου να αποφευχθεί η διαφυγή νερού και υδρατμών, το εσωτερικό της δεξαμενής συνήθως επενδύεται με ένα μανδύα από χάλυβα ή άλλο υλικό.

Σε ένα σύστημα αποθήκευσης σε υδροφόρο ορίζοντα, χρησιμοποιείται κατάλληλος υδροφόρος ορίζοντας στον οποίο διανοίγονται τουλάχιστον δύο γεωθερμικές γεωτρήσεις (η μία αποκαλείται θερμή γεώτρηση και η άλλη ψυχρή γεώτρηση), μέσω των οποίων γίνεται η έγχυση και η άντληση των υπογείων υδάτων, Εικ. 1.7 (β). Ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελείται από πορώδη στρώματα άμμου, χαλικιού, ή ασβεστόλιθου γεμάτα με νερό και με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Τα υλικά των στρωμάτων χρησιμεύουν ως το μέσο αποθήκευσης της θερμότητας, ενώ τα υπόγεια ύδατα ως το εργαζόμενο ρευστό μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά της θερμότητας. Κατά τη φόρτιση του συστήματος, κρύο νερό αντλείται από την ψυχρή γεώτρηση, θερμαίνεται με ηλιακή ενέργεια και εγχέεται στη θερμή γεώτρηση, ενώ κατά την αποφόρτιση η ροή αντιστρέφεται. Για το σκοπό αυτό, κάθε γεώτρηση διαθέτει αντλίες και κατάλληλες σωληνώσεις.



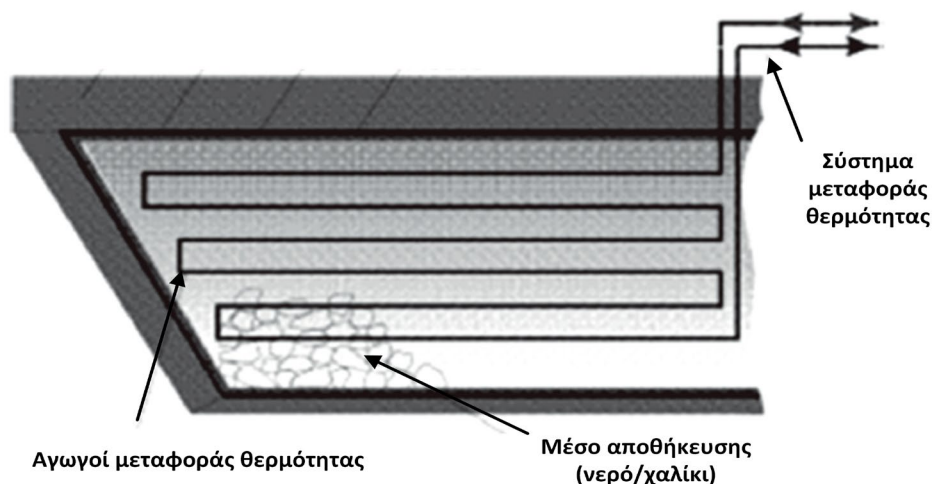
Εικ. 1.7 Συστήματα αποθήκευσης με βάση το νερό. (α) σύστημα δεξαμενής νερού (β) σύστημα αποθήκευσης σε υδροφόρο ορίζοντα [26]

## II. Αποθήκευση σε στρώμα λίθων

Κατά την αποθήκευση σε στρώμα λίθων (βότσαλα, χαλίκι ή τούβλα), η θερμότητα που συλλέγεται κατά το καλοκαίρι αποθηκεύεται σε αυτό και ανακτάται το χειμώνα, μέσω ενός εργαζόμενου ρευστού (νερό ή αέρας) το οποίο ρέει εντός του στρώματος. Συνήθως, η κυκλοφορία του ρευστού καθίσταται δυνατή μέσω διάτρητων αγωγών οι οποίοι εισάγονται εντός της λιθώδους δομής [28]. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση θερμότητας σε θερμοκρασία αρκετά υψηλότερη

των 100°C, σε αντίθεση με την αποθήκευση σε νερό. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητας των λίθων, τα συστήματα αυτά απαιτούν περίπου τον τριπλάσιο όγκο για την αποθήκευση του ίδιου ποσού θερμότητας συγκριτικά με τα προηγούμενα, το οποίο όμως συχνά αντισταθμίζεται από το χαμηλότερο κόστος τους [25]. Όσον αφορά το στρώμα λίθων, το να είναι αδιαπέραστο, χωρίς κυρτώσεις, συμπαγές και ανθεκτικό σε μακροπρόθεσμη βάση, αποτελούν απαραίτητα χαρακτηριστικά αυτού για την αποθήκευση μεγάλων ποσών θερμότητας.

Παράλληλα, διακρίνεται ως τεχνολογία, και ο συνδυασμός της αποθήκευσης στο νερό με την παρούσα τεχνολογία όπου ως αποθηκευτικό μέσο χρησιμοποιείται ένα μείγμα λίθων και νερού (σε αναλογία περίπου 60% - 40% [26]), ο οποίος αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ του υψηλού κόστους κατασκευής της δεξαμενής νερού και της χαμηλής θερμοχωρητικότητας των λίθων. Η κατασκευή των συγκεκριμένων συστημάτων συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτηση μόνωσης και ενός μονωτικού μανδύα εντός μίας κοιλότητας στο έδαφος όπως και ένα καπάκι το οποίο συνήθως επιπλέει στο νερό (Εικ. 1.8). Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση, ο όγκος του συστήματος είναι κατά 50% αυξημένος σε σχέση με τα συστήματα δεξαμενής νερού.

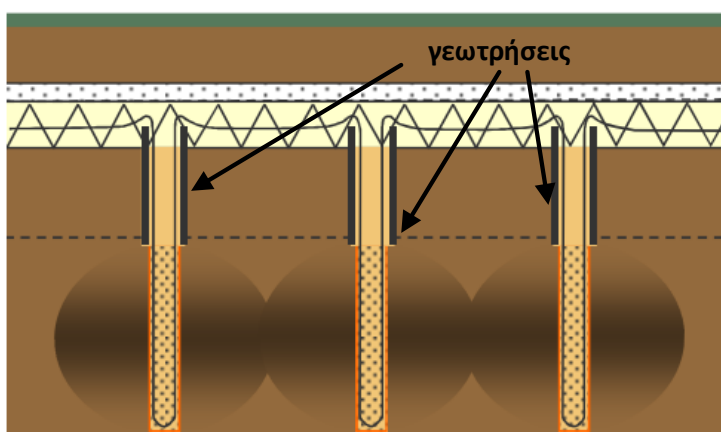


Εικ. 1.8 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με μέσο αποθήκευσης μείγμα νερού και χαλικιού [29]

### III. Αποθήκευση στο έδαφος

Η αποθήκευση στο έδαφος (Borehole Thermal Energy Storage – BTES), αποτελεί τη δεύτερη εφαρμογή υπόγειας αποθήκευσης θερμότητας (Underground Thermal Energy Storage – UTES), μαζί με την αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα, όπου το έδαφος χρησιμοποιείται ως το μέσο αποθήκευσης της θερμότητας. Για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος το έδαφος σκάβεται και διανοίγονται γεωτρήσεις, προκειμένου να τοποθετηθούν είτε οριζόντιες είτε κατακόρυφες σωληνώσεις, με το βάθος τους να κυμαίνεται από 30 έως 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους [26]. Οι σωληνώσεις, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (high density polyethylene – HDPE) ή άλλο συνθετικό υλικό, λειτουργούν ως εναλλάκτες θερμότητας και εντός αυτών ρέει το εργαζόμενο ρευστό το οποίο είναι συνήθως νερό, γλυκόλη ή κάποιο αντιψυκτικό διάλυμα

άλμης. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην προηγούμενη τεχνολογία, η αποθήκευση στο έδαφος απαιτεί περίπου 3 έως 5 φορές μεγαλύτερο όγκο σε σχέση με την αποθήκευση σε νερό [30]. Κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούν κορεσμένα σε νερό αργιλώδη εδάφη και πετρώματα, λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητάς τους, χωρίς την ύπαρξη φυσικής ροής υπογείων υδάτων. Οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους, (όπως η αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα) επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και την απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων.



Εικ. 1.9 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος [26]

### 1.2.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Κατά την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, αυτή αποθηκεύεται σχεδόν ισοθερμοκρασιακά σε ορισμένα υλικά, τα οποία ονομάζονται υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials – PCMs), ως η λανθάνουσα θερμότητα της αλλαγής φάσης. Όταν ένα υλικό τήκεται ή εξατμίζεται, απορροφά θερμότητα, ενώ όταν αλλάζει φάση σε στερεό (κρυσταλλοποίηση) ή σε υγρό (συμπύκνωση), αποδίδει αυτή τη θερμότητα. Αυτή η αλλαγή φάσης χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας στα PCMs. Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η αλλαγή φάσης των υλικών αυτών παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος, το οποίο τα καθιστά κατάλληλα για πλήθος εφαρμογών. Τα υλικά αλλαγής φάσης συνήθως κατηγοριοποιούνται σε οργανικά (παραφίνη, λιπαρά οξέα, αλκάνια) και ανόργανα (άλατα), βλ. Πιν. 1.2.

Ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, αποτελείται τουλάχιστον από τις παρακάτω τρεις συνιστώσες [31]:

- Μία ουσία η οποία υφίσταται αλλαγή φάσης στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος, και όπου η θερμότητα αποθηκεύεται στη μορφή λανθάνουσας θερμότητας.
- Ένα δοχείο για την ουσία αυτή.
- Μία επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, για τη μεταφορά αυτής από την πηγή στην ουσία και από αυτή στο φορτίο.

Η τοποθέτηση των PCMs σε κάψουλες/δοχεία είναι απαραίτητη για τεχνικούς λόγους. Τα δοχεία αυτά έχουν τυπικά τραχιά επιφάνεια, είναι υδατοστεγή και αυτό-στοιβαζόμενα (self-

stacking), και είναι κατασκευασμένα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Το σχήμα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή, ενώ υπάρχει πληθώρα αυτών. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, ενώ αποτρέπεται η διαρροή της υγρής φάσης. Παράλληλα, καθίσταται πιο εύκολη η μεταβολή του όγκου του υλικού, το οποίο μπορεί να είναι σημαντικό ειδικότερα για τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης. Τα δοχεία στη συνέχεια, τοποθετούνται εντός μίας δεξαμενής. Η μεταφορά της θερμότητας επιτυγχάνεται με ένα εργαζόμενο ρευστό (συνήθως νερό) το οποίο ρέει ανάμεσα σε αυτά.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης παρουσιάζει αρκετά υψηλή πυκνότητα ενέργειας σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, το οποίο οδηγεί σε μικρότερα και ελαφρύτερα συστήματα (περίπου  $0.155 \text{ m}^3$  ανά τόνο για ολόκληρο το σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει τις σωληνώσεις και το νερό στη δεξαμενή [25]) και χαμηλότερες απώλειες θερμότητας. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η θερμοκρασία ενός συγκεκριμένου όγκου νερού ( $c_p \approx 4.2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ ) πρέπει να αυξηθεί κατά  $43^\circ\text{C}$ , προκειμένου να αποθηκεύσει την ίδια ποσότητα θερμότητας με το ίδιο όγκο μίας τυπικής παραφίνης, όπως η C13-C24, η οποία λιώνει. Αντίστοιχα, θα έπρεπε να αυξηθεί κατά  $270^\circ\text{C}$ , αν αντί για παραφίνη χρησιμοποιούταν χλωριούχο νάτριο (NaCl). Ένα άλλο πλεονέκτημα των υλικών αλλαγής φάσης είναι ότι η αποφόρτιση αυτών γίνεται σε σταθερή θερμοκρασία και δεν υπάρχει σταδιακή μείωση αυτής όσο αφαιρείται θερμότητα από αυτά.

Πιν. 1.2 Ταξινόμηση και ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης [32]

Ταξινόμηση	Ανόργανα	Οργανικά
<b>Κατηγορία</b>	Ένυδρα άλατα, τηγμένα άλατα, μέταλλα ή κράματα	Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες μακράς αλυσίδας, οξέα/ εστέρες ή άλατα, αλκοόλες, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αρωματική κετόνη, λακτάμη, φρέον, πολυανθρακική κατηγορία, πολυμερή
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, μη εύφλεκτα, φθηνά	Φυσική και χημική σταθερότητα, καλή θερμική συμπεριφορά, ρυθμιζόμενη ζώνη μετάβασης
<b>Μειονεκτήματα</b>	Υπόψυξη, διαχωρισμός φάσης, διαβρωτικά	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή πυκνότητα, χαμηλό σημείο τήξης, εξαιρετικά πτητικά, εύφλεκτα, μεταβολή όγκου

### 1.2.3 Χημική αποθήκευση θερμότητας

Η χημική αποθήκευση αποτελεί μία έμμεση μέθοδο αποθήκευσης θερμότητας, καθώς αυτή δεν αποθηκεύεται άμεσα ως αισθητή ή λανθάνουσα, αλλά μέσω μίας φυσικο-χημικής διεργασίας. Η χημική αποθήκευση μπορεί να διαχωριστεί στην αποθήκευση μέσω χημικών αντιδράσεων και μέσω θερμο-χημικής ρόφησης [33].



Στην αποθήκευση μέσω χημικών αντιδράσεων, η θερμότητα απαιτείται για τη διάσπαση μίας χημικής ένωσης στα προϊόντα της, τα οποία αποθηκεύονται ξεχωριστά, χωρίς να έρχονται σε επαφή, κατά την περίοδο αποθήκευσης. Όταν απαιτείται, τα προϊόντα της αντίδρασης μετατρέπονται στην αρχική ένωση μέσω μίας εξώθερμης αντίδρασης, παρέχοντας θερμότητα για την κάλυψη του φορτίου. Η τελευταία αντίδραση γίνεται σε εν γένει χαμηλότερη θερμοκρασία από την αντίστοιχη ενδόθερμη, ενώ καθώς η αισθητή θερμότητα είναι κατά πολύ μικρότερη από τη θερμότητα της αντίδρασης, οι απώλειες θερμότητας δεν αποτελούν πρόβλημα. Διάφορες κατάλληλες χημικές αντιδράσεις για τη συγκεκριμένη τεχνολογία προσδιορίστηκαν κατά το Έργο 32 του προγράμματος Ηλιακής Θέρμανσης και Ψύξης (ΗΘΨ) του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (ΔΟΕ) (IEA SHC Task 32) [33], οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πιν. 1.3 Πιθανά αναγνωρισθέντα υλικά για αποθήκευση θερμότητας μέσω χημικών αντιδράσεων κατά το Έργο 32 του προγράμματος ΗΘΨ του ΔΟΕ [33]

Υλικό	Αντίδραση διάσπασης	Πυκνότητα αποθήκευσης (GJ/m <sup>3</sup> )	Χαρακτηριστική θερμοκρασία (°C)
Θειικό μαγνήσιο	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{MgSO}_4(\text{s}) + 7\text{H}_2\text{O}$	2.8	122
Οξείδιο του πυριτίου	$\text{SiO}_2 \Rightarrow \text{Si} + \text{O}_2$	37.9	4065
Ανθρακικός σίδηρος	$\text{FeCO}_3 \Rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$	2.6	180
Υδροξείδιο του σιδήρου	$\text{Fe}(\text{OH})_2 \Rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	2.2	150
Θειικό ασβέστιο	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.4	89

Η αποθήκευση μέσω θερμο-χημικής ρόφησης περιλαμβάνει την αποθήκευση θερμότητας χρησιμοποιώντας τη για τη διάσπαση των δεσμών του νερού με μία σχετική ουσία (εκρόφηση), την εξάτμιση ενός από τα προϊόντα και τη συμπύκνωσή του για μεταγενέστερη χρήση. Η ανάκτηση της θερμότητας επιτυγχάνεται με την εξάτμιση του συμπυκνώματος και της ένωσής του με την ουσία (ρόφηση). Η διάσπαση του δεσμού (εκρόφηση) επομένως, αποτελεί ενδόθερμη αντίδραση, ενώ η αντίστροφη, δηλαδή η ρόφηση, εξώθερμη. Οι διεργασίες ρόφησης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες και περιλαμβάνουν τις διεργασίες της προσρόφησης, της απορρόφησης και τις αντιδράσεις στερεού/αερίου. Στην προσρόφηση, τα μόρια ή τα ιόντα μιας, συνήθως αέριας, ουσίας συσσωρεύονται στην επιφάνεια ενός στερεού προσροφητή χωρίς όμως τη δημιουργία νέου υλικού, ενώ κατά την απορρόφηση σχηματίζεται νέα χημική ένωση μεταξύ του απορροφητικού και του εργαζόμενου ρευστού. Ορισμένα πιθανά μοριακά ζεύγη θερμο-χημικής αποθήκευσης παρουσιάζονται στον Πιν. 1.4.

Ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα. Στα πρώτα, το αέριο εργαζόμενο μέσο διαφεύγει απευθείας στο περιβάλλον και ως εκ τούτου σε αυτά τα συστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο το νερό.

Παραδείγματα ανοιχτών συστημάτων αποτελούν συστήματα αφύγρανσης αέρα με ροφητικά μέσα και συστήματα αποθήκευσης θερμότητας με προσρόφηση. Στα κλειστά συστήματα το εργαζόμενο ρευστό ρέει εντός ενός κλειστού, απομονωμένου από την ατμόσφαιρα, κυκλώματος και η συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον γίνεται μέσω ενός εναλλάκτη. Σε αυτά ανήκουν κυρίως τα συστήματα προσρόφησης και απορρόφησης.

Πιν. 1.4 Αναγνωρισθέντα ζεύγη ρόφησης κατά το Έργο 32 του προγράμματος ΗΘΨ του ΔΟΕ [33]

Απορρόφηση	Προσρόφηση	Αντίδραση στερεού-αερίου
NH <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O: 0.40 GJ/kg	H <sub>2</sub> O-ζεόλιθος 4A :0.08 GJ/kg	H <sub>2</sub> O -Na <sub>2</sub> S: 1.27 GJ/kg
H <sub>2</sub> O-NaOH: 1.00 GJ/kg	H <sub>2</sub> O-silica gel: 0.14 GJ/kg	H <sub>2</sub> O -MgCl <sub>2</sub> : 0.84 GJ/kg
		H <sub>2</sub> O -CaCl <sub>2</sub> : 0.98 GJ/kg
		H <sub>2</sub> O -LiCl: 0.71 GJ/kg

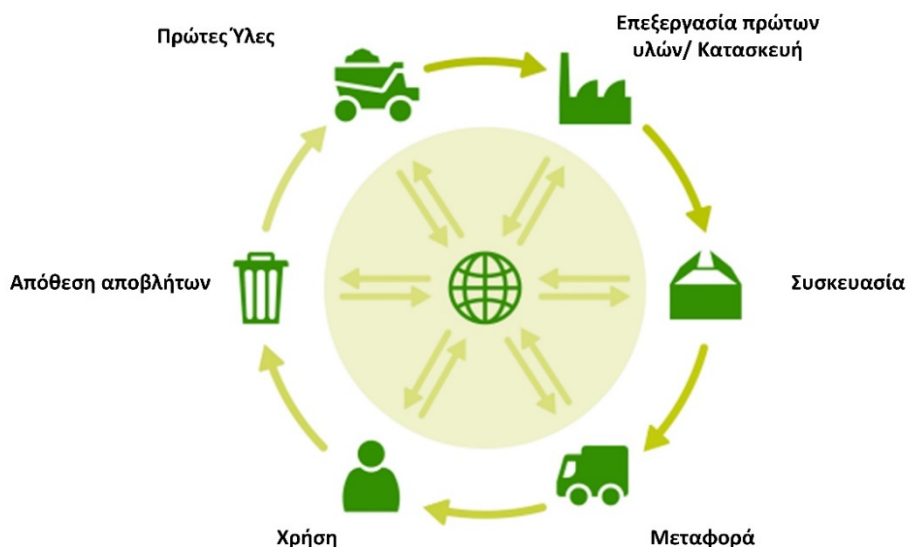
### 1.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) (Life Cycle Analysis – LCA) αποτελεί μία συστηματική και αναλυτική μεθοδολογία η οποία βοηθάει στην αναγνώριση, εκτίμηση και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, δηλαδή κάθε υλικού ή άυλου αγαθού, ή υπηρεσίας, κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής αυτού [34]. Επομένως, η ανάλυση περιλαμβάνει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, μέχρι την παραγωγή του προϊόντος, τη μεταφορά, τη χρήση, την επεξεργασία αυτού μετά το τέλος της ζωής του και την ανακύκλωση ή τελική απόθεση των αποβλήτων, ή όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία «από το λίκνο έως τον τάφο» (“from cradle-to-grave”).

Η AKZ, η οποία ως ιδέα έκανε την εμφάνισή της ήδη από τη δεκαετία του 1960 [35], έχει οριστεί από την Εταιρεία Τοξικολογίας και Χημείας Περιβάλλοντος (Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC) ως «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 ενός προϊόντος, καθώς βασίζεται στην ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων αυτού και επιτρέπει τη σύγκριση διαφόρων εναλλακτικών. Εφαρμόζεται σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως βιομηχανικές εφαρμογές, ενεργειακά συστήματα, συστήματα μεταφοράς, συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων κ.α. [37]. Παράλληλα, το σημαντικό αυτό εργαλείο δύναται να συμβάλει στη διαμόρφωση περιβαλλοντικών νόμων, στη βελτίωση των

προϊόντων, καθώς και να βοηθήσει τους καταναλωτές παρέχοντάς τους τις κατάλληλες πληροφορίες ώστε να επιλέξουν μεταξύ διαφορετικών προϊόντων [36].



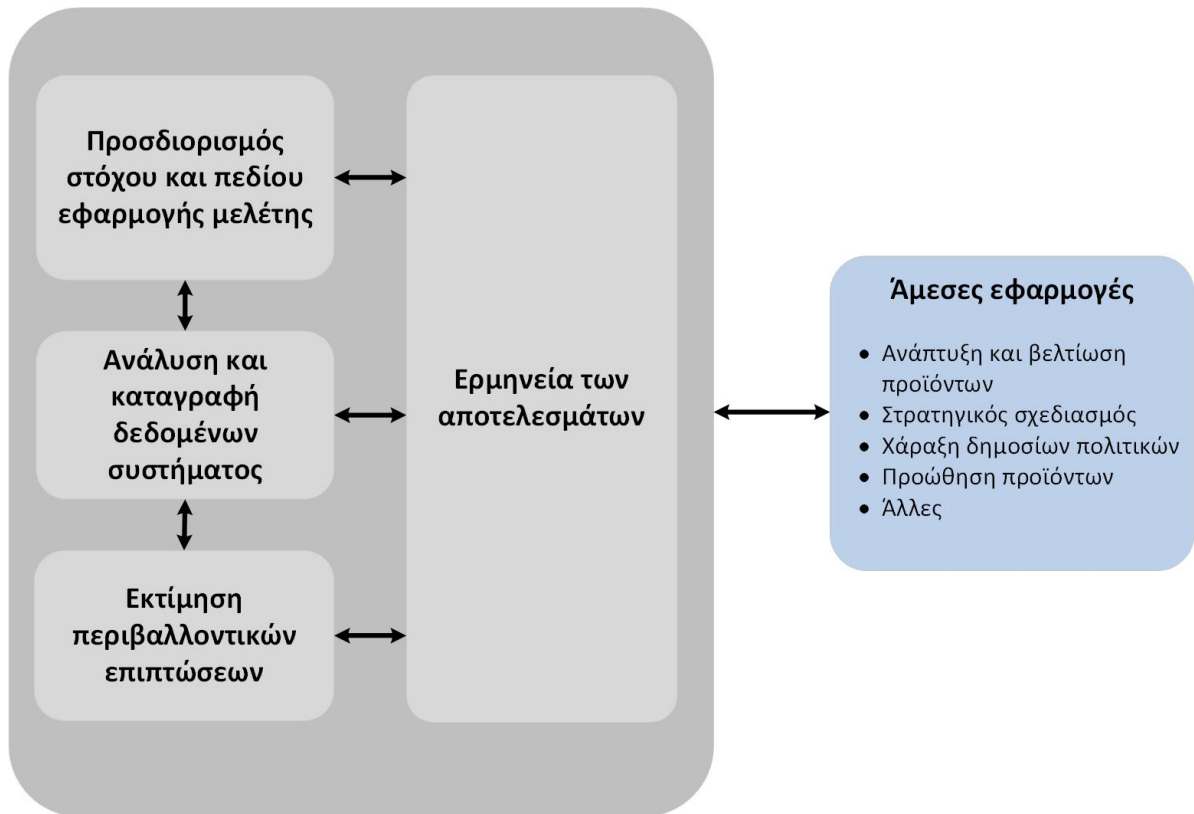
Εικ. 1.10 Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [38]

### 1.3.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η ανάγκη για συμφωνία σε κοινές αρχές για τον τρόπο διεξαγωγής μίας μελέτης ΑΚΖ και επομένως η αποφυγή αυθαιρεσιών από τους ερευνητές, οδήγησε το Διεθνή Οργανισμό Τυποποιήσεων (International Organization for Standardization – ISO) στην εισαγωγή μίας τυποποιημένης διαδικασίας για τη διεξαγωγή μελετών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με την εμφάνιση του πρώτου προτύπου ISO 14040 το 1997. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:2006 [34] και ISO 14044:2006 [39], κάθε μελέτη ΑΚΖ αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, τα οποία αναλύονται παρακάτω:

1. Προσδιορισμός του 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)

Τα παραπάνω στάδια καθώς και η μεταξύ τους συσχέτιση όπως και κάποιες άμεσες εφαρμογές των αποτελεσμάτων μίας μελέτης ΑΚΖ, παρουσιάζονται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικ. 1.11 Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [34]

Μία σημαντική πτυχή κάθε μελέτης ΑΚΖ, η οποία προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, είναι ότι πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία, όπως υποδηλώνεται από τα διπλά βέλη. Κάθε ένα από τα στάδια χρησιμοποιεί αποτελέσματα από τα υπόλοιπα. Επομένως, κανένα από αυτά δεν ολοκληρώνεται πλήρως προτού ολοκληρωθεί ολόκληρη η μελέτη.

#### 1. Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης

Ο προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης αποτελεί το πρώτο στάδιο μίας μελέτης ΑΚΖ. Σύμφωνα με το πρότυπο (ISO 14040), κατά τον προσδιορισμό του στόχου θα πρέπει να περιγράφεται ξεκάθαρα η προοριζόμενη εφαρμογή της μελέτης, οι λόγοι διεξαγωγής της, το κοινό στο οποίο απευθύνεται και ο τρόπος χρήσης των αποτελεσμάτων, δηλαδή εάν αυτά αφορούν συγκρίσεις οι οποίες πρόκειται να δημοσιοποιηθούν. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται το πεδίο εφαρμογής της μελέτης όπου καθορίζεται τι θα περιλαμβάνεται στη μελέτη καθώς και σημαντικές παράμετροι οι οποίες περιγράφουν τον τρόπο διεξαγωγής αυτής. Οι πιο σημαντικές εξ' αυτών είναι οι ακόλουθες:

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

Ένα σύστημα ορίζεται ως το σύνολο των διεργασιών που προσφέρουν μία ή περισσότερες λειτουργίες και το οποίο μοντελοποιεί τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος [34]. Η λειτουργία (function) αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, μία αντλία θερμότητας αποτελεί ένα σύστημα, η λειτουργία του οποίου είναι η κάλυψη των θερμικών και/ή των ψυκτικών φορτίων ενός χώρου. Ως διεργασίες (processes) ορίζονται όλες

οι δραστηριότητες οι οποίες μετατρέπουν τις εισόδους (υλικά, ενέργεια, άλλους πόρους) σε εξόδους (υλικά, ενέργεια, εκπομπές). Ο προσδιορισμός των ορίων του συστήματος περιλαμβάνει τον καθορισμό των διεργασιών, από το σύνολο αυτών, που συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα και αποτελούν μέρος της μελέτης. Επιπλέον, τα όρια του συστήματος πρέπει να καθοριστούν σε χρονικό και γεωγραφικό επίπεδο, δηλαδή να προσδιοριστεί η γεωγραφική περιοχή και ο χρονικός ορίζοντας που αφορά η μελέτη.

- **Λειτουργική μονάδα (functional unit)**

Η λειτουργική μονάδα αποτελεί βασική παράμετρο μίας μελέτης ΑΚΖ. Η λειτουργική μονάδα καθορίζει τις ποιοτικές πτυχές και ποσοτικοποιεί τις ποσοτικές πτυχές της λειτουργίας του υπό εξέταση συστήματος, συσχετίζοντας αυτή με τις εισόδους σε, και τις εξόδους από αυτό. Η σωστή επιλογή αυτής είναι σημαντική, καθώς επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο θα διεξαχθεί η μελέτη, τα αποτελέσματα και την ερμηνεία αυτών, ενώ σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να είναι σε συμφωνία με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Ειδικότερα, η σημασία της λειτουργικής μονάδας είναι αυξημένη στην περίπτωση όπου εξετάζονται διαφορετικά σενάρια μέσω της ΑΚΖ, καθώς θα πρέπει να διατηρείται σταθερή μεταξύ των σεναρίων, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι εκφρασμένα ως προς την ίδια κοινή βάση και να είναι δυνατή η σύγκρισή τους.

- **Διαδικασίες κατανομής (allocation procedures)**

Η κατανομή αφορά τον επιμερισμό του αντικτύπου τόσο των εισόδων όσο και των εξόδων μίας διεργασίας ανάμεσα σε διαφορετικά προϊόντα ενός συστήματος [39]. Σύμφωνα με το πρότυπο (ISO 14044) η κατανομή θα πρέπει να αποφεύγεται όπου είναι εφικτό, είτε διαιρώντας μία διεργασία σε δύο ή περισσότερες υπο-διεργασίες, είτε επεκτείνοντας τα όρια του συστήματος προκειμένου να συμπεριληφθούν λειτουργίες οι οποίες σχετίζονται με τα υπόλοιπα προϊόντα αυτού. Στην περίπτωση όπου η κατανομή δε μπορεί να αποφευχθεί, τότε αυτή θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζει τις υποκείμενες φυσικές (μάζα, όγκος, ενεργειακό περιεχόμενο) σχέσεις μεταξύ των προϊόντων ή των λειτουργιών του συστήματος. Τέλος, στην περίπτωση όπου ούτε αυτό είναι δυνατό, η κατανομή θα πρέπει να βασιστεί σε άλλες συσχετίσεις, όπως η οικονομική αξία των επιμέρους προϊόντων.

## **II. Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα**

Κατά το στάδιο της ανάλυσης και καταγραφής των δεδομένων πραγματοποιούνται η συλλογή των δεδομένων και οι υπολογισμοί για την ποσοτικοποίηση των εισόδων και των εξόδων όλων των διεργασιών που περιλαμβάνονται στο υπό εξέταση σύστημα, και κατ' επέκταση ολόκληρου του συστήματος σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Οι εισοδοί περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις σε πρώτες ύλες και ενέργεια ενώ οι έξοδοι εκπομπές στα ύδατα, το έδαφος και τον αέρα καθώς και άλλες εκπομπές. Ως αποτέλεσμα, παράγεται ένας κατάλογος απογραφής ο οποίος περιέχει όλους τους ρύπους που εκπέμπονται στο περιβάλλον και τα ποσά ενέργειας και πρώτων υλών τα οποία καταναλώνονται.

Το συγκεκριμένο στάδιο αποτελεί το πιο χρονοβόρο και κοστοβόρο στάδιο μίας μελέτης ΑΚΖ, ενώ πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία. Όσο περισσότερη γνώση αποκτάται για το

σύστημα που εξετάζεται, μπορεί να προκύψουν νέες απαιτήσεις σε δεδομένα ή νέοι περιορισμοί και ως εκ τούτου να απαιτούνται αλλαγές στον τρόπο συλλογής αυτών. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, σε κάθε περίπτωση όμως, ο κατάλογος απογραφής θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικός των προηγούμενων.

Τα αποτελέσματα αυτού του σταδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολλούς τρόπους, παρέχοντας μία πρώτη εκτίμηση των διεργασιών με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς και των περιοχών όπου μπορούν να υπάρξουν βελτιώσεις.

### **III. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων**

Το τρίτο στάδιο μίας μελέτης ΑΚΖ αποτελεί η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπου οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο μεταφράζονται σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο κατάλογος απογραφής που δημιουργήθηκε κατά το στάδιο της ανάλυσης και καταγραφής των δεδομένων ενώ περιέχει ποσοτικά δεδομένα για τη χρήση πόρων και τις εκπομπές του συστήματος, δεν παρέχει κάποια πληροφορία για τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτών.

Σκοπός αυτού του σταδίου, είναι η εκτίμηση του μεγέθους της συνεισφοράς κάθε εισόδου και εξόδου του συστήματος σε μία ή περισσότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, εξετάζοντας το σύστημα από μία περιβαλλοντική σκοπιά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μια σειράς βημάτων τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω, με κάποια από τα οποία, βάση προτύπου, να είναι υποχρεωτικά και κάποια προαιρετικά.

- **Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων, δεικτών και μοντέλων χαρακτηρισμού (Selection)**

Το πρώτο υποχρεωτικό βήμα του σταδίου της εκτίμησης των επιπτώσεων αποτελεί η επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων που θα περιλαμβάνει η μελέτη, σύμφωνα με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής αυτής, καθώς και των δεικτών τους και των μοντέλων χαρακτηρισμού. Σύμφωνα με το πρότυπο (ISO 14044) η επιλογή τους θα πρέπει να διασφαλίζει ότι αυτές δεν είναι περιττές οδηγώντας σε διπλή καταμέτρηση, ότι δεν παραλείπονται σημαντικές επιπτώσεις, καθώς επίσης θα πρέπει να είναι πλήρεις και να επιτρέπουν την ιχνηλασιμότητα.

- **Ταξινόμηση (Classification)**

Η ταξινόμηση αποτελεί το πρώτο ποσοτικό βήμα του σταδίου της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπου τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου ταξινομούνται σε μία ή περισσότερες σχετικές κατηγορίες, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις οποίες συνεισφέρουν. Για παράδειγμα, η εκπομπή CO<sub>2</sub> τοποθετείται στην κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Το βήμα αυτό απαιτεί σημαντικές γνώσεις σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις διαφόρων ουσιών και τυπικά πραγματοποιείται μέσω της επιλεγμένης μεθόδου εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

- **Χαρακτηρισμός (Characterization)**

Σε αυτό το βήμα, τα ταξινομημένα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου αξιολογούνται βάση του μεγέθους της συνεισφοράς τους σε μία κατηγορία επίπτωσης και ποσοτικοποιούνται εκφραζόμενα σε κοινές μονάδες. Για το σκοπό αυτό, εντός κάθε κατηγορίας, τα ταξινομημένα αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με επιστημονικά ορισμένους παράγοντες χαρακτηρισμού (characterization factors), οι οποίοι είναι γνωστοί και ως «παράγοντες ισοδυναμίας» (“equivalency factors”) [40], και στη συνέχεια αθροίζονται. Ως αποτέλεσμα προκύπτει ένας συγκεκριμένος δείκτης για κάθε κατηγορία.

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

Οι τιμές των δεικτών για διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων, όπως προέκυψαν από το βήμα του χαρακτηρισμού, είναι εκφρασμένες σε διαφορετικές μονάδες και επομένως δεν είναι δυνατή η συσχέτιση μεταξύ τους και ο προσδιορισμός του σχετικού μεγέθους αυτών. Με την κανονικοποίηση αξιολογείται το κατά πόσο ένας δείκτης έχει μεγάλη ή μικρή τιμή σε σχέση με μία τιμή αναφοράς, η οποία είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία, και επομένως καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών. Ένα παράδειγμα τιμών αναφοράς είναι η μέση ετήσια επίπτωση στο περιβάλλον ενός ευρωπαϊού πολίτη για μία συγκεκριμένη χρονιά. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν άμεσα μόνο εντός μία κατηγορίας επιπτώσεων, καθώς η τιμή που προκύπτει δεν παρέχει πληροφορία για τη σημαντικότητα κάθε δείκτη, και το οποίο αποτελεί θέμα στάθμισης (βλ. παρακάτω).

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

Η ομαδοποίηση αφορά την περαιτέρω ταξινόμηση των κατηγοριών επιπτώσεων σε ένα ή περισσότερα σύνολα, σύμφωνα με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε με την ταξινόμηση αυτών με βάση χαρακτηριστικά σχετιζόμενα με τις εκπομπές ή 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. Πρόκειται για μία υποκειμενική διαδικασία, καθώς βασίζεται σε συγκεκριμένες επιλογές για την εκτίμηση της προτεραιότητας των επιπτώσεων, και η οποία μπορεί να διαφέρει μεταξύ διαφόρων μελετών, ανάλογα με τις επιλογές του εκάστοτε μελετητή. 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 του συγκεκριμένου σταδίου και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βαρύτητας κάθε κατηγορίας επιπτώσεων. Η στάθμιση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κανονικοποιημένα αποτελέσματα και επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας αυτά με ένα συντελεστή ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε κατηγορία επιπτώσεων, ώστε να προκύψουν σταθμισμένα

αποτελέσματα/επιπτώσεις. 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 (σکور) περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι δεν υπάρχει επιστημονική βάση για αυτό το βήμα, επομένως διαφορετικοί συντελεστές στάθμισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οι οποίοι ορίζονται με διαφορετικό τρόπο. Όσον αφορά τη στάθμιση, το πρότυπο (ISO 14044) [39] 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.

#### **IV. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος**

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αποτελεί το τελευταίο στάδιο μία ΑΚΖ, όπου τα ευρήματα των υπόλοιπων σταδίων εκτιμώνται και αναλύονται περαιτέρω λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές αβεβαιότητες στα δεδομένα καθώς και τις υποθέσεις και τις προσεγγίσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια της μελέτης. Το αποτέλεσμα αυτού του σταδίου θα πρέπει να είναι συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης για το υπό εξέταση σύστημα. Παράλληλα, σε αυτό το στάδιο είναι σημαντική η επικύρωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, ώστε να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη στα συμπεράσματα της μελέτης. Αυτό περιλαμβάνει την εξέταση του 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), τον έλεγχο του τρόπου μεταβολής των αποτελεσμάτων όταν γίνουν αλλαγές σε ορισμένες παραμέτρους και μεθοδολογικές επιλογές των προηγούμενων σταδίων (ανάλυση ευαισθησίας-sensitivity check) και τον προσδιορισμό του εάν οι υποθέσεις, οι επιλεγμένες μέθοδοι και τα δεδομένα είναι σε συνοχή με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης (έλεγχος συνοχής-consistency check). Τέλος, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πρέπει να είναι κατανοητή, πλήρης και συνεπής, σε συμφωνία με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

##### **1.3.2 Βάσεις δεδομένων και λογισμικά**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το στάδιο της συλλογής των δεδομένων αποτελεί το πιο χρονοβόρο και απαιτητικό στάδιο της μελέτης, ενώ μπορεί να περιλαμβάνει έρευνα, επίσκεψη σε εργοστάσια και επικοινωνία με ειδικούς. Στην πραγματικότητα, η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων για όλες τις διεργασίες που περιλαμβάνει ένα σύστημα είναι πρακτικά αδύνατη, κυρίως λόγω του υπέρογκου κόστους που αυτό συνεπάγεται. Παράλληλα, σε πολλές βιομηχανίες δεν γίνεται ακριβής καταγραφή ούτε της πλήρους λίστας των υλικών που χρησιμοποιούνται αλλά ούτε και των επιμέρους ηλεκτρικών και θερμικών καταναλώσεων, λόγω του υψηλού κόστους μίας τέτοια καταγραφής. Αντίστοιχα, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και ο υπολογισμός των επιπτώσεων δε μπορεί να γίνει σε ένα απλό λογισμικό, όπως ένα υπολογιστικό φύλλο. Επομένως, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, συνήθως πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών και αναγνωρισμένων βάσεων δεδομένων, οι οποίες περιέχονται σε αυτά, καθώς και μέσω μιας σειράς παραδοχών, για τις οποίες θα γίνει ειδική αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.



Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η διεξαγωγή της μελέτης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του υπό εξέταση συστήματος πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού SimaPro v.9.1.1.1, ενώ ως πηγές δεδομένων χρησιμοποιούνται η βάση δεδομένων ecoinvent v.3.6 και η βιβλιογραφία.

Το λογισμικό SimaPro έχει αναπτυχθεί από την ολλανδική εταιρεία Pré Sustainability BV. Μέσω του λογισμικού δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει έτοιμα σεντ δεδομένων από κάποια βάση δεδομένων (π.χ. ecoinvent), ή και να δημιουργήσει δικά του, με την εισαγωγή διεργασιών σύμφωνα με δεδομένα που έχει συλλέξει ο ίδιος. Το λογισμικό SimaPro υποστηρίζει όλη τη διαδικασία μίας μελέτης AKZ, από τη δόμηση του καταλόγου απογραφής και τη μοντελοποίηση των δεδομένων έως την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για την τελευταία υπάρχει διαθέσιμη μία πληθώρα μεθόδων εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει είτε με γραφικό τρόπο, είτε σε μορφή πίνακα. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής αυτών (excel) για περαιτέρω επεξεργασία.

Η βάση δεδομένων της ecoinvent αποτελεί την πιο πλήρη και τεκμηριωμένη βάση δεδομένων για μελέτες AKZ. Πρόκειται για μία διεθνώς αναγνωρισμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο φάσμα περιβαλλοντικών μελετών, από πολυεθνικές εταιρείες έως κορυφαία πανεπιστήμια. Η έκδοση που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία έγινε διαθέσιμη το Σεπτέμβριο του 2019 και περιέχει περίπου 18000 επικαιροποιημένα σεντ δεδομένων σε κατηγορίες όπως η προμήθεια ενέργειας, οι μεταφορές, τα χημικά, τα μέταλλα και οι διαδικασίες επεξεργασίας αυτών και η επεξεργασία των αποβλήτων [41].

### **1.3.3 Η μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe 2016**

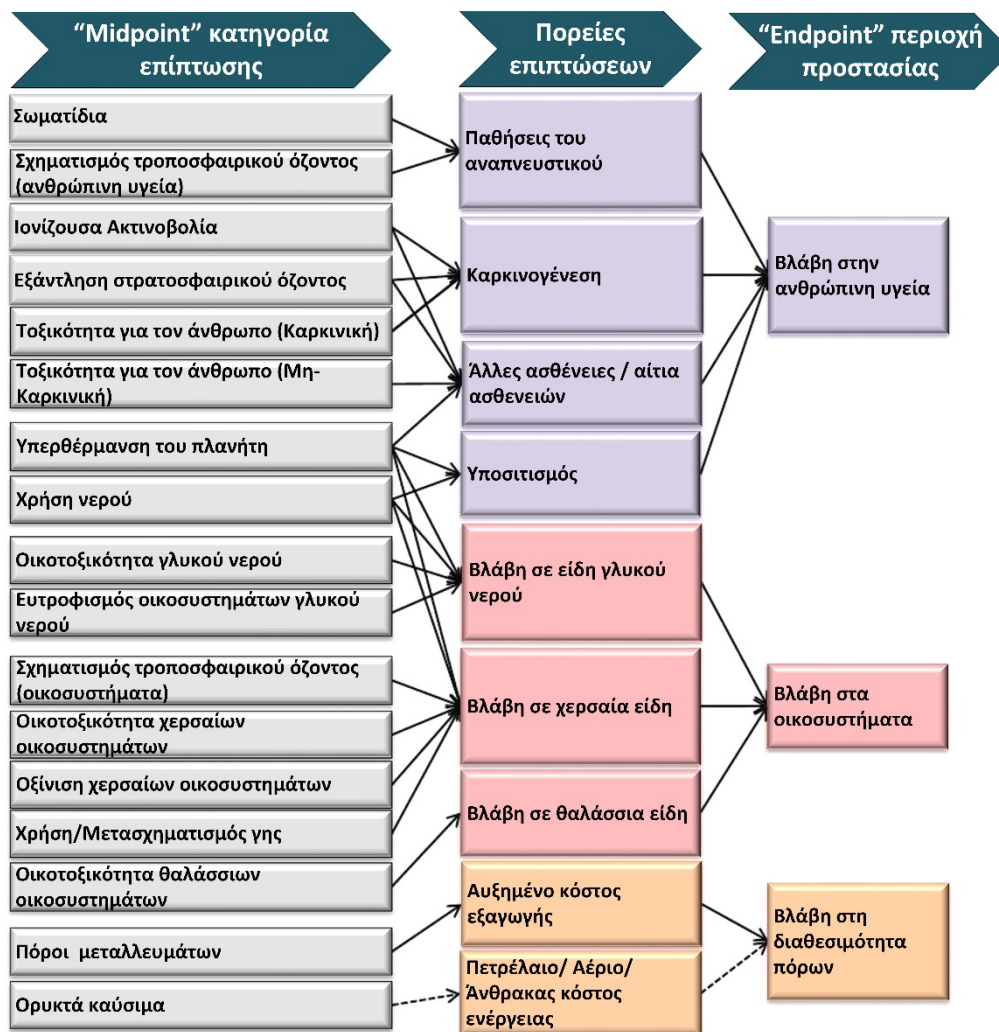
Η μέθοδος ReCiPe 2016 αποτελεί μία επικαιροποιημένη και εκτενέστερη εκδοχή του προκατόχου της (ReCiPe 2008), η ανάπτυξη της οποίας είναι προϊόν συνεργασίας μεταξύ του Ολλανδικού Βασιλικού Ινστιτούτου για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον (RIVM), του Πανεπιστημίου Ράντμπουντ του Ναϊμέχεν στην Ολλανδία (Radboud University), του Ινστιτούτου Περιβαλλοντικών Επιστημών (CML) του Πανεπιστημίου Λέιντεν στην Ολλανδία (Leiden University) και της εταιρείας Pré Sustainability BV. Όπως και η ReCiPe 2008, περιλαμβάνει τόσο “midpoint” όσο και “endpoint” κατηγορίες επιπτώσεων, καθώς αποτελεί το συνδυασμό δύο μεθόδων εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων: της “midpoint” προσανατολισμένης CML 2002 και της “endpoint” προσανατολισμένης Eco-Indicator 99 [42].

Σε επίπεδο “midpoint”, η μέθοδος περιλαμβάνει δεκαοκτώ (18) κατηγορίες επιπτώσεων (Πιν. 1.5), οι οποίες ορίζονται στο σημείο εκείνο στο οποίο υπεισέρχονται μηχανισμοί κοινού για αρκετά είδη ουσιών. Για παράδειγμα, η οξίνιση περιλαμβάνει μια ολόκληρη σειρά βημάτων, η οποία ξεκινά με την απελευθέρωση των όξινων ουσιών και τελειώνει με τις επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Σε κάποιο σημείο αυτής της πορείας (pathway), εντοπίζεται το σημείο, όπου οι ουσίες οξίνισης επιδρούν στον κορεσμό κατιόντων βάσης του εδάφους (BCS). Ανάλογα με την ουσία, ακολουθείται διαφορετική πορεία έως αυτό το σημείο, ωστόσο όλες έχουν την ίδια πορεία μετά από αυτό. Σε αυτό το επίπεδο, ο χαρακτηρισμός έχει πιο ισχυρή σχέση με τις περιβαλλοντικές ροές και σχετικά χαμηλή αβεβαιότητα.

Πιν. 1.5 Κατηγορίες επιπτώσεων σε επίπεδο “midpoint” της μεθόδου ReCiPe 2016 [43]

Κατηγορία επιπτώσεων	Όνομα κατηγορίας στη μέθοδο	Μονάδα – Παράγοντας χαρακτηρισμού
Κλιματική αλλαγή	Global warming	kg CO <sub>2</sub> στον αέρα
Εξάντληση του όζοντος	Stratospheric ozone depletion	kg CFC-11 στον αέρα
Ιονίζουσα ακτινοβολία	Ionizing Radiation	kBq Co-60 στον αέρα
Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος	Ozone formation, Human health Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO <sub>x</sub> στον αέρα
Σχηματισμός σωματιδίων	Fine particulate matter formation	kg PM <sub>2.5</sub> στον αέρα
Οξίνιση	Terrestrial acidification	kg SO <sub>2</sub> στον αέρα
Ευτροφισμός	Freshwater eutrophication	kg P στο γλυκό νερό
	Marine eutrophication	Kg N στο θαλασσινό νερό
Οικοτοξικότητα	Terrestrial ecotoxicity Freshwater ecotoxicity Marine ecotoxicity	kg 1,4- DCB
Τοξικότητα για τον άνθρωπο	Human carcinogenic Toxicity Human non-carcinogenic Toxicity	kg 1,4- DCB
Χρήση γης	Land use	m <sup>2</sup> (γης)×yr
Εξάντληση αβιοτικών πόρων	Fossil resource scarcity	kg oil
	Mineral resource scarcity	kg Cu
	Water consumption	m <sup>3</sup> νερού

Σε επίπεδο “endpoint”, οι περισσότερες από τις κατηγορίες επιπτώσεων του προηγούμενου επιπέδου, πολλαπλασιάζονται με κατάλληλους συντελεστές και αθροίζονται σε τρεις κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε περιοχές προστασίας οι οποίες αποτελούν τη βάση λήψης αποφάσεων στην πολιτική και την αειφόρο ανάπτυξη, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικ. 1.12. Η ReCiPe περιλαμβάνει τρεις περιοχές προστασίας: την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα των οικοσυστημάτων και την εξάντληση των πόρων, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω. Παρά το γεγονός ότι μέσω του χαρακτηρισμού στο επίπεδο “endpoint” παρέχεται καλύτερη πληροφόρηση σε σχέση με την περιβαλλοντική συνάφεια των περιβαλλοντικών ροών, παράλληλα παρουσιάζει μεγαλύτερη αβεβαιότητα [43].



Εικ. 1.12 Επισκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας [44]

### Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “endpoint” (Εκτίμηση βλαβών)

**Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία (Damage to Human Health – HH):** Η εκτίμηση της ζημίας στην ανθρώπινη υγεία γίνεται με τη χρήση της έννοιας των «αναπροσαρμοσμένων λόγω αναπηρίας ετών ζωής» (disability-adjusted life years – DALY). Τα DALY μιας νόσου προέρχονται από στατιστικά στοιχεία για την υγεία του ανθρώπου και αφορούν τόσο τα έτη που χάνονται όσο και αυτά που βιώνονται με αναπηρία. Η ζημία ενός (1) DALY ισοδυναμεί με «απώλεια ενός έτους από τη ζωή ενός ατόμου, ή τέσσερα έτη ζωής με αναπηρία η οποία έχει βαρύτητα 0.25» [45].

**Βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων (Damage to Ecosystem Diversity – ED):** Όσον αφορά την ποιότητα των οικοσυστημάτων, στη ReCiPe θεωρείται ότι αυτή εκφράζεται επαρκώς από την ποικιλία των ειδών [42]. Σύμφωνα με αυτό, η απώλεια (loss) ειδών σε μία συγκεκριμένη περιοχή (χερσαία ή υδάτινη) και σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα χρησιμοποιείται ως ο δείκτης της ζημίας στην ποιότητα των οικοσυστημάτων.

**Βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων (Damage to Resource Availability – RA):** Στη ReCiPe, η βλάβη στη διαθεσιμότητα των πόρων βασίζεται στη γεωλογική κατανομή των μεταλλευμάτων και των ορυκτών πόρων και στην αξιολόγηση του τρόπου μεταβολής του οριακού κόστους της εξόρυξης πόρων στο μέλλον (σε ένα απεριόριστο χρονικό πλαίσιο) ως αποτέλεσμα της συνεχούς εξόρυξης. Όσον αφορά τα μεταλλεύματα, η εξόρυξη συνεπάγεται υποβάθμιση της ποιότητας αυτών ενώ όσο αφορά τα ορυκτά καύσιμα, η εξόρυξη οδηγεί στην ανάγκη για εκμετάλλευση λιγότερο συμβατικών καυσίμων [42]. Το κόστος εκφράζεται σε δολάρια (USD2013), θεωρώντας προεξοφλητικό επιτόκιο 3%.

### Προοπτικές

Στη ReCiPe 2016, όπως και στις ReCiPe 2008 και Eco-Indicator 99, οι διαφορετικές πηγές αβεβαιότητας και οι διαφορετικές επιλογές ομαδοποιούνται σε ένα περιορισμένο αριθμό προοπτικών ή σεναρίων, σύμφωνα με την «Πολιτιστική Θεωρία» (“Cultural Theory”) του Thompson (1990) [46]. Ένα παράδειγμα μίας πηγής αβεβαιότητας αποτελούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των παραγόντων χαρακτηρισμού, καθώς αυτά αντικατοπτρίζουν τη μη ολοκληρωμένη και αβέβαιη γνώση των περιβαλλοντικών μηχανισμών που συμμετέχουν στην κλιματική αλλαγή, την οξίνιση και σε άλλες κατηγορίες επιπτώσεων.

Στη ReCiPe περιλαμβάνονται τρεις προοπτικές [43]:

- Η ατομικιστική (“individualist (I)”) προοπτική, η οποία βασίζεται στο βραχυπρόθεσμο ενδιαφέρον (20 χρόνια), σε αδιαμφισβήτητους τύπους επιπτώσεων 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 αποτελεί την 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.

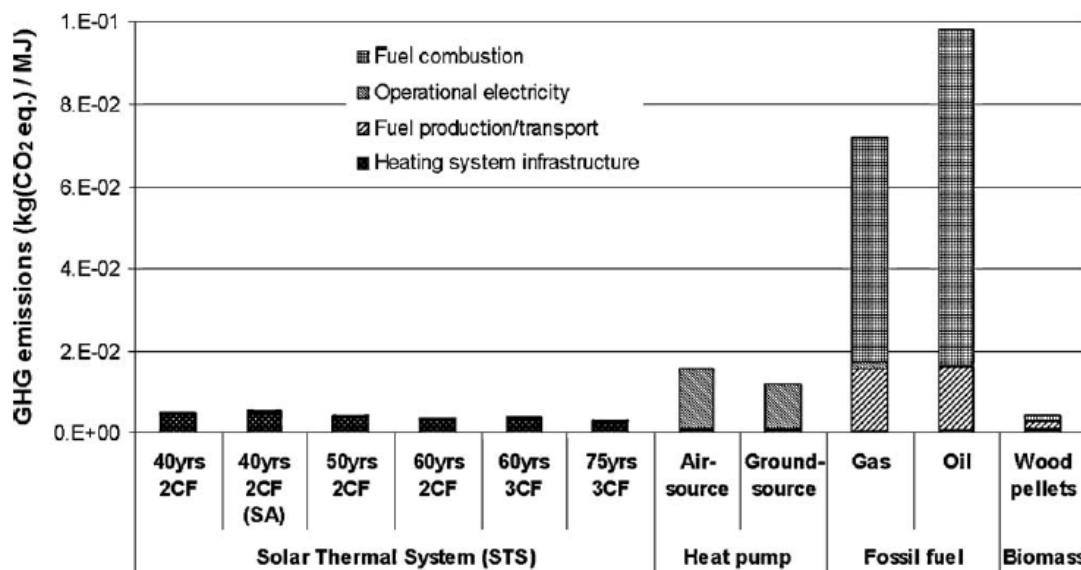
## **1.4 ΑΚΖ σε συστήματα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας**

Τα συστήματα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς μέσω της μεθοδολογίας της ΑΚΖ, ειδικά όσο αφορά διατάξεις οι οποίες περιλαμβάνουν θερμοχημικά υλικά, το οποίο ενισχύει τη σημασία και τη βαρύτητα της μελέτης που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι Bonamente και Aquino [47], διερεύνησαν την ενεργειακή απόδοση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις δύο καινοτόμων συστημάτων με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και αποθήκευση ενέργειας, για κλιματισμό σε εμπορικά κτήρια. Και στις δύο περιπτώσεις, η αποθήκευση τοποθετείται μεταξύ του γεωθερμικού εναλλάκτη και της αντλίας θερμότητας, η οποία είναι ισχύος ίσης με 17 kW. Η πρώτη διάταξη περιλαμβάνει αποθήκευση αισθητής θερμικής ενέργειας με μέσο αποθήκευσης το νερό (12 m<sup>3</sup>), ενώ το

δεύτερο ενσωματώνει αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, η οποία υλοποιείται με PCMs ( $1 \text{ m}^3$ ). Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ήταν  $1 \text{ kWh}$  θερμικής ενέργειας που παρέχεται από την αντλία θερμότητας στο σύστημα διανομής, ενώ η ανάλυση περιλάμβανε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την παραγωγή πρώτων υλών έως τις διεργασίες του τέλους κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα με το PCM είχε μικρότερο αντίκτυπο τόσο σε “midpoint” όσο και σε “endpoint” επίπεδο, παρουσιάζοντας μείωση κατά 16.6% των ισοδύναμων εκπομπών CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με το βασικό σενάριο (χωρίς αποθήκευση). Επιπλέον, διερευνήθηκε η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα με το νερό παρουσίασε το μικρότερο συνολικό αντίκτυπο (σε επίπεδο “endpoint”), ενώ το σύστημα με το PCM είχε χειρότερη απόδοση σε σχέση με το βασικό σενάριο, λόγω του υψηλού σχετικού αντίκτυπου του συστήματος αποθήκευσης.

Οι Simos και Firth [48], διεξήγαγαν μια ανάλυση κύκλου ζωής ενός ηλιοθερμικού συστήματος (Ηλιοθερμικό σύστημα – STS – Solar Thermal System), ικανού να επιτύχει 100% ηλιακό κλάσμα, για την κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης και θέρμανση χώρων σε μια πολυκατοικία χαμηλών ενεργειακών αναγκών οκτώ διαμερισμάτων, στην κεντρική Ελβετία. Το σύστημα αποτελούταν κυρίως από ένα δοχείο εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας το οποίο περιέχει νερό και το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών. Η περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος συγκρίθηκε επίσης με άλλες τεχνολογίες θέρμανσης. Για την ανάλυση ακολουθήθηκε μία “cradle-to-grave” προσέγγιση, ενώ η λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε ίση με  $1 \text{ MJ}$  παραγόμενης θερμικής ενέργειας. Λόγω της υψηλής αβεβαιότητας, εξετάστηκαν διαφορετικοί χρόνοι ζωής για τη δεξαμενή αποθήκευσης και τους ηλιακούς συλλέκτες. Τα αποτελέσματα έδειξαν μικρή διακύμανση μεταξύ των σεναρίων για τις κατηγορίες επιπτώσεων της αθροιστικής ζήτησης ενέργειας και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, όπου το σύστημα STS βρέθηκε ότι αποδίδει καλύτερα σε όλες τις περιπτώσεις, οδηγώντας σε μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως και 97% (Εικ. 1.13). Από την άλλη πλευρά, το σύστημα βρέθηκε ότι είναι γενικά πιο ευνοϊκό για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, όσον αφορά τις κατηγορίες της ποιότητας των οικοσυστημάτων, της ανθρώπινης υγείας και της χρήσης αβιοτικών πόρων. Στην τελευταία, το STS παρουσίασε 38 φορές μεγαλύτερο αντίκτυπο από τον αντίστοιχο του συστήματος θέρμανσης αερίου. Τέλος, η ανάλυση ανέδειξε τη σημαντική επίπτωση του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών στο συνολικό αντίκτυπο του συστήματος.

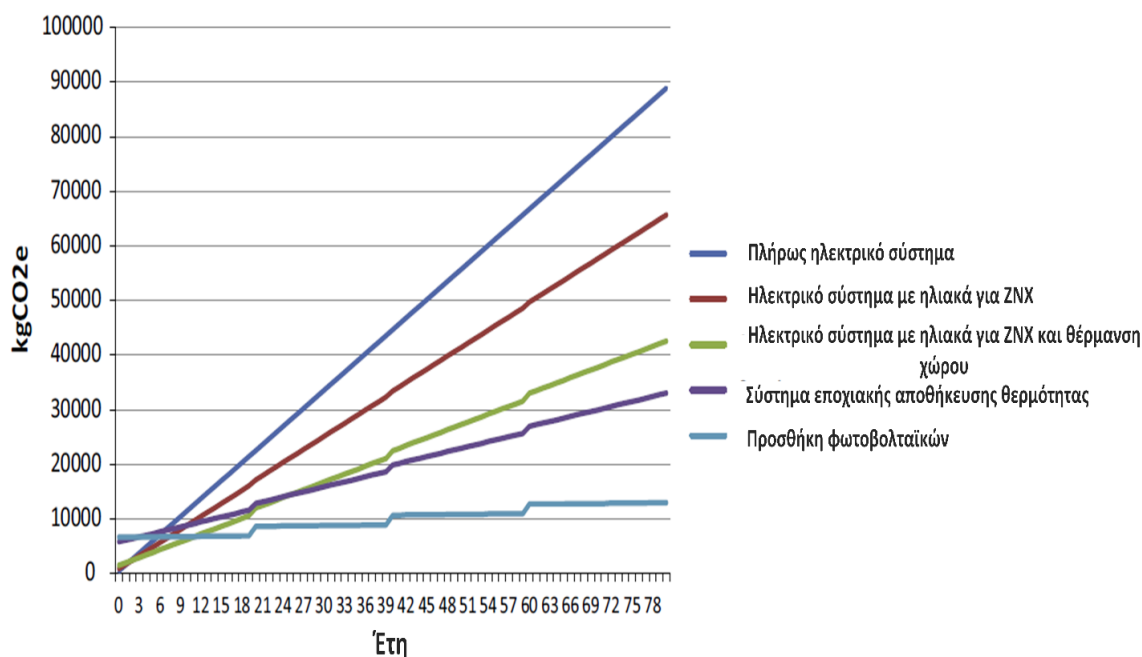


Εικ. 1.13 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής του κάθε συστήματος θέρμανσης [48]

Οι περιβαλλοντικές επιδόσεις ενός ηλιοθερμικού σταθμού με εποχιακή αποθήκευση διερευνήθηκαν από τους Raluy et al. [49] μέσω της μεθοδολογίας της AKZ. Ο σταθμός κάλυπτε τις απαιτήσεις για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης 500 κατοικιών (εμβαδού 100 m<sup>2</sup>) στην πόλη της Σαραγόσα στην Ισπανία, επιτυγχάνοντας παράλληλα ένα ηλιακό κλάσμα της τάξης του 69%. Για την διασφάλιση της κάλυψης των θερμικών φορτίων χρησιμοποιήθηκαν δύο βοηθητικοί λέβητες φυσικού αερίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση δεν έλαβε υπόψη την εγκατάσταση και συντήρηση του εξοπλισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν τον κυρίαρχο ρόλο του βοηθητικού συστήματος, το οποίο παρά την κάλυψη του 31% της ζήτησης για θέρμανση, ήταν υπεύθυνο για τις υψηλότερες εκπομπές ισοδύναμου CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-eq) (72%) λόγω της κατανάλωσης φυσικού αερίου. Παρά τα περιβαλλοντικά οφέλη του συστήματος, η μελέτη υπογραμμίζει παράλληλα τη σημαντική επιβάρυνση που σχετίζεται με τους ηλιακούς συλλέκτες, καθώς και την ανάγκη μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις αντλίες του συστήματος.

Οι Colclough και McGrath [50], ανέλυσαν τις ενεργειακές απαιτήσεις και την απόδοση όσο αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τον κύκλο ζωής ενός ηλιακού συστήματος παροχής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρου, με εποχιακή αποθήκευση θερμότητας. Για τη μελέτη θεωρήθηκε ένα κτήριο χαμηλών ενεργειακών αναγκών, ενώ εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές διατάξεις του συστήματος θέρμανσης, οι οποίες κυμαίνονταν από πλήρως ηλεκτρικές έως πλήρως ηλιακές. Επιπλέον, οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικούς χρόνους ζωής των συστημάτων. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, για οποιαδήποτε χρονική περίοδο η οποία υπερβαίνει τα 33 χρόνια, η πιο ευνοϊκή λύση αποδείχθηκε η πλήρως ηλιακή, η οποία αποτελούταν από το εξεταζόμενο σύστημα με την προσθήκη φωτοβολταϊκών για την κάλυψη των αναγκών του σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στη διάρκεια του κύκλου ζωής, το προτεινόμενο σύστημα βρέθηκε ότι δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση και για οποιαδήποτε διάρκεια ζωής την πιο ελκυστική επιλογή, ενώ συγκεκριμένα η διάταξη

αποθήκευσης θερμότητας παρουσίαζε υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια, η οποία επηρέαζε σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Εικ. 1.14).



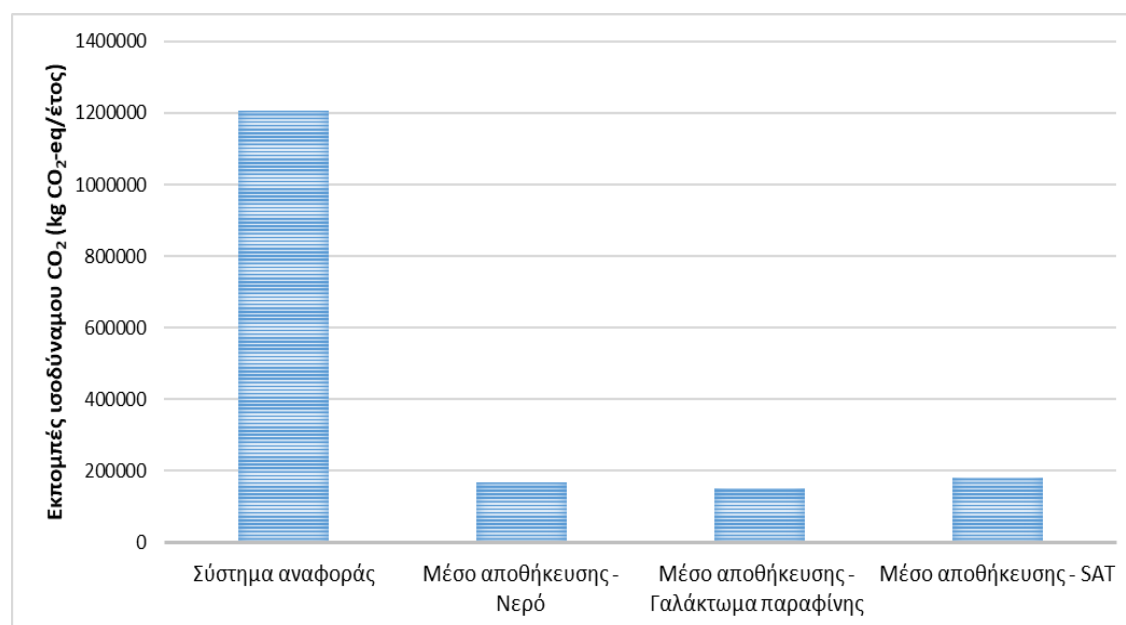
Εικ. 1.14 Συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ( $kg CO_2e$ ) κατά τη διάρκεια ζωής των υπό εξέταση συστημάτων [50]

Τα περιβαλλοντικά οφέλη των συστημάτων υπόγειας αποθήκευσης θερμότητας (UTES) παρουσιάστηκαν στη μελέτη των Tomasetta et al. [51]. Διερευνήθηκαν δύο διατάξεις, ένα σύστημα αποθήκευσης σε υδροφόρο ορίζοντα (ATES) και ένα σύστημα αποθήκευσης στο έδαφος (BTES), αποκλειστικά για την παροχή θέρμανσης. Και τα δύο συστήματα ενσωμάτωναν αντλία θερμότητας, ενώ η απόδοσή τους συγκρίθηκε με έναν συμβατικό λέβητα φυσικού αερίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το σύστημα UTES αποδείχθηκε πιο βιώσιμη λύση από το παραδοσιακό σύστημα, ενώ το σύστημα ATES παρουσίασε την καλύτερη απόδοση. Η μελέτη επεσήμανε επίσης τη σημαντική επίπτωση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού από τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, η οποία βασίζεται κυρίως σε ορυκτά καύσιμα. Όσον αφορά τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις, το σύστημα ATES παρουσίασε χαμηλότερη ζήτηση κατά 23% και 40% σε σχέση με το σύστημα BTES και το λέβητα φυσικού αερίου, αντίστοιχα. Ωστόσο, όπως αναφέρεται στη μελέτη, η μεθοδολογία της AKZ ήταν ακόμη ελλιπής όσον αφορά το υπέδαφος, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη όλες οι επιπτώσεις που σχετίζονται με την εγκατάσταση υπόγειων συστημάτων.

Οι Schuppler et al. [52], διεξήγαγαν μια τεchnο-οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση ενός συστήματος ATES, για την κάλυψη των φορτίων θέρμανσης και ψύξης ενός δημοτικού νοσοκομείου στην πόλη της Καρλσρούης στη Γερμανία. Το σύστημα ενσωμάτωνε αντλίες θερμότητας οι οποίες χρησιμοποιούνταν για θέρμανση, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων είναι αρκετά χαμηλή για την παροχή άμεσης ψύξης κατά το καλοκαίρι. Τα περιβαλλοντικά οφέλη του συστήματος ATES, προσδιορίστηκαν μέσω της σύγκρισης αυτού με ένα υπάρχον σύστημα, το οποίο αποτελούταν από δίκτυο τηλεθέρμανσης και ψύκτες μηχανικής συμπίεσης, με τα αποτελέσματα να υποδεικνύουν μέση μείωση εκπομπών  $CO_2$  ίση με 36%. Σε αυτό το σημείο,

πρέπει να αναφερθεί ότι ο αριθμός αυτός δεν λάμβανε υπόψη τις εκπομπές CO<sub>2</sub> οι οποίες σχετίζονταν με τις πηγές θερμότητας του δικτύου της τηλεθέρμανσης.

Οι Guillén-Lambea et al. [53], πραγματοποίησαν μια μελέτη AKZ προκειμένου να προσδιορίσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός συστήματος που βασίζεται στην εποχιακή αποθήκευση θερμότητας, με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων θέρμανσης, ζεστού νερού χρήσης και ψύξης ενός συγκροτήματος 500 κατοικιών (εμβαδού 100 m<sup>2</sup>) στη Σαραγόσα της Ισπανίας, συγκρίνοντάς το και με ένα συμβατικό σύστημα. Εξετάστηκαν τρία διαφορετικά μέσα αποθήκευσης, συγκεκριμένα (α) το νερό (αισθητή αποθήκευση), (β) γαλάκτωμα παραφίνης και (γ) τριένυδρο οξικό νάτριο (SAT) (PCM, λανθάνουσα αποθήκευση), ενώ όλες οι διατάξεις περιλάμβαναν μια αντλία θερμότητας με αντιστρεπτή λειτουργία και ένα φωτοβολταϊκό πεδίο. Το συμβατικό σύστημα αποτελούταν από λέβητες φυσικού αερίου και κλιματιστικές μονάδες (ac-split). Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι IPCC 2013 GWP 100y και ReCiPe Endpoint (H). Από τα αποτελέσματα, έγινε φανερό ότι το συμβατικό σύστημα παρουσίαζε τη χειρότερη απόδοση, και με τις δύο μεθόδους, κυρίως ως αποτέλεσμα της κατανάλωσης φυσικού αερίου. Όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η ενσωμάτωση του συστήματος αποθήκευσης οδήγησε σε μείωση τουλάχιστον κατά 85% αυτών, σε σχέση με το συμβατικό σύστημα, ενώ καλύτερη εναλλακτική αποδείχθηκε πως ήταν το σύστημα με την παραφίνη (Εικ. 1.15). Λαμβάνοντας υπόψη τους δείκτες βλαβών, η καλύτερη απόδοση παρουσιάστηκε από το σύστημα αποθήκευσης με νερό, κυρίως λόγω των αμελητέων επιπτώσεων του τελευταίου, ενώ τα αποτελέσματα για το SAT ήταν δυσμενή, επηρεαζόμενα σε μεγάλο βαθμό από τη σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση του χαλύβδινου δοχείου. Τέλος, η μελέτη επεσήμανε την ανάγκη μείωσης του αντίκτυπου της παραγωγής των υλικών αλλαγής φάσης (PCM), τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τον συνολικό αντίκτυπο.

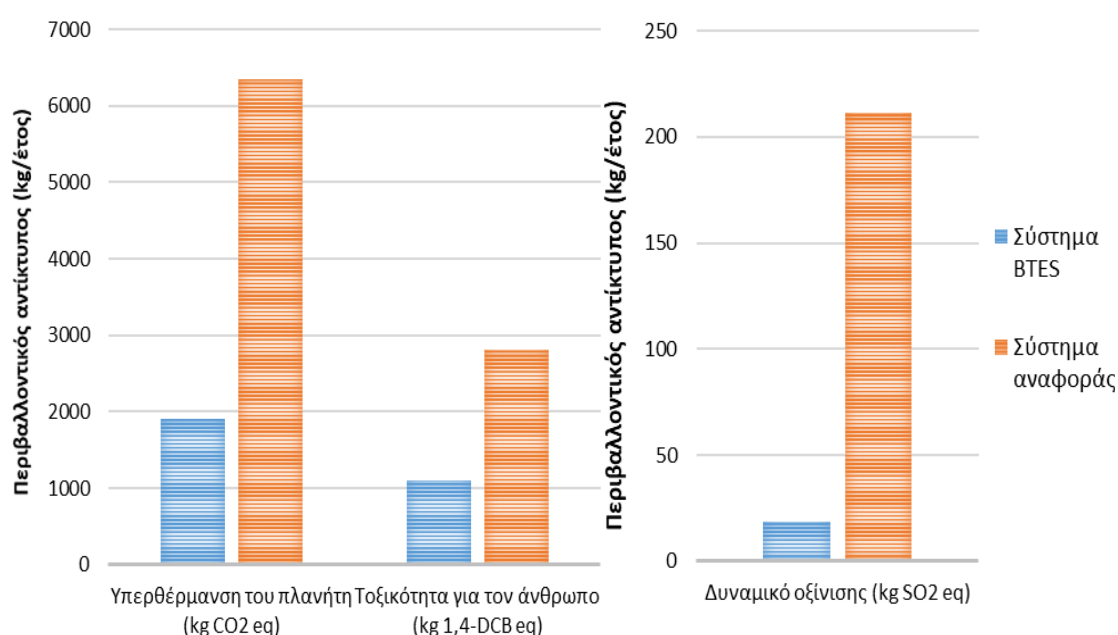


Εικ. 1.15 Ετήσιες ισοδύναμες εκπομπές CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>-eq) για κάθε υπό εξέταση διάταξη [53]

Οι Karasu και Dincer [54], αξιολόγησαν την περιβαλλοντική απόδοση ενός ηλιακού συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος (BTES), για την κάλυψη των



αναγκών θέρμανσης μία κοινότητας 52 κατοικιών στον Καναδά. Η ανάλυση ακολούθησε “cradle-to-grave” προσέγγιση, ενώ το σύστημα που διερευνήθηκε συγκρίθηκε με ένα συμβατικό, όπου η θέρμανση επιτυγχάνεται με τη χρήση φυσικού αερίου. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις υπολογίστηκαν με τη μέθοδο CML 2001 μέσω του λογισμικού SimaPro 7.3. Το σύστημα βρέθηκε να έχει καλύτερη απόδοση σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων που εξετάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την υπερθέρμανση του πλανήτη, επιτεύχθηκε μείωση περίπου 4.5 τόνων των ισοδύναμου εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά κατοικία και έτος, ενώ επεσήμανε τη σημαντική συμβολή της φάσης της χρήσης του συμβατικού συστήματος, λόγω της κατανάλωσης φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αντιστοιχούσε στο 83% του συνολικού αντίκτυπου. Όσον αφορά το δυναμικό οξίνισης, οι αντίστοιχες εκπομπές βρέθηκαν 11 φορές χαμηλότερες, με 18.69 kg SO<sub>2</sub>-eq σε σύγκριση με 211.25 kg SO<sub>2</sub>-eq του συμβατικού συστήματος ανά έτος και κατοικία, ενώ στην κατηγορία της τοξικότητας για τον άνθρωπο ο αντίκτυπος ήταν κατά 2.5 φορές χαμηλότερος.



Εικ. 1.16 Σύστημα BTES σε σύγκριση με το σύστημα αναφοράς για τις κατηγορίες της υπερθέρμανσης του πλανήτη, της τοξικότητας για τον άνθρωπο και του δυναμικού οξίνισης [54]

Οι Oro et al. [55], πραγματοποίησαν μια συγκριτική ανάλυση κύκλου ζωής τριών συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας για ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα εξεταζόμενα συστήματα περιλάμβαναν στερεά μέσα, τηγμένα άλατα και υλικά αλλαγής φάσης (PCM), ως μέσα αποθήκευσης. Λόγω των διαφορών μεταξύ των συστημάτων, η διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής θερμοκρασίας των διαφορετικών μέσων ορίστηκε ίση με σταθερές τιμές, σε αντίθεση με τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Το σύστημα στερεών μέσων βρέθηκε ότι είναι η πιο φιλική προς το περιβάλλον λύση ανά αποθηκευμένη kWh θερμικής ενέργειας, ενώ τα τηγμένα άλατα παρουσίασαν τη χειρότερη απόδοση, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος. Επιπλέον, όπως αναμενόταν από τους συγγραφείς, ο αντίκτυπος ανά kWh μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασιακής ανύψωσης των μέσων αποθήκευσης, καθώς αποθηκεύεται περισσότερη ενέργεια.

Οι Raiho et al. [56], διεξήγαγαν μία ενεργειακή ανάλυση και ανάλυση εκπομπών (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> και σωματίδια) ηλιακά υποβοηθούμενων συστημάτων με εποχιακή αποθήκευση θερμότητας για την κάλυψη των θερμικών αναγκών ενός οικισμού στο Ελσίνκι της Φινλανδίας, διερευνώντας επίσης την επίδραση της παραγωγής ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά. Θεωρήθηκε μία γεωθερμική αντλία θερμότητας (GSHP) με αποθήκευση θερμότητας στο έδαφος και ηλιακούς συλλέκτες, και ένα ηλιακά υποβοηθούμενο σύστημα τηλεθέρμανσης το οποίο ενσωμάτωνε μία δεξαμενή αποθήκευσης. Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψη δύο τύποι κτηρίων, δηλαδή ένα κτήριο αναφοράς του 2012 και ένα ηλιακά τροφοδοτούμενο κτήριο με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (SunZEB). Τα αποτελέσματα, για την εξαγωγή των οποίων λήφθηκε υπόψη μόνο η φάση της λειτουργίας, έδειξαν ότι το σύστημα με τη γεωθερμική αντλία θερμότητας οδηγούσε σε συνολικά χαμηλότερες εκπομπές στα SunZEBs σε σύγκριση με τα κτήρια αναφοράς, ενώ το δεύτερο σύστημα παρουσίασε υψηλότερες εκπομπές SO<sub>2</sub>. Συγκεκριμένα, επιτεύχθηκε μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> άνω του 50% και περίπου 40%, για τα κτήρια αναφοράς και SunZEB αντίστοιχα, με το σύστημα της αντλίας θερμότητας και το κατάλληλο μέγεθος ηλιακού πεδίου. Όσον αφορά την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών των κτηρίων με φωτοβολταϊκά πάνελ, διαπιστώθηκε η δυνατότητα μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως 17% για τα SunZEBs και έως 45% για το κτήριο του 2012.

## 1.5 Αντικείμενο μεταπτυχιακής διατριβής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων του υπό εξέταση καινοτόμου συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, μέσω της μεθοδολογίας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Πρωταρχικός στόχος της ανάλυσης, είναι η εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου του συστήματος, καθώς και η σύγκριση αυτού με συμβατικές λύσεις εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας. Για το σκοπό αυτό, αρχικά καθορίστηκαν δύο διαμορφώσεις του συστήματος, με τη μία να αντιστοιχεί στις χώρες της βόρειας και τη δεύτερη στις χώρες της κεντρικής Ευρώπης. Δεδομένου ότι η ανάλυση αφορά ένα καινοτόμο σύστημα, το οποίο αποτελείται από συνιστώσες, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των οποίων πραγματοποιήθηκε για πολλές εξ' αυτών παράλληλα με την εκπόνηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, ένας επιπλέον στόχος της μελέτης, είναι ο εντοπισμός των συνιστωσών εκείνων που συνεισφέρουν περισσότερο στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτού. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατή η εστίαση στη βελτιστοποίηση των «πιο επιβλαβών» συνιστωσών, καθώς και στα στάδια εκείνα του κύκλου ζωής του συστήματος, ώστε να βελτιωθεί η περιβαλλοντική απόδοση του τελικού εμπορικού προϊόντος.

Παράλληλα, στη συγκεκριμένη μελέτη, θα εξεταστεί η σύγκριση του προτεινόμενου συστήματος με ένα συμβατικό σύστημα αναφοράς, ενώ θα διερευνηθεί η επίδραση ορισμένων παραγόντων στην περιβαλλοντική απόδοση αυτού. Πιο συγκεκριμένα, θα υπολογιστεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του συστήματος για επιπλέον διαφορετικές τοποθεσίες εγκατάστασης, για μειωμένο συντελεστή κλίμακας, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μετάβαση από τις πρωτότυπες μονάδες στο τελικά εμπορικά διαθέσιμο σύστημα, καθώς και για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ορισμένων συνιστωσών αυτού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ένα καινοτόμο, ηλιακά τροφοδοτούμενο σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο βασίζεται σε ένα νέο προσροφητικό μέσο αποθήκευσης. Το σύστημα εστιάζει στις βορειοευρωπαϊκές χώρες με σκοπό την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης κτηρίων μικρής κλίμακας και υψηλής ενεργειακής απόδοσης, επιτυγχάνοντας ένα ελάχιστο ηλιακό κλάσμα ίσο με 60%, ενώ αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SWS-Heating. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι κύριες συνιστώσες του υπό εξέταση συστήματος, η διάταξη του οποίου μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης αυτού, όπως θα περιγραφεί και παρακάτω. Παράλληλα, παρουσιάζεται το σύστημα αναφοράς, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της περιβαλλοντικής απόδοσης του υπό εξέταση συστήματος. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι τα πλήρη χαρακτηριστικά του συστήματος SWS-Heating για όλες τις συνιστώσες αυτού δεν παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες, λόγω εμπιστευτικότητας.

### 2.1 Αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης

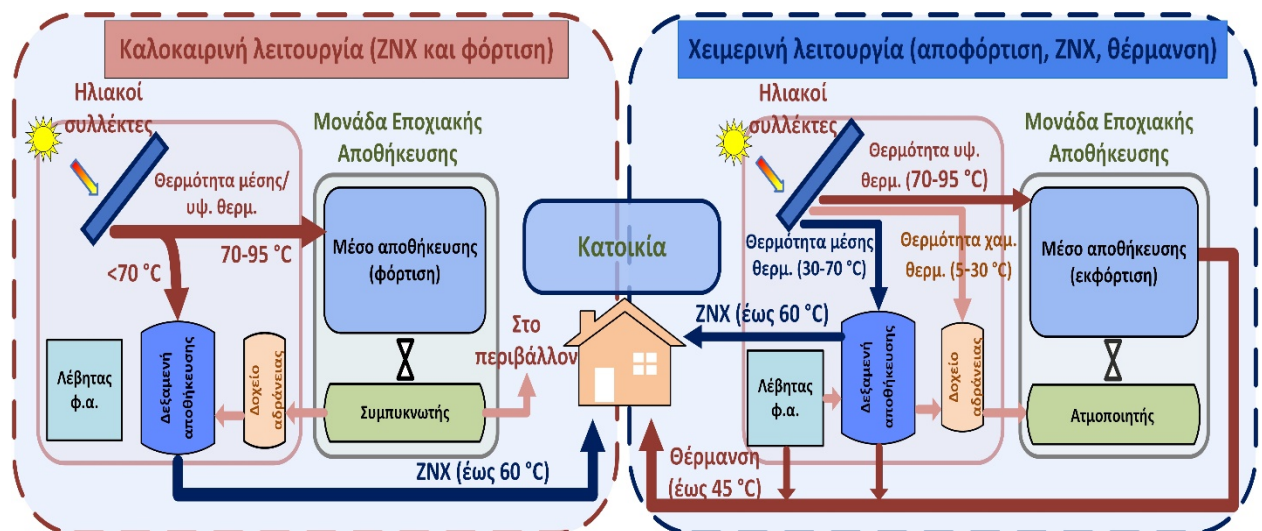
Η εγκατάσταση, μία σχηματική απεικόνιση της οποίας δίνεται στην Εικ. 2.1, αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

- Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας (SWS-STES unit)
- Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού (ETCs)
- Δεξαμενή αποθήκευσης (αισθητής) θερμότητας κενού (Vacuum Combi-Storage tank)
- Δοχείο αδράνειας (με υλικά αλλαγής φάσης) (PCM buffer tank)
- Εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου (Natural gas back-up boiler)

Η λειτουργία του συστήματος εναλλάσσεται ανάλογα με την εποχή, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Κατά το καλοκαίρι, η θερμότητα από τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών σε ΖΝΧ και για την φόρτιση των μονάδων εποχιακής αποθήκευσης. Πιο αναλυτικά, ένα μικρό ποσοστό την ηλιακής ενέργειας (θερμοκρασίας μικρότερης των 70°C) τροφοδοτεί το δοχείο αποθήκευσης το οποίο περιέχει νερό. Η υπόλοιπη θερμότητα ( $70\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta < 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) αποθηκεύεται στη μονάδα εποχιακής αποθήκευσης, αναγεννώντας το προσροφητικό υλικό, το οποίο βρίσκεται στη φάση της εκρόφησης όπου και απομακρύνεται το νερό το οποίο έχει προσροφηθεί στην επιφάνειά του. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το ηλιακό κλάσμα, η θερμότητα από τη συμπύκνωση του εκροφούμενου νερού ανακτάται μέσω του δοχείου αδράνειας, ενώ αν δεν απαιτείται άμεσα αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης (Εικ. 2.1). Τέλος, όταν και το δοχείο αδράνειας και η δεξαμενή αποθήκευσης είναι πλήρως φορτισμένα, το πλεόνασμα θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Κατά τη χειμερινή περίοδο, η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιείται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του κτηρίου. Η θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας την οποία παράγουν οι συλλέκτες (μεταξύ 5 °C και 30 °C) αποθηκεύεται στο δοχείο αδράνειας προκειμένου να υποστηρίξει τη διαδικασία παραγωγής υδρατμών για την αποφόρτιση του προσροφητικού μέσου. Η θερμότητα μέσης θερμοκρασίας (μεταξύ 30 °C και 70 °C) χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της δεξαμενής αποθήκευσης και την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και ΖΝΧ. Τέλος, αν υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 70 °C (κατά τις ηλιόλουστες μέρες), αυτή χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του προσροφητικού υλικού και τη μερική επαναφόρτιση τους συστήματος.

Κατά τις ενδιάμεσες περιόδους (άνοιξη και φθινόπωρο) η λειτουργία του συστήματος εξαρτάται κυρίως από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, κατά την άνοιξη, παρά το γεγονός ότι η παραγωγή των συλλεκτών είναι μέτρια, μπορεί συνήθως να καλύψει ένα μεγάλο μέρος της ζήτησης, αφού αποθηκευτεί στη δεξαμενή αποθήκευσης, είτε στο δοχείο αδράνειας, είτε ακόμη και στο προσροφητικό μέσο. Το φθινόπωρο, στην περίπτωση κατά την οποία δεν είναι δυνατή η πλήρης κάλυψη της ζήτησης μέσω των ηλιοθερμικών συλλεκτών, αυτή ικανοποιείται είτε μέσω των μονάδων εποχιακής αποθήκευσης, είτε μέσω της ενεργοποίησης του εφεδρικού λέβητα.



Εικ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του συστήματος κατά τις περιόδους του καλοκαιριού (αριστερά) και του χειμώνα (δεξιά)

## 2.2 Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης

Η διάταξη αποθήκευσης αποτελείται από ένα πλήθος μονάδων οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους για το σχηματισμό της τελικής διάταξης, η οποία θα περιλαμβάνει την ποσότητα του προσροφητικού υλικού που απαιτείται σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με τον τύπο του κτηρίου ή τις κλιματικές συνθήκες. Κάθε μονάδα αποτελείται από έναν πλακοειδή εναλλάκτη ο οποίος περιέχει το προσροφητικό υλικό (το οποίο βρίσκεται επικαλυμμένο σε μορφή «φίλμ» στις πλάκες του εναλλάκτη) και έναν αντίστοιχο πλακοειδή εναλλάκτη ο οποίος λειτουργεί ως ατμοποιητής ή συμπυκνωτής, ανάλογα με τη λειτουργία του συστήματος (Εικ. 2.1). Ανάμεσα στους δύο εναλλάκτες βρίσκεται μία βαλβίδα κενού η οποία τους συνδέει.

Το προσροφητικό υλικό ανήκει σε μία καινοτόμο κατηγορία υδατικών υλικών προσρόφησης (Εικ. 2.2) (γνωστά ως Selective Water Sorbents – SWSs), τα οποία εφευρέθηκαν από την εταιρεία BIC το 1996 [57, 58], ενώ πρόσφατες εξελίξεις υποδεικνύουν τη δυνατότητα χρήσης τους σε εφαρμογές εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας [59, 60]. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μία πορώδη μήτρα (όπως silica gel ή βερμικουλίτη) η οποία ενσωματώνει ένα υγροσκοπικό άλας. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μία υβριδική συμπεριφορά μεταξύ της φυσικής προσρόφησης στο υλικό της μήτρας και της χημικής προσρόφησης λόγω της αντίδρασης μεταξύ του νερού και του άλατος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αντιμετώπιση προβλημάτων και των δύο επιμέρους τεχνολογιών, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά kg μέσου. Η ακριβής σύνθεση του προσροφητικού υλικού που χρησιμοποιείται στο σύστημα SWS-Heating είναι εμπιστευτική και δεν παρουσιάζονται περαιτέρω πληροφορίες.



Εικ. 2.2 Προσροφητικό υλικό (SWS) βερμικουλίτη/LiCl ανεπτυγμένο από την εταιρεία BIC

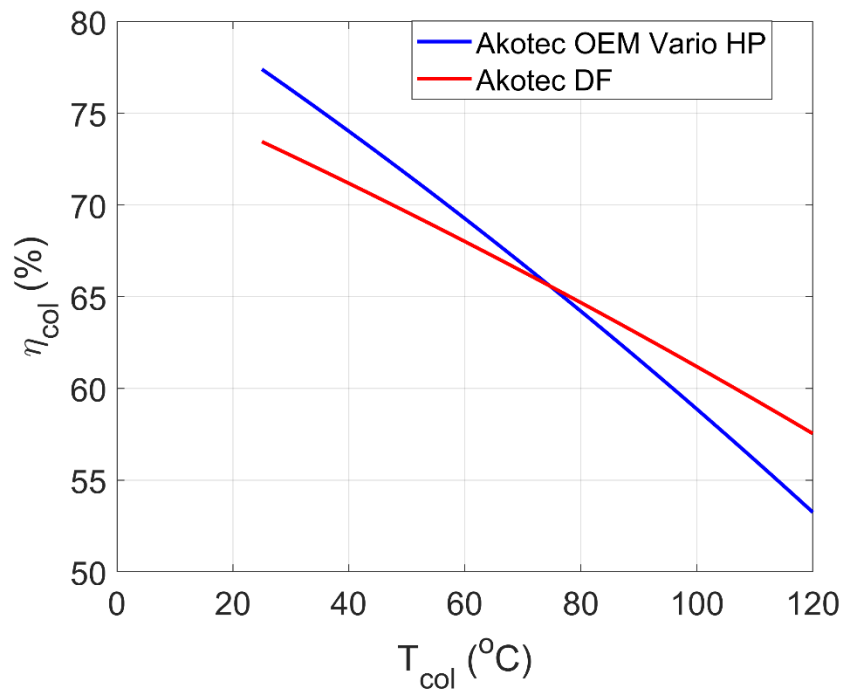
### 2.3 Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού

Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται στη διάταξη αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του έργου από την εταιρία Akotec GmbH [61]. Πρόκειται για συλλέκτες κενού άμεσης ροής ομοαξονικού τύπου, με κάποιες κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις ως προς την κοινή διάταξη των συλλεκτών του συγκεκριμένου τύπου. Το εργαζόμενο ρευστό, το οποίο αποτελεί ένα υψηλής απορροφητικότητας γαλάκτωμα νερού σκούρου χρώματος, εισέρχεται εντός ενός εσωτερικού σωλήνα και εξέρχεται, όντας θερμό, από έναν εξωτερικό σωλήνα, τοποθετημένο ομοαξονικά με τον πρώτο.

Στην Εικ. 2.3 παρουσιάζεται ένα τμήμα των συλλεκτών τους οποίους περιλαμβάνει το σύστημα, ενώ στην Εικ. 2.4 δίνεται ο βαθμός απόδοσης αντίστοιχων συλλεκτών κενού άμεσης ροής της εταιρίας Akotec (Akotec DF) σε σύγκριση με συλλέκτες θερμικού σωλήνα (Akotec HP). Είναι φανερό η πτώση της απόδοσης των συλλεκτών άμεσης ροής σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (< 80°C), όπως αυτές που απαιτούνται από το σύστημα SWS-Heating, παρατηρείται αύξηση της απόδοσης σε σύγκριση με τους συλλέκτες θερμικού σωλήνα, γεγονός το οποίο τους καθιστά κατάλληλους για την υπό εξέταση εφαρμογή.



Εικ. 2.3 Τμήμα του νέου ηλιακού συλλέκτη κενού του συστήματος SWS-Heating (δεξιά). Αριστερά απεικονίζεται ο εμπορικός συλλέκτης κενού OEM Vario 1000 της εταιρείας Akotec



Εικ. 2.4. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για διάφορους εμπορικούς συλλέκτες, για  $I=1000 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}C$ . DF: direct flow, HP: Heat Pipe [61]

## 2.4 Δεξαμενή αποθήκευσης (αισθητής) θερμότητας κενού

Η διάταξη περιλαμβάνει μία δεξαμενή αισθητής θερμότητας συνολικής χωρητικότητας 1000 lt, η οποία κατασκευάζεται από τη γερμανική εταιρεία Sirch GmbH & Co. [62]. Η δεξαμενή αποτελείται από ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό τοίχωμα, ενώ στον ενδιάμεσο χώρο, όπου βρίσκεται η μόνωση (διογκωμένος περλίτης), επικρατούν συνθήκες κενού. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Βασικός σκοπός της δεξαμενής, η οποία χρησιμοποιεί ως μέσο αποθήκευσης το νερό, είναι η παροχή ZNX (έως 60°C) καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και θερμότητας για θέρμανση του κτηρίου (έως 40°C) κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Παράλληλα, μπορεί να παρέχει θερμότητα στον ατμοποιητή της διάταξης αποθήκευσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα, στην περίπτωση κατά την οποία το δοχείο αδράνειας έχει αποφορτιστεί πλήρως. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η φόρτιση της δεξαμενής γίνεται μέσω των ηλιακών συλλεκτών με θερμότητα μέσης θερμοκρασίας (30 - 70°C). Μία απεικόνιση του πρωτοτύπου της δεξαμενής, χωρητικότητας 535 lt, δίνεται στην Εικ. 2.5, ενώ τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεντρώνονται στον Πιν. 2.1.



Εικ. 2.5 Απεικόνιση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού

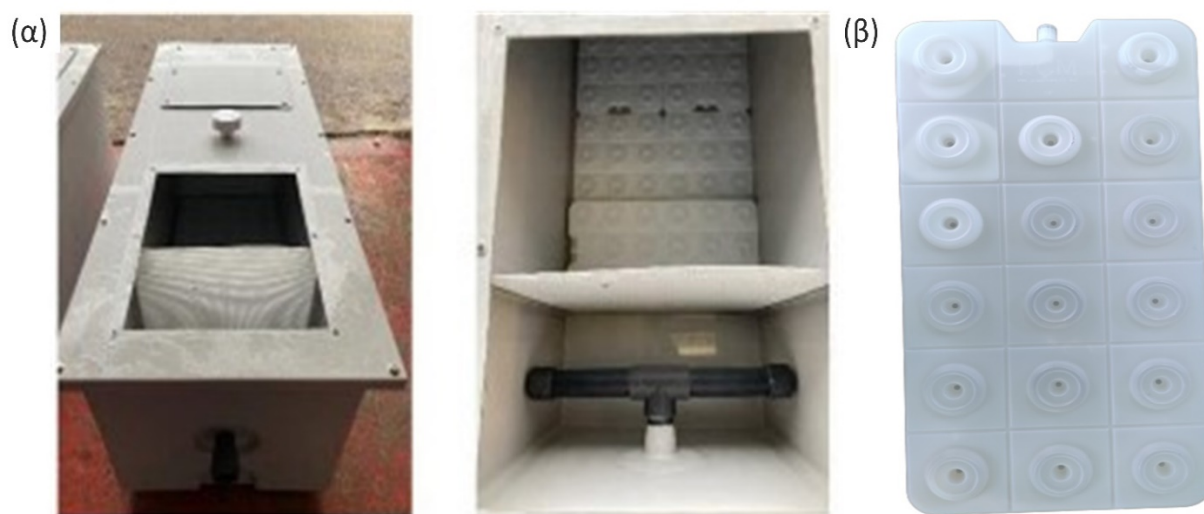


Πιν. 2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ονομαστική χωρητικότητα	535	lt
Μέγιστη πίεση λειτουργίας	3	bar
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	95	°C
Διαστάσεις (Υψος – Διάμετρος)	2555 - 1000	mm
Πάχος μόνωσης	175	mm

## 2.5 Δοχείο αδράνειας (με υλικά αλλαγής φάσης)

Το σύστημα ενσωματώνει επιπλέον ένα δοχείο αδράνειας το οποίο χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης για την αποθήκευση της θερμότητας. Το δοχείο, το οποίο κατασκευάζεται από τη βρετανική εταιρία PCM Products Ltd [63], έχει ως σκοπό την αποθήκευση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (έως 30°C) προκειμένου να εξασφαλίζει τη σταθερή λειτουργία της μονάδας αποθήκευσης αυξάνοντας τη θερμοκρασία του ατμοποιητή και επομένως ενισχύοντας την απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος. Το δοχείο είναι ορθογωνικού σχήματος, ενώ το υλικό αλλαγής φάσης βρίσκεται εντός πλαστικών συσκευασιών (πλακών) οι οποίες τοποθετούνται εντός του αυτού, Εικ. 2.6 (α). Οι πλάκες, Εικ. 2.6 (β), είναι στοιβαγμένες η μία πάνω στην άλλη, αφήνοντας ένα μικρό κενό μεταξύ τους, όπου ρέει το νερό μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά θερμότητας, ενώ παράλληλα παρέχει μία αρκετά μεγάλη επιφάνεια για την πραγματοποίηση αυτής.



Εικ. 2.6 Δοχείο αδράνειας με υλικά αλλαγής φάσης. (α) Λεπτομέρεια δοχείου όπου φαίνεται η τοποθέτηση των πλακών (β) πλαστική συσκευασία (πλάκα) όπου περιέχεται το υλικό αλλαγής φάσης

## 2.6 Εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου

Ο λέβητας φυσικού αερίου χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αιχμών του φορτίου κατά τις περιόδους που δεν υπάρχει αρκετή διαθέσιμη παραγωγή από το ηλιακό πεδίο ή τη διάταξη αποθήκευσης. Για το σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης κατά την περίοδο διεξαγωγής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο λέβητας φυσικού αερίου συμπύκνωσης “RIELLO residence 25 KIS e” [64]. Η επιλογή λέβητα συμπύκνωσης έγινε προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότερες αποδόσεις. Σε ένα λέβητα συμπύκνωσης, ανακτάται η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του υδρατμού στα καυσαέρια, η οποία σε κάθε άλλη περίπτωση θα απορριπτόταν στο περιβάλλον [65]. Μία απεικόνιση του λέβητα, από την εγκατάσταση αυτού στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π κατά τη φάση των δοκιμών, καθώς και ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού δίνονται στην Εικ. 2.7 και στον Πιν. 2.2 , αντίστοιχα.



Εικ. 2.7 Απεικόνιση του λέβητα φυσικού αερίου

Πιν. 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του λέβητα RIELLO residence 25 KIS e [64]

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ονομαστική θερμική ισχύς – ΖΝΧ/Θέρμανση χώρου	26.3/21.2	kW
Βαθμός απόδοσης (θερμότητα 80 – 60°C)	98.6	%
Διαστάσεις (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)	420 x 275 x 740	mm
Βάρος	35	kg

## 2.7 Κυκλοφορητές

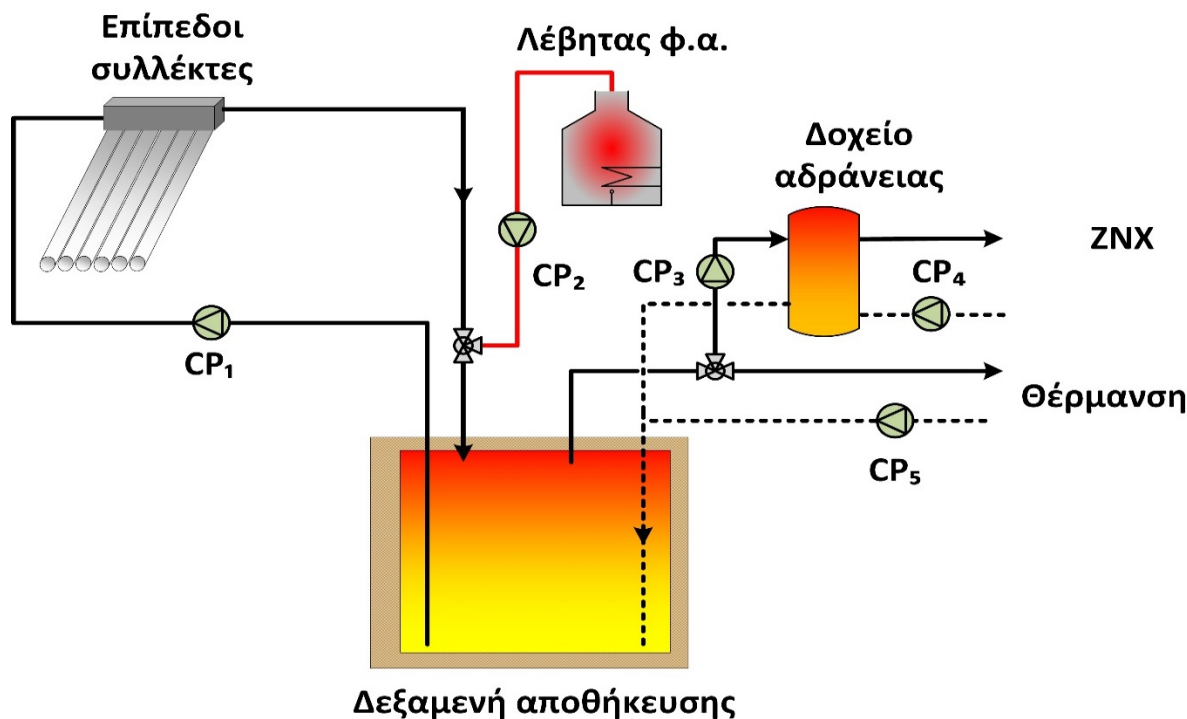
Για τη διακίνηση του εργαζόμενου ρευστού (νερού) μεταξύ των διαφόρων κυκλωμάτων και συνιστωσών του συστήματος, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι κυκλοφορητές. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκαν οι παρακάτω κυκλοφορητές [66, 67]:

- Κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών: Grundfos SOLAR PML 25-145 180
- Κύκλωμα δοχείου αποθήκευσης: Wilo Yonos MAXO 25/0,5-10
- Κυκλοφορητής ZNX: Grundfos ALPHA2 15-40 130
- Κυκλοφορητής λέβητα και κυκλώματος θέρμανσης: Grundfos UPS2 32-80 180

## 2.8 Σύστημα αναφοράς

Καθώς το υπό εξέταση σύστημα θέρμανσης είναι ένα σύστημα το οποίο βασίζεται στην εποχιακή αποθήκευση θερμότητας, επιλέχθηκε ως σύστημα αναφοράς για τη σύγκριση του περιβαλλοντικού αντικτύπου αυτού, ένα αντίστοιχο σύστημα υπόγειας δεξαμενής νερού. Συγκεκριμένα, το σύστημα αποτελείται από θαμμένη δεξαμενή νερού μεγάλης χωρητικότητας με χοντρά τοιχώματα για καλύτερες θερμομονωτικές ιδιότητες, ενώ η φόρτιση αυτής επιτυγχάνεται με τη χρήση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας επιλέχθηκε ως σύστημα αναφοράς, καθώς αποτελεί μία λύση η οποία εφαρμόζεται ήδη σε πολλές περιπτώσεις [68-70], κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους αυτής και του γεγονότος ότι οι απώλειες θερμότητας είναι ελάχιστες λόγω των χαμηλότερων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας του εδάφους και του χαμηλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του τοιχώματος της δεξαμενής και του εδάφους. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η θερμοκρασία της δεξαμενής υπερβαίνει μία συγκεκριμένη θερμοκρασία ρύθμισης, εισάγεται ένας εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου, ο οποίος παρέχει την υπόλοιπη θερμότητα που απαιτείται για τη θέρμανση του ανώτερου επιπέδου της δεξαμενής.

Επιπρόσθετα, για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας από την επιστροφή χαμηλής θερμοκρασίας του ZNX στη δεξαμενή, εισάγεται ένα δοχείο αδράνειας, για την αποθήκευση ενός μικρού κλάσματος της θερμότητας, για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών σε ZNX. Με βάση τα φορτία του υπό εξέταση κτηρίου, το δοχείο αδράνειας επιλέχθηκε να έχει χωρητικότητα 150 lt, μια κοινώς χρησιμοποιούμενη τιμή για κτήρια κατοικιών εμβαδού 100-200 m<sup>2</sup>. Μια επισκόπηση του εξεταζόμενου συστήματος αναφοράς φαίνεται στην Εικ. 2.8.



Εικ. 2.8 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος αναφοράς

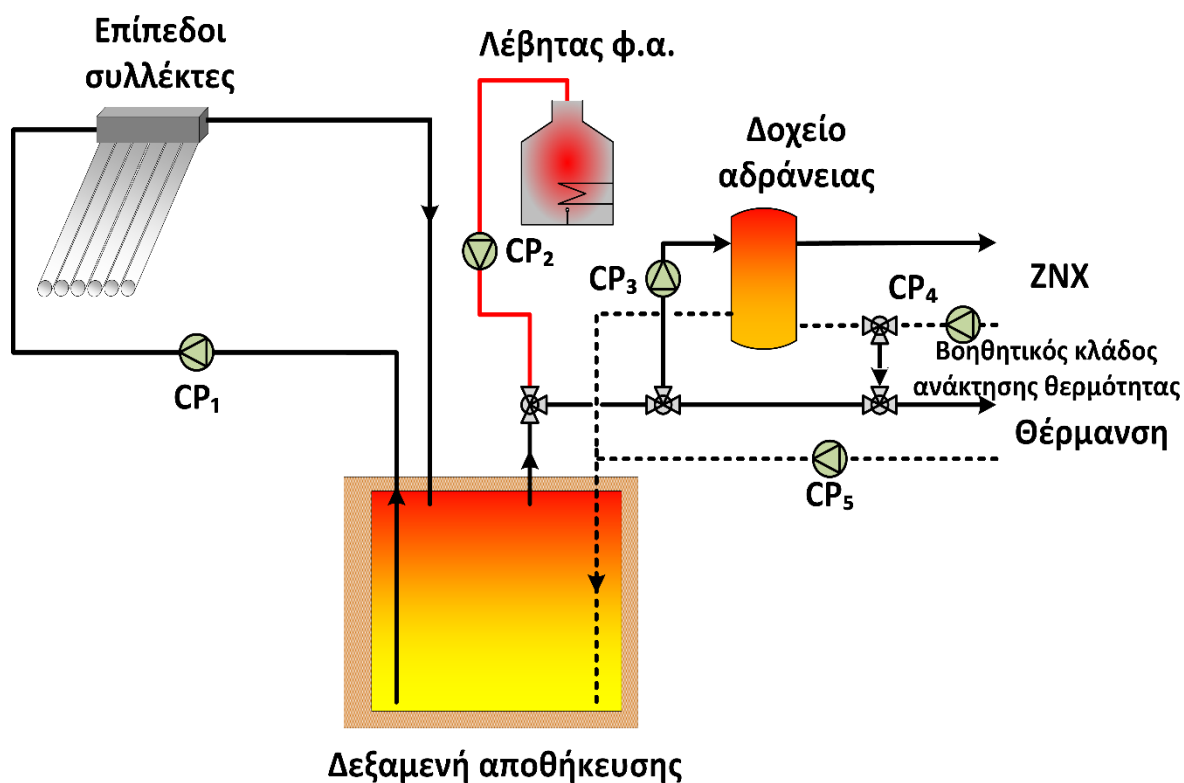
Όπως και στο υπό εξέταση σύστημα, έτσι και στο σύστημα αναφοράς, οι ηλιακοί συλλέκτες θερμαίνουν την δεξαμενή αποθήκευσης με τη συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια, ενώ ο εφεδρικός λέβητας διασφαλίζει ότι σε κάθε περίπτωση η κορυφή της δεξαμενής υπερβαίνει μία συγκεκριμένη ελάχιστη θερμοκρασία. Σε κάθε περίπτωση, όταν υπάρχει φορτίο, ZNX και/ή θέρμανσης, ενεργοποιούνται οι αντίστοιχοι κυκλοφορητές και επιτυγχάνουν την απαιτούμενη παροχή μάζας με βάση τα δεδομένα για τα φορτία. Οι κυκλοφορητές οι οποίοι έχουν θεωρηθεί για το σύστημα αναφοράς παρουσιάζονται στον Πιν. 2.3. Σημειώνεται ότι η λογική ελέγχου του συστήματος αναφοράς, ακολουθεί την μεθοδολογία ελέγχου του συστήματος SWS-heating, ώστε να υπάρχει η κατά το δυνατόν πιο αντικειμενική σύγκριση.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάζεται επιπλέον ένα δεύτερο σύστημα αναφοράς. Στην πραγματικότητα, η προαναφερθείσα προσέγγιση βρίσκεται σε συμφωνία με τις παραδοχές που έγιναν κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος SWS-Heating. Ωστόσο, τα εμπορικά συστήματα θα εφαρμόζαν μία βελτιστοποιημένη στρατηγική ελέγχου, αποφεύγοντας την εκτεταμένη χρήση του λέβητα φυσικού αερίου για την απευθείας θέρμανση της μεγάλης δεξαμενής αποθήκευσης. Επομένως, στο βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς (Εικ. 2.9) ο εφεδρικός λέβητας αποσυνδέεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης και συνδέεται απευθείας με το δοχείο αδράνειας και το κύκλωμα θέρμανσης. Με αυτόν τον τρόπο, η χρήση του λέβητα μειώνεται στο ελάχιστο, ενώ παρέχει το απαραίτητο ποσό θερμότητας για την επίτευξη των απαιτούμενων επιπέδων θερμοκρασίας για τα φορτία ZNX και θέρμανσης ανά ώρα. Επιπλέον, δεδομένου ότι η επιστροφή του ZNX είναι στους 55 °C και θερμοκρασία αναφοράς στους 38°C, εισάγεται ένας βοηθητικός κλάδος ανάκτησης θερμότητας για την κάλυψη πιθανών αναγκών θέρμανσης του νερού για τη θέρμανση με την επιστροφή του ZNX και

περαιτέρω μείωση της χρήσης του εφεδρικού λέβητα. Με αυτόν τον τρόπο, αναμένεται σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος, οδηγώντας επίσης σε βελτιωμένη περιβαλλοντική απόδοση. Όπως θα φανεί και στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 4) της παρούσας εργασίας, η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν ευνοεί το προτεινόμενο σύστημα θέρμανσης SWS-Heating, καθώς η λειτουργία του ταιριάζει περισσότερο σε σύστημα ηλιακής υποβοήθησης και όχι αποθήκευσης θερμότητας. Ωστόσο, χρησιμοποιείται προκειμένου να αναδειχθεί η δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος μόνο από τη φάση της χρήσης.

Πιν. 2.3 Επιλεγμένοι κυκλοφορητές για το σύστημα αναφοράς [66]

Κύκλωμα	Κυκλοφορητής
Κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών	Grundfos ALPHA SOLAR 15-75
Κύκλωμα θέρμανσης	Grundfos UPS2 32-80
Κύκλωμα ΖΝΧ	Grundfos ALPHA2 15-40
Παροχή ΖΝΧ προς δοχείο αδρανείας	Grundfos ALPHA2 15-40
Παροχή από λέβητα φ.α. προς δεξαμενή αποθήκευσης	Grundfos UPS2 32-80



Εικ. 2.9 Σχηματική απεικόνιση του βελτιστοποιημένου συστήματος αναφοράς

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΚΖ ΓΙΑ ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

### 3.1 Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης

#### 3.1.1 Στόχος της μελέτης

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός καινοτόμου συστήματος θέρμανσης και παροχής ζεστού νερού χρήσης, το οποίο στοχεύει σε κλίματα κυρίως της βόρειας, και κατ' επέκταση και της κεντρικής Ευρώπης, καθώς και ο εντοπισμός των συνιστωσών εκείνων του συστήματος, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, και των διεργασιών που έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτού.

Επιπλέον, αφού πραγματοποιηθεί η ΑΚΖ του υπό μελέτη συστήματος, μέρος του στόχου της μελέτης αποτελεί και η σύγκριση αυτού με μία συμβατική διάταξη εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και η οποία λειτουργεί ως σύστημα αναφοράς, προκειμένου να διαπιστωθεί και να ποσοτικοποιηθεί το πιθανό περιβαλλοντικό όφελος της προτεινόμενης διάταξης.

#### 3.1.2 Πεδίο εφαρμογής της μελέτης

##### I. Λειτουργία του συστήματος

Η κύρια λειτουργία του υπό εξέταση συστήματος, καθώς και του συστήματος αναφοράς, είναι, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η κάλυψη των φορτίων θέρμανσης και ΖΝΧ κτηρίων μικρής κλίμακας και υψηλής ενεργειακής απόδοσης, για τη διατήρηση συνθηκών άνεσης εντός αυτών. Επιπρόσθετα, τα δύο συστήματα θα πρέπει να επιτυγχάνουν ηλιακό κλάσμα τουλάχιστον ίσο με 60% σε ετήσια βάση.

##### II. Λειτουργική μονάδα

Η λειτουργική μονάδα η οποία επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη είναι ίση με «μία kWh παραγόμενης θερμικής ενέργειας (θέρμανσης και ΖΝΧ) από την υπό μελέτη διάταξη για την κάλυψη των φορτίων του κτηρίου και τη διατήρηση συνθηκών άνεσης εντός αυτής». Η επιλογή της παραπάνω λειτουργικής μονάδας είναι κοινή για συστήματα ψύξης και θέρμανσης [71], ενώ επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων τεχνολογιών θέρμανσης.

Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και με μία εναλλακτική λειτουργική μονάδα το «1 m<sup>2</sup> επιφάνειας του κτηρίου» προκειμένου να γίνει αναγωγή των αποτελεσμάτων και σε επίπεδο κτηρίου.

##### III. Μέθοδος κατανομής (Allocation method)

Μετά το τέλος της ζωής του υπό εξέταση συστήματος και γενικά ενός προϊόντος, ακολουθεί το στάδιο της διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει την ανακύκλωση ορισμένων, όπως των μετάλλων, καθώς και άλλες διαδικασίες επεξεργασίας όπως η καύση και η ταφή αυτών. Ωστόσο, οι διαδικασίες αυτές συνεπάγονται την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων. Τέτοια προϊόντα αποτελούν για παράδειγμα τα ανακτηθέντα μέταλλα από τη διαδικασία της ανακύκλωσης, η παραγωγή ηλεκτρισμού ή θερμότητας από την καύση απορριμμάτων κ.α. 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. Παράλληλα, εκτός από τα δευτερογενή προϊόντα διακρίνονται και τα παρα-προϊόντα ορισμένων διεργασιών, καθώς μία διεργασία μπορεί να έχει παραπάνω από μια εξόδους, με κάποια από αυτές να αποτελεί το κύριο προϊόν αυτής.

Για τη μοντελοποίηση του υπό εξέταση συστήματος επιλέχθηκε η προσέγγιση “cut-off” (της βάσης δεδομένων της ecoinvent). Σύμφωνα με αυτή, η αρχική παραγωγή ενός υλικού αποδίδεται πάντα στον πρώτο χρήστη αυτού, ενώ οι διεργασίες ανακύκλωσης των υλικών δε συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα. Ως αποτέλεσμα, τα περιβαλλοντικά οφέλη (όπως η αποφυγή εκ νέου εξόρυξης ή παραγωγής αυτού) τα οποία προκύπτουν από την 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 που σχετίζονται με τη συλλογή και τη μεταφορά αυτού στη μονάδα ανακύκλωσης, καθώς και με τις ίδιες τις διεργασίες 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, καθώς δεν αποδίδεται κάποιο περιβαλλοντικό όφελος στον παραγωγό των αποβλήτων. 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 είναι απαλλαγμένη από κάθε περιβαλλοντικό βάρος [41].

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι πρώτες ύλες στα σετ δεδομένων της ecoinvent και υπό την προσέγγιση “cut-off” αποτελούνται από μείγμα πρωταρχικών και ανακυκλωμένων υλικών, σε αντιπροσωπευτικά ποσοστά [72]. Παράλληλα, η κατανομή μεταξύ των προϊόντων και των παρα-προϊόντων γίνεται με κατάλληλους συντελεστές, οι οποίοι ορίζονται στα αντίστοιχα σετ δεδομένων της βάσης της ecoinvent.

#### IV. Το υπό εξέταση σύστημα και τα όρια του συστήματος

Στην παρούσα μελέτη, περιλαμβάνονται, ως βασικά σενάρια, δύο διατάξεις του συστήματος θέρμανσης και παροχής ζεστού νερού χρήσης SWS-Heating. Η πρώτη αντιστοιχεί σε κλίματα

χωρών της κεντρικής Ευρώπης και η δεύτερη σε κλίματα χωρών της βόρειας Ευρώπης. Η εγκατάσταση του συστήματος επομένως, θεωρείται στις πόλεις του Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και της Στοκχόλμης της Σουηδίας, οι οποίες επιλέγονται ως αντιπροσωπευτικές των χωρών της κεντρικής και της βόρειας Ευρώπης, αντίστοιχα. Τα συστήματα περιλαμβάνουν τις παρακάτω συνιστώσες, όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 2.

➤ Κεντρική Ευρώπη:

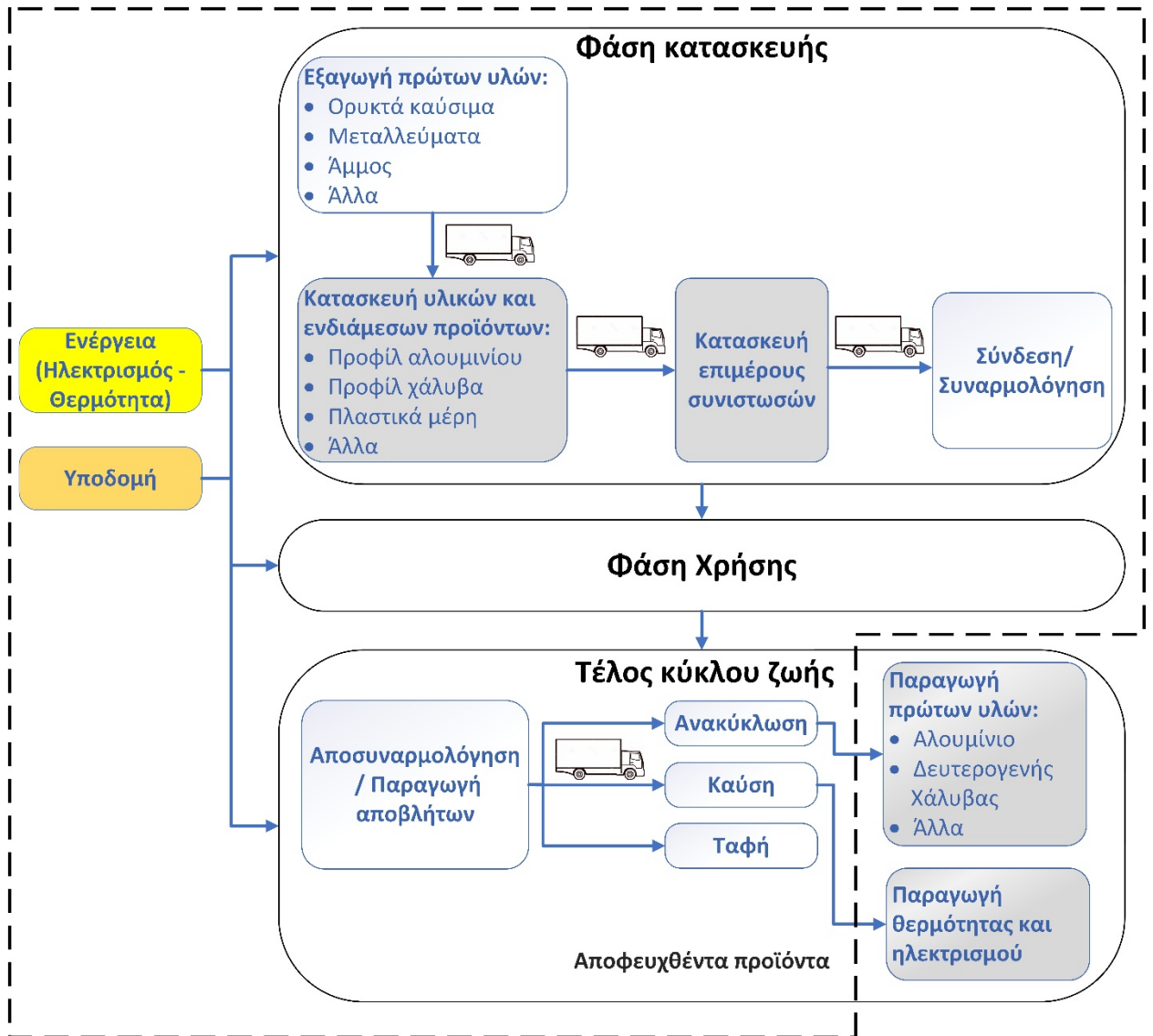
- Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης ( $\approx 2$  τόνοι προσροφητικού υλικού SWS)
- Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού
- Δεξαμενή αποθήκευσης
- Δοχείο αδράνειας
- Εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου

➤ Βόρεια Ευρώπη:

- Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης ( $\approx 4$  τόνοι προσροφητικού υλικού SWS)
- Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού
- Δεξαμενή αποθήκευσης
- Γεωθερμικός εναλλάκτης
- Εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου

Η μελέτη περιλαμβάνει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του υπό εξέταση συστήματος (ανάλυση “cradle-to-grave”) από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την επεξεργασία τους, την κατασκευή 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 όλων των αποβλήτων τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν, η ταφή και η αποτέφρωση των υπολοίπων αποβλήτων, όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη ενότητα. Στη μελέτη δε συμπεριλαμβάνονται το δίκτυο διανομής του ζεστού νερού στο κτήριο, καθώς θεωρείται κοινό για το υπό εξέταση σύστημα και το σύστημα αναφοράς, οι σωληνώσεις και τα παρελκόμενα (εκτός από τους κυκλοφορητές) που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των επιμέρους συνιστωσών τόσο του συστήματος SWS-Heating, όσο και του συστήματος αναφοράς, καθώς και ο γεωθερμικός εναλλάκτης, στην περίπτωση της διάταξης για τη βόρεια Ευρώπη, λόγω έλλειψης δεδομένων. Όσον αφορά τις σωληνώσεις, θεωρείται ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ του υπό εξέταση συστήματος και του συστήματος αναφοράς και επομένως η συγκεκριμένη συνιστώσα θεωρείται ότι δεν επηρεάζει αξιολογικά τα αποτελέσματα. Στην Εικ. 3.1, παρουσιάζεται σχηματικά η ροή των διεργασιών του υπό εξέταση συστήματος, ενώ με διακεκομμένη γραμμή επισημαίνονται τα όρια αυτού. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η παραγωγή προϊόντων από τις διαδικασίες που σχετίζονται με την επεξεργασία των αποβλήτων που προκύπτουν μετά το τέλος του κύκλου ζωής του συστήματος, και τα οποία θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν την παραγωγή πρωτογενών προϊόντων, όπως μέταλλα και καύσιμα για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, δε συμπεριλαμβάνονται στα όρια του συστήματος.





Εικ. 3.1 Όρια (διακεκομμένη μαύρη γραμμή) και διάγραμμα ροής των διεργασιών του υπό εξέταση συστήματος

Ως προς τα γεωγραφικά όρια του υπό μελέτη συστήματος ισχύουν τα παρακάτω: η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης, οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού και το δοχείο αποθήκευσης κατασκευάζονται στη Γερμανία, με κάποια επιμέρους εξαρτήματα να προέρχονται από άλλες ευρωπαϊκές χώρες, το προσροφητικό υλικό και ο εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου στην Ιταλία, και το δοχείο αδράνειας με τα υλικά αλλαγής φάσης στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η τελική σύνδεση των επιμέρους συνιστωσών γίνεται στην τοποθεσία εγκατάστασης της διάταξης. Ωστόσο, καθώς η προέλευση των πρώτων υλών για την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών δεν είναι γνωστή, έχουν χρησιμοποιηθεί όπου είναι δυνατό δεδομένα αντιπροσωπευτικά για την εκάστοτε χώρα, ενώ για τα υπόλοιπα έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα αντιπροσωπευτικά για την παγκόσμια αγορά. Η πλειοψηφία των κατεργασιών των υλικών και των διεργασιών για την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε ευρωπαϊκές χώρες.

Αντίστοιχα, όλες οι συνιστώσες του συστήματος αναφοράς έχει θεωρηθεί ότι κατασκευάζονται επί ευρωπαϊκού εδάφους.

Όσον αφορά τα χρονικά όρια του συστήματος, η διάρκεια ζωής του συστήματος SWS-Heating είναι ίση με είκοσι (20) έτη, τα οποία αποτελούν και το χρονικό ορίζοντα της μελέτης, ενώ η λειτουργία τους εξετάζεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και συγκεκριμένα για την κάλυψη των φορτίων θέρμανσης το χειμώνα και για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης σε ετήσια βάση.

#### V. Απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων

Η προέλευση των δεδομένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της μελέτης περιλαμβάνει τις παρακάτω πηγές.

Τα δεδομένα που αφορούν τις τεχνικές προδιαγραφές καθώς και την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος παρέχονται από τους συνεργαζόμενους κατασκευαστές αυτών μέσω κατάλληλων ερωτηματολογίων και επικοινωνίας με τις εταιρείες. Στην περίπτωση όπου υπήρχαν ελλείψεις στα παρεχόμενα δεδομένα, πραγματοποιήθηκαν προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία και τη βάση δεδομένων της ecoinvent καθώς και προσωπικές εκτιμήσεις. Αντίστοιχα, η πλειοψηφία των δεδομένων για το σύστημα αναφοράς παρέχονται από το ΚΑΠΕ [69], ενώ η διαστασιολόγηση του συστήματος για κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλου κώδικα στη Matlab.

Η μοντελοποίηση των συλλεχθέντων, από τις διάφορες πηγές δεδομένων, όπως για παράδειγμα οι πρώτες ύλες, οι κατεργασίες αυτών, ή οι ενεργειακές καταναλώσεις, πραγματοποιείται με τη βάση δεδομένων της ecoinvent v3.6. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, η ecoinvent, αποτελεί 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 και θεωρήσεις, ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διάταξης.

#### VI. Επιλογή μεθόδου εκτίμησης επιπτώσεων

Στην παρούσα μελέτη για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, έχουν επιλεγθεί να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι ReCiPe 2016 Midpoint v.1.04 και η ReCiPe 2016 Endpoint v.1.04 υπό την ιεραρχική προοπτική (Hierarchist, H). Επομένως, η μελέτη περιλαμβάνει όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων που περιέχουν οι δύο μέθοδοι, τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε επίπεδο “endpoint”. Περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο ReCiPe μπορούν να βρεθούν στην ενότητα 1.3.3, όπου παρουσιάζεται αναλυτικά.

### 3.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα

Το συγκεκριμένο στάδιο της μελέτης αποτελεί το πιο χρονοβόρο κομμάτι αυτής, κυρίως λόγω της ανάγκης παροχής δεδομένων από τους διάφορους κατασκευαστές και της εκτενούς βιβλιογραφικής έρευνας για την κάλυψη κενών στα παρεχόμενα δεδομένα.

Η δόμηση του καταλόγου απογραφής για το σύστημα γίνεται 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. Μετά τον προσδιορισμό όλων των διεργασιών που σχετίζονται με τις φάσεις αυτές, δηλαδή αφού προσδιορισθούν οι απαιτήσεις σε πρώτες ύλες, οι διαδικασίες μετασχηματισμού αυτών, οι απαιτήσεις σε ενέργεια, οι αποστάσεις μεταφοράς των συνιστωσών του συστήματος και τέλος οι διαδικασίες που σχετίζονται με την επεξεργασία των αποβλήτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής της διάταξης (ανακύκλωση, ταφή, καύση), ακολουθεί η μοντελοποίηση αυτών με τη βάση δεδομένων της ecoinvent, είτε με την επιλογή υπαρχόντων σετ δεδομένων, είτε με τη δημιουργία νέων.

Κατά την παραπάνω διαδικασία, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 1.3), θεωρητικά πρέπει να γίνει πλήρης καταγραφή όλων των εισόδων και των εξόδων στο υπό εξέταση σύστημα σε όλο τον κύκλο ζωής αυτού, δηλαδή όλων των πρώτων υλών, της ενέργειας, των εκπομπών κ.α.. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή δεν είναι πρακτικά εφικτή, ενώ 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 στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ πιο συγκεκριμένες παραδοχές για τα διαφορετικά στάδια της AKZ του συστήματος θα παρουσιαστούν στις αντίστοιχες υπο-ενότητες:

- 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, για τη μοντελοποίηση ορισμένων υλικών καθώς και των κατεργασιών αυτών, χρησιμοποιήθηκε το πιο συναφές προς αυτά υλικό ή κατεργασία από τη βάση δεδομένων της ecoinvent. Επιπλέον, όπου κρίθηκε απαραίτητο, τα σετ δεδομένων της ecoinvent τροποποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά των παρεχόμενων από τους κατασκευαστές δεδομένων. Όσον αφορά την προέλευση των πρώτων υλών, για όσες υπήρχαν πληροφορίες έχουν χρησιμοποιηθεί τα αντίστοιχα πιο αντιπροσωπευτικά σετ δεδομένων, ενώ στην περίπτωση όπου η προέλευση ήταν άγνωστη μοντελοποιήθηκαν με τα αντίστοιχα σετ δεδομένων για την παγκόσμια αγορά. Οι κατεργασίες των πρώτων υλών (διαδικασίες παραγωγής) για την κατασκευή των συνιστωσών του υπό εξέταση συστήματος έχει θεωρηθεί ότι πραγματοποιούνται στην πλειοψηφία τους εντός ευρωπαϊκού εδάφους.

- Όσον αφορά τις μεταφορές, δεν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι μεταφορές που σχετίζονται με την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος, λόγω έλλειψης δεδομένων. Για τις μεταφορές των πρώτων υλών λαμβάνονται υπόψη αντιπροσωπευτικές προσεγγιστικές αποστάσεις μεταφορών, όπως αυτές 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 3.2.2.
- Λόγω έλλειψης δεδομένων δεν έχουν ληφθεί υπόψη στη μοντελοποίηση όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης όπως κάποια ηλεκτρονικά μέρη, συστήματα ελέγχου και βοηθητικά εξαρτήματα.
- Για συνιστώσες του συστήματος με διάρκεια ζωής μικρότερη από είκοσι (20) έτη, έχει θεωρηθεί αντικατάσταση αυτών βάσει της διάρκειας ζωής τους.
- 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 επιμέρους συνιστώσες της εγκατάστασης.

### 3.2.1 Εξαγωγή πρώτων υλών/Κατασκευή

#### I. Γενικές παραδοχές:

- Ο χάλυβας η σύσταση του οποίου δεν είναι γνωστή μοντελοποιήθηκε με το σετ δεδομένων (process dataset) “Steel, low-alloyed (GLO) | market for”.
- 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) [73].
- Στη περίπτωση κατά την οποία δεν παρέχονταν δεδομένα για τις κατεργασίες των μετάλλων για την κατασκευή ορισμένων συνιστωσών της εγκατάστασης έχει χρησιμοποιηθεί το σετ δεδομένων “Metal working, average for – όνομα μετάλλου - product manufacturing (RER)| processing”.
- Όλα τα ελαστομερή μοντελοποιήθηκαν με το σετ δεδομένων της ecoinvent “Synthetic rubber (GLO)| market for | Cut-off, U”, το οποίο αφορά το ελαστομερές EPDM (ethylene propylene diene monomer rubber) το οποίο αποτελεί ένα τεχνητό ελαστομερές (τεχνητό καουτσούκ).
- Στην περίπτωση συνιστωσών του συστήματος τα οποία έχουν διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές από τα αντίστοιχα της βάσης δεδομένων της ecoinvent

(όπως για παράδειγμα οι κυκλοφορητές), αυτά μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση ενός συντελεστή κλίμακας ως προς το βάρος των πραγματικών συνιστωσών.

## II. Σύστημα θέρμανσης SWS-Heating

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα πλήρη δεδομένα τα οποία αφορούν τις συνιστώσες του συστήματος θέρμανσης SWS-Heating, τα οποία παρέχονται από τους συνεργαζόμενους κατασκευαστές, όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι μάζες αυτών, η ενέργεια και οι διαδικασίες κατασκευής τους, καθώς και οι αποστάσεις μεταφοράς ορισμένων υλικών, και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της ΑΚΖ του συστήματος, είναι εμπιστευτικά και ως εκ τούτου δε δημοσιεύονται στην παρούσα μελέτη.

Ωστόσο, παρατίθενται κάποια δεδομένα από τη βιβλιογραφία, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση ορισμένων συνιστωσών και εξαρτημάτων του συστήματος και τα οποία δύναται να παρουσιαστούν.

- Ο λέβητας φυσικού αερίου (RIELLO residence 25 KIS e) τον οποίο ενσωματώνει το σύστημα μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο "Victrix", το οποίο αποτελεί ένα λέβητα φυσικού αερίου συμπίκνωσης που κατασκευάζεται στην Ιταλία από την εταιρεία Immergas S.p.A.. Η περιβαλλοντική απόδοση του συγκεκριμένου λέβητα, μελετήθηκε μέσω της μεθοδολογίας της ΑΚΖ από τον Vignali G. [74]. Η συγκεκριμένη επιλογή θεωρείται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα και αποσκοπεί στην κάλυψη του εύρους των πιθανών λεβήτων φυσικού αερίου οι οποίοι είναι κατάλληλοι για το σύστημα. Οι κύριες τεχνικές προδιαγραφές του υπό εξέταση λέβητα, καθώς και τα υλικά και η κατανάλωση ενέργειας για την κατασκευή αυτού, δίνονται στον Πιν. 3.1.

Ο αναλυτικός κατάλογος απογραφής, όπως οι πρώτες ύλες και η ενέργεια κατασκευής, καθώς και τα σετ δεδομένων που έχουν επιλεγεί από τη βάση δεδομένων τηςecoinvent για τη μοντελοποίηση του λέβητα, δίνονται στον Πιν. Α.1 του Παραρτήματος Α.

Πιν. 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές του λέβητα φυσικού αερίου συμπίκνωσης "Victrix" [74]

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ονομαστική θερμική ισχύς	24	kW
Βάρος	42.96	kg
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την κατασκευή	22.2	kWh
Κατανάλωση θερμικής ενέργειας για την κατασκευή	116.6	MJ

- Οι κυκλοφορητές της εγκατάστασης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη διακίνηση του εργαζόμενου ρευστού (νερό) εντός των διαφόρων συνιστωσών αυτής, μοντελοποιήθηκαν με βάση το σετ δεδομένων της ecoinvent «Pump 40 W», στο οποίο έγινε αναγωγή με βάση την αναλογία μαζών.

### III. Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Η δεξαμενή αποθήκευσης, χωρητικότητας 1000 lt, την οποία περιλαμβάνει το σύστημα, μοντελοποιήθηκε κατά προσέγγιση θεωρώντας δύο πρωτότυπες δεξαμενές χωρητικότητας 535 lt.

### IV. Δοχείο αδράνειας με υλικά αλλαγής φάσης

Το υλικό αλλαγής φάσης (PCM) το οποίο περιέχει το δοχείο αδράνειας, μοντελοποιήθηκε με το σετ δεδομένων της ecoinvent “Calcium chloride (RER) | market for calcium chloride | Cut-off, U” [75].

### V. Σύστημα αναφοράς

Οι συνιστώσες του συστήματος αναφοράς παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Η μοντελοποίηση των συνιστωσών του συστήματος αναφοράς πραγματοποιήθηκε κατά το δυνατό με έτοιμα σετ από τη βάση δεδομένων της ecoinvent, τα οποία τροποποιήθηκαν κατάλληλα όπου αυτό ήταν απαραίτητο. Τα αναλυτικά δεδομένα που αφορούν την υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης παρέχονται από μετρήσεις μίας υπάρχουσας εγκατάστασης στο ΚΑΠΕ [69] και δε δημοσιεύονται καθώς είναι εμπιστευτικά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Ορισμένες από τις θεωρήσεις οι οποίες έγιναν κατά τη μοντελοποίηση των υπόλοιπων συνιστωσών του συστήματος αναφοράς παρατίθενται παρακάτω:

- Το δοχείο αδράνειας (χωρητικότητας 150 lt) μοντελοποιήθηκε με το αντίστοιχο σετ δεδομένων της ecoinvent (Hot water tank, 600l (RoW) | production | Cut-off, U) βάση του βάρους του. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε βάρος ίσο με 62,6 kg για το δοχείο αδράνειας, σύμφωνα με εμπορικά μοντέλα δοχείων (Panthermica 150 lt [76]).
- Δεδομένου ότι στη βάση δεδομένων της ecoinvent ο λέβητας φυσικού αερίου μοντελοποιείται ως λέβητας πετρελαίου, ο υπό εξέταση λέβητας φυσικού αερίου του συστήματος αναφοράς μοντελοποιείται ως λέβητας πετρελαίου με το αντίστοιχο σετ δεδομένων της ecoinvent (Oil boiler, 10kW (RoW) | production modified | Cut-off, U), με κατάλληλη αναγωγή ως προς τη μάζα αυτού σύμφωνα με εμπορικό μοντέλο (Vaillant auroCOMPACT VSC D 206 / 4-5 [77]).
- Για τους κυκλοφορητές του συστήματος χρησιμοποιείται η ίδια προσέγγιση με το σύστημα SWS-Heating, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

Πιν. 3.2 Συνιστώσες του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Γερμανία

Συνιστώσα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Διάρκεια ζωής (έτη)	Αριθμός αντικαταστάσεων
Δεξαμενή αποθήκευσης	46.5	m <sup>3</sup>	25	0.8
Δοχείο αδράνειας	150	lt	10	2
Επίπεδοι συλλέκτες	13	m <sup>2</sup>	10	2
Κυκλοφορητές	62.6	kg	20	1
Λέβητας φυσικού αερίου	179	kg	20	1

Πιν. 3.3 Συνιστώσες του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Σουηδία

Συνιστώσα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Διάρκεια ζωής (έτη)	Αριθμός αντικαταστάσεων
Δεξαμενή αποθήκευσης	38.8	m <sup>3</sup>	25	0.8
Δοχείο αδράνειας	150	lt	10	2
Επίπεδοι συλλέκτες	25.2	m <sup>2</sup>	10	2
Κυκλοφορητές	62.6	kg	20	1
Λέβητας φυσικού αερίου	179	kg	20	1

### 3.2.2 Μεταφορά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η πλήρης και ακριβής καταγραφή όλων των αποστάσεων μεταφοράς που σχετίζονται με το υπό εξέταση σύστημα δεν είναι εφικτή, λόγω της μη διαθεσιμότητας των αντίστοιχων δεδομένων σχετικά με την προέλευση των πρώτων υλών καθώς και αρκετών τοποθεσιών όπου πραγματοποιείται η επεξεργασία αυτών. Κάποιες από τις αποστάσεις αυτές, παρέχονται από τους κατασκευαστές των αντίστοιχων συνιστωσών.

Για τις υπόλοιπες αποστάσεις μεταφοράς, γίνονται οι ακόλουθες εκτιμήσεις βάση των τοποθεσιών παραγωγής και εγκατάστασης:

- Για όλες οι συνιστώσες του συστήματος SWS-Heating θεωρείται μεταφορά από την τοποθεσία παραγωγής αυτών στην τοποθεσία εγκατάστασης, δηλαδή στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και στη Στοκχόλμη της Σουηδίας.
- Ο εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου θεωρείται ότι κατασκευάζεται στο Λεγκάνο της Ιταλίας, από όπου και αποστέλλεται στις τοποθεσίες εγκατάστασης.

- Όσον αφορά το σύστημα αναφοράς, λαμβάνεται υπόψη μια μέση απόσταση μεταφοράς 200 χιλιομέτρων επί ευρωπαϊκού εδάφους, από την τοποθεσία παραγωγής έως τον τόπο εγκατάστασης, για όλες τις συνιστώσες αυτού.
- Η απόσταση μεταφοράς των αποβλήτων που προκύπτουν μετά το τέλος ζωής των επιμέρους συνιστωσών, προς το χώρο διαχείρισης αυτών, λαμβάνεται ίση με 24 km.

Όλες οι προαναφερθείσες μεταφορές μεγάλων αποστάσεων θεωρείται ότι πραγματοποιούνται οδικώς, με τη χρήση φορτηγού μέγιστου φορτίου μεγαλύτερου από 32 τόνους. Οι μεταφορές μικρής απόστασης οι οποίες παρέχονται από τους κατασκευαστές θεωρείται ότι πραγματοποιούνται επίσης οδικώς, με τη χρήση μικρού φορτηγού μέγιστου βάρους μικρότερου των 3.5 τόνων. Όσον αφορά τις θαλάσσιες μεταφορές, οι υπερωκεάνιες μεταφορές θεωρείται ότι πραγματοποιούνται με φορτηγό πλοίο, ενώ οι μεταφορές μικρών αποστάσεων (π.χ. προς τη Στοκχόλμη) θεωρείται ότι πραγματοποιούνται με φεριμπότ εμπορευμάτων. Τέλος, η μεταφορά των αποβλήτων προς το χώρο διαχείρισής τους θεωρείται ότι γίνεται με απορριμματοφόρο μέγιστου βάρους μικρότερου των 21 τόνων.

Όλες οι παραπάνω αποστάσεις μεταφοράς, καθώς και οι αντίστοιχες που αφορούν εγκατάσταση του συστήματος σε άλλες χώρες (βλ. ενότητα 4.2.1), έχουν υπολογιστεί προσεγγιστικά με τη χρήση των χαρτών της Google [78]. Μία λεπτομερής καταγραφή των παραπάνω αποστάσεων καθώς και των σετ δεδομένων που έχουν επιλεγεί από τη βάση δεδομένων τηςecoinvent δίνονται στον Πιν. Α.2 του Παραρτήματος Α.

### 3.2.3 Φάση Χρήσης

Κατά τη συγκεκριμένη φάση υπολογίζονται οι καταναλώσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και φυσικό αέριο του συστήματος SWS-Heating σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Συγκεκριμένα, για την απόκτηση των καταναλώσεων, η λειτουργία του συστήματος μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό TRNSYS [79] σε ετήσια βάση. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης πολλαπλασιάστηκαν με τη διάρκεια ζωής του συστήματος (20 έτη) ώστε να υπολογιστεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα. Αντίστοιχα, οι καταναλώσεις φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού του συστήματος αναφοράς, υπολογίστηκαν μέσω της μοντελοποίησης της λειτουργίας του συστήματος σε ετήσια βάση, όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β, στο περιβάλλον προγραμματισμού της Matlab, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι μία προφανής παραδοχή η οποία γίνεται στη συγκεκριμένη φάση της μελέτης, είναι η θεώρηση ότι οι καταναλώσεις των συστημάτων δε μεταβάλλονται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια ζωής αυτών. Παράλληλα, τα δεδομένα των καταναλώσεων και των θερμικών αναγκών του κτηρίου, αποτελούν αποτελέσματα μοντελοποίησης του συστήματος και δεν προέρχονται από μετρήσεις κατά τη λειτουργία αυτού σε πραγματικές συνθήκες, καθώς βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και δεδομένα τέτοιου είδους δεν ήταν διαθέσιμα κατά την περίοδο διεξαγωγής της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.



Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα δύο συστήματα συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πιν. 3.4 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος SWS-Heating και του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Γερμανία

	Ζήτηση ZNX (kWh/έτος)	Ζήτηση θέρμανσης (kWh/έτος)	Συνολική ζήτηση θερμότητας (kWh/έτος)
Κτήριο αναφοράς	1531	2651	4182
Σύστημα	Κατανάλωση φυσικού αερίου (kWh/έτος)	Κατανάλωση ηλεκτρισμού (kWh/έτος)	Ηλιακό κλάσμα (%)
SWS-Heating	2400	916	62.0
Σύστημα αναφοράς	5713	882	60.3

Πιν. 3.5 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος SWS-Heating και του συστήματος αναφοράς για εγκατάσταση στη Σουηδία

	Ζήτηση ZNX (kWh/έτος)	Ζήτηση θέρμανσης (kWh/έτος)	Συνολική ζήτηση θερμότητας (kWh/έτος)
Κτήριο αναφοράς	1726	4190	5916
Σύστημα	Κατανάλωση φυσικού αερίου (kWh/έτος)	Κατανάλωση ηλεκτρισμού (kWh/έτος)	Ηλιακό κλάσμα (%)
SWS-Heating	3403	1199	60.0
Σύστημα αναφοράς	7021	849	60.3

Στις παραπάνω περιπτώσεις, προκειμένου να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμότητα από την είσοδο φυσικού αερίου των αντίστοιχων σετ δεδομένων της ecoinvent, έγιναν ορισμένες προσαρμογές σε αυτά. Ειδικότερα, το σετ δεδομένων “Heat, central or small-scale, natural gas | heat production, natural gas, at boiler modulating <100kW | Cut-off, U” χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα αναφοράς, καθώς περιλαμβάνει ένα συμβατικό λέβητα φυσικού αερίου, ενώ αντίστοιχα το σετ “Heat, central or small-scale, natural gas | heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW | Cut-off, U” χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα SWS-Heating. Δεδομένου ότι στα παραπάνω σετ δεδομένων δε γίνεται κάποια αναφορά στο βαθμό απόδοσης των λεβήτων, η ωφέλιμη θερμότητα από την καύση του φυσικού αερίου προσαρμόστηκε βάση του βαθμού απόδοσης των υπό εξέταση λεβήτων φυσικού αερίου. Για το σκοπό αυτό, λήφθηκαν υπόψη μέσοι βαθμοί απόδοσης ίσοι με 0.98 και 0.9 (σε σχέση με την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του

φυσικού αερίου, η οποία λαμβάνεται ίση με  $35.2 \text{ MJ/Nm}^3$  [80]), για το λέβητα συμπύκνωσης και το συμβατικό λέβητα αντίστοιχα. Επομένως, η είσοδος θερμότητας (σε MJ) τροποποιήθηκε ανάλογα με βάση την είσοδο φυσικού αερίου (σε  $\text{m}^3$ ) στα παραπάνω σετ δεδομένων.

### 3.2.4 Τέλος κύκλου ζωής

Δεδομένου ότι το υπό εξέταση σύστημα βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δεν υπάρχουν δεδομένα σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής του. Επομένως, θεωρήθηκε ένα αισιόδοξο σενάριο για το τέλος ζωής της διάταξης, το οποίο περιλαμβάνει πλήρη (100%) ανάκτηση και ανακύκλωση όλων των ανακυκλώσιμων υλικών από όλες τις συνιστώσες του συστήματος. Η απόφαση αυτή παρακινήθηκε επιπλέον από την οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2012/19/EU [81], όπου ορίζονται ελάχιστα ποσοστά ανακύκλωσης για συνιστώσες ενεργειακών συστημάτων. Τέλος, παρά το γεγονός ότι η επιλογή αυτή είναι αυθαίρετη, δε θεωρείται ότι επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα συγκριτικά με άλλους τρόπους διαχείρισης των αποβλήτων, όπως έδειξαν στη μελέτη τους οι Roumpedakis et al. [82], κυρίως λόγω του τρόπου μοντελοποίησης του συστήματος (προσέγγιση “cut-off”).

Αρχικά, θεωρείται ότι οι συνιστώσες του συστήματος αποσυναρμολογούνται και τα διάφορα υλικά διαχωρίζονται μηχανικά και χειροκίνητα στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της φάσης διαχωρισμού δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς η επίδρασή της στο συνολικό αντίκτυπο θεωρείται αμελητέα. Για τα υλικά τα οποία δε μπορούν να ανακυκλωθούν (ή πρακτικά δεν ανακυκλώνονται) θεωρείται ταφή ή καύση αυτών βάση της φύσης του υλικού. Για παράδειγμα, για υλικά όπως η μόνωση (περλίτης) ή το ξύλο θεωρείται ταφή σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), ενώ για υλικά όπως το ενισχυμένο με ίνες γυαλιού πλαστικό (GRP – Glass Reinforced Plastic) θεωρείται καύση. Επιπλέον, όσον αφορά την ταφή των υλικών, αυτή μοντελοποιείται και πάλι ανάλογα με τη φύση του υλικού (αδρανές/μη αδρανές) με τη επιλογή του αντίστοιχου σετ δεδομένων, καθώς στην περίπτωση των μη αδρανών υλικών μοντελοποιούνται οι διαρροές προς το υπέδαφος, ενώ ορισμένα πλαστικά και πολυμερή μοντελοποιούνται ως “plastic mixture” για το τέλος ζωής τους.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι για την ανακύκλωση των υλικών δε λαμβάνεται υπόψη κάποιο σετ δεδομένων καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σύμφωνα με τον τρόπο μοντελοποίησης των δεδομένων (μοντέλο “cut-off”) δεν προκύπτει κάποιο περιβαλλοντικό όφελος από αυτή, ενώ οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη διαδικασία της ανακύκλωσης αποδίδονται στο ανακυκλωμένο προϊόν και όχι στον παραγωγό του υλικού προς ανακύκλωση. Για το λόγο αυτό, τα αντίστοιχα σετ δεδομένων τηςecoinvent, τα οποία σχετίζονται με την ανακύκλωση, είναι κενά.

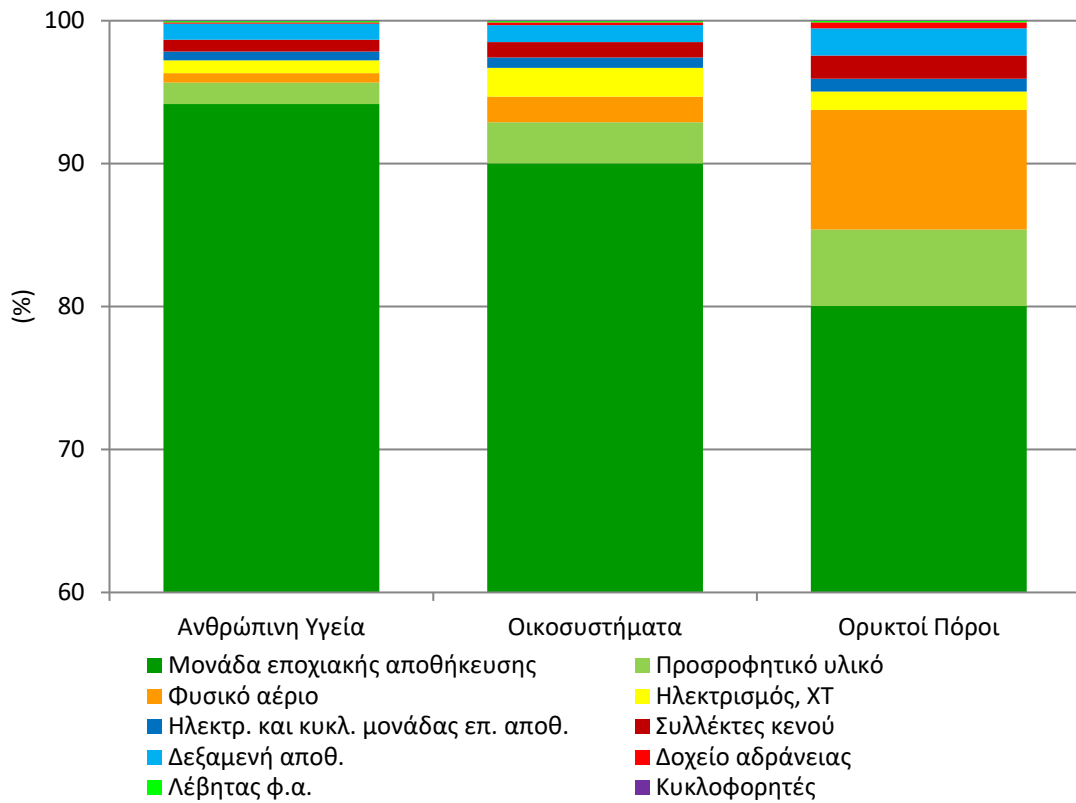
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για το υπό εξέταση σύστημα, καθώς και για τις μελέτες περιπτώσεων και τις αναλύσεις ευαισθησίας οι οποίες πραγματοποιήθηκαν.

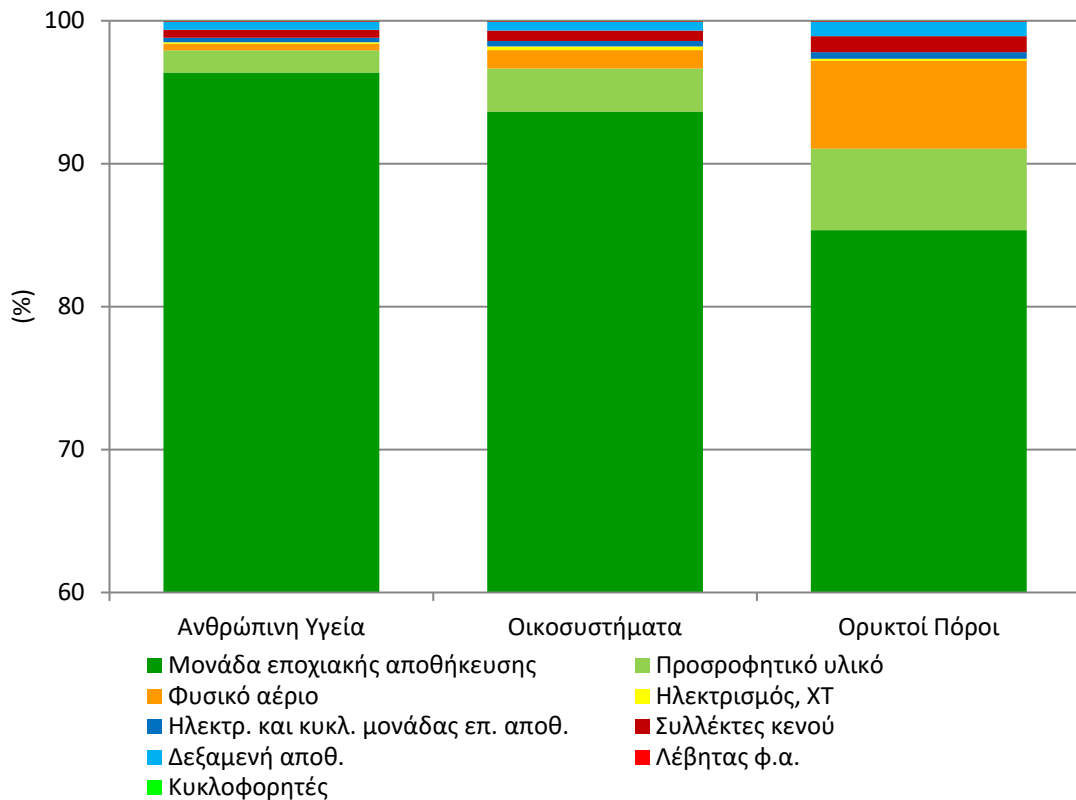
### 4.1 Αποτελέσματα για το βασικό σενάριο

#### 4.1.1 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό αντίκτυπο του υπό εξέταση συστήματος

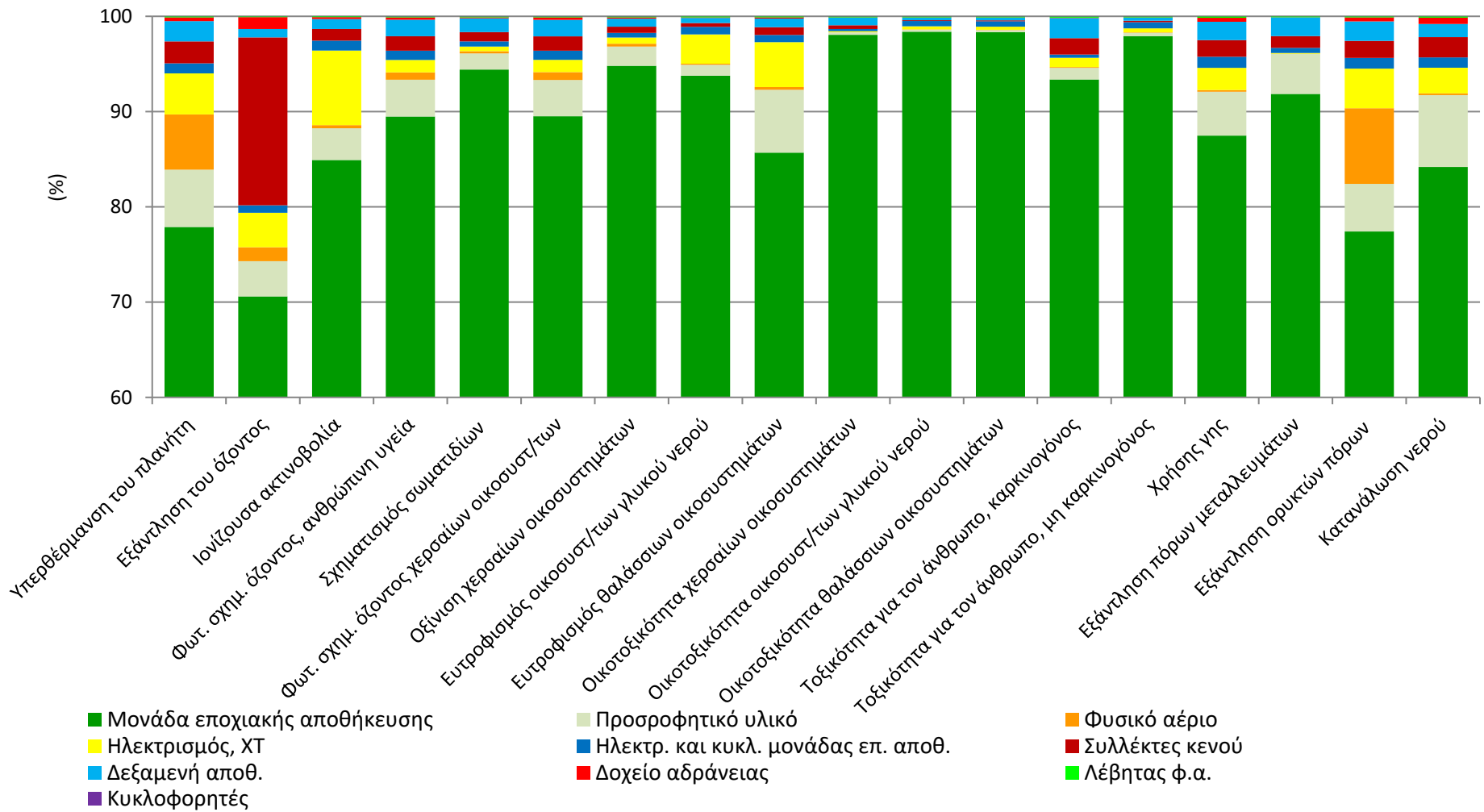
Αρχικά, παρουσιάζεται η συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών του υπό εξέταση συστήματος καθώς και της κατανάλωσης ενέργειας (ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου) στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτού. Τα αποτελέσματα αφορούν το βασικό σενάριο, όπου θεωρούνται δύο διατάξεις του συστήματος SWS-Heating και εγκατάσταση στη Γερμανία και τη Σουηδία, αντίστοιχα. Κάθε συνιστώσα περιλαμβάνει τις πρώτες ύλες, τη μεταφορά και την κατεργασία αυτών για την κατασκευή του τελικού προϊόντος, τη μεταφορά στην τοποθεσία εγκατάστασης, τις καταναλώσεις (σε πρώτες ύλες και ενέργεια) για τη συντήρηση αυτής, καθώς και τις διεργασίες που σχετίζονται με τη μεταφορά και την επεξεργασία των αποβλήτων στο χώρο διαχείρισης (στην περίπτωση στην οποία αυτή δεν ανακυκλώνεται) μετά το τέλος του κύκλου ζωής της διάταξης. Σημειώνεται ότι στα παρακάτω αποτελέσματα, σχετικά με τη μονάδα εποχιακής αποθήκευσης, έχει θεωρηθεί συντελεστής κλίμακας ίσος με 0.7 σε σχέση με τα δεδομένα τα οποία έχουν παρασχεθεί από τους κατασκευαστές για τις πρωτότυπες μονάδες, για τη μετάβαση από τις τελευταίες στο τελικό εμπορικά διαθέσιμο σύστημα. Συγκεκριμένα, όλα τα υλικά και οι καταναλώσεις για τις πρωτότυπες μονάδες (οι οποίες περιέχουν μία σχετικά μικρή μάζα προσροφητικού υλικού) έχουν αναχθεί γραμμικά με βάση τη μάζα του προσροφητικού υλικού, και έχουν πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή κλίμακας. Παράλληλα, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ξεχωριστά η επίπτωση των ηλεκτρονικών μερών και των κυκλοφορητών της συγκεκριμένης συνιστώσας, καθώς αυτά θεωρήθηκε ότι διατηρούνται σταθερά κατά την αναγωγή. Το σύνολο των αποτελεσμάτων, σε απόλυτες τιμές, δίνεται στους πίνακες του Παραρτήματος Γ.



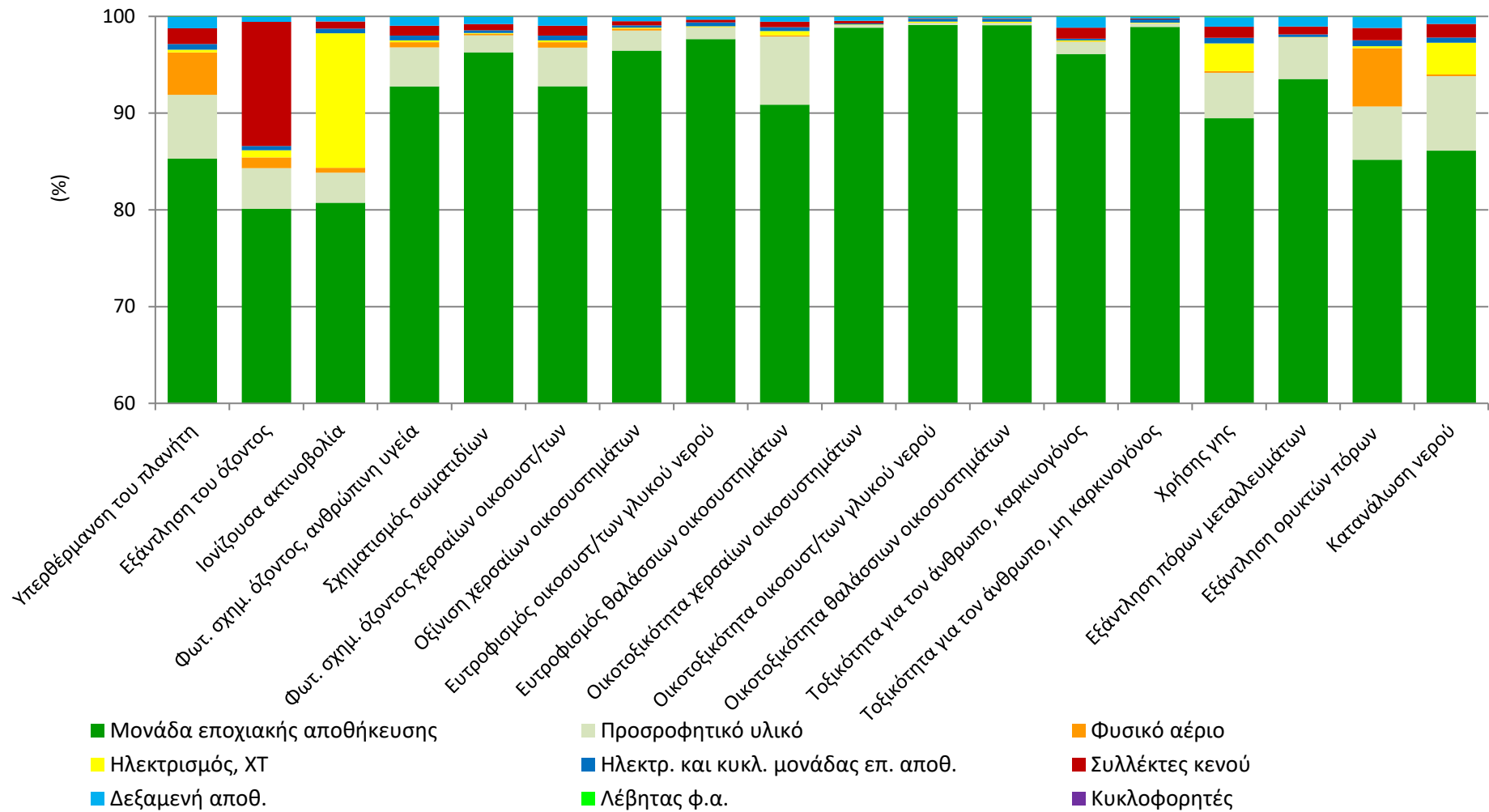
Εικ. 4.1 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο "endpoint"



Εικ. 4.2 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο "endpoint"



Εικ. 4.3 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο "midpoint"



Εικ. 4.4 Συνεισφορά των επιμέρους συστατικών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο "midpoint"

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα (Εικ. 4.3 και Εικ. 4.4), η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης, δηλαδή η διάταξη η οποία περιέχει το προσροφητικό υλικό, και η οποία περιλαμβάνει τους αντίστοιχους εναλλάκτες στους οποίους αυτό περιέχεται (καθώς και τους ατμοποιητές/συμπυκνωτές) και τις βαλβίδες κενού, έχει κυρίαρχη συμβολή σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Η συνεισφορά της κυμαίνεται από 70.6% έως 98.3% για εγκατάσταση στη Γερμανία και από 80.1% έως 99.1% για εγκατάσταση στη Σουηδία, για τις κατηγορίες της εξάντλησης του όζοντος και της οικοτοξικότητας τόσο των θαλασσιών όσο και των οικοσυστημάτων γλυκού νερού, αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη μάζα των πρώτων υλών (κυρίως χάλυβα και χαλκού) τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών. Λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή κλίμακας καθώς και το γεγονός ότι η μάζα των ηλεκτρονικών μερών και των κυκλοφορητών παραμένει σταθερή κατά την αναγωγή, οι μονάδες αποθήκευσης έχουν μάζα περίπου ίση με 36 και 79 τόνους, κυρίως μετάλλων, για την περίπτωση της Γερμανίας και της Σουηδίας αντίστοιχα.

Μία αξιοσημείωτη συνεισφορά, όπως απεικονίζεται στα διαγράμματα, είναι αυτή του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών κενού στην κατηγορία της εξάντλησης του όζοντος. Αυτό οφείλεται στο υλικό Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) –κοινώς γνωστό ως Τεφλόν (Teflon)– το οποίο περιέχουν και η παραγωγή του οποίου έχει σχετικά υψηλό αντίκτυπο στη συγκεκριμένη κατηγορία. Επιπλέον, ο υψηλός αντίκτυπος της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην κατηγορία της ιονίζουσας ακτινοβολίας στην περίπτωση της Σουηδίας, σχετίζεται με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας. Αντίστοιχα, ο αυξημένος αντίκτυπος του ηλεκτρισμού στον ευτροφισμό των οικοσυστημάτων, στην περίπτωση της Γερμανίας, οφείλεται στη λιγνιτική ηλεκτροπαραγωγή, το οποίο σχετίζεται με την εκπομπή φωσφορικών αλάτων κατά την εξόρυξη αυτού [83].

Πιν. 4.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά λειτουργική μονάδα και για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία Επίπτωσης	Ρέγκενσμπουργκ		Στοκχόλμη	
	1 kWh	1m <sup>2</sup>	1 kWh	1m <sup>2</sup>
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	2.97	1.859·10 <sup>3</sup>	3.88	3.423·10 <sup>3</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.49·10 <sup>-6</sup>	1.563·10 <sup>-3</sup>	3.15·10 <sup>-6</sup>	2.780·10 <sup>-3</sup>
Κατανάλωση νερού (m <sup>3</sup> )	2.88·10 <sup>-2</sup>	1.803·10 <sup>1</sup>	4.01·10 <sup>-2</sup>	3.544·10 <sup>1</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.16·10 <sup>-1</sup>	7.247·10 <sup>1</sup>	1.65·10 <sup>-1</sup>	1.455·10 <sup>2</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg oil <sub>eq</sub> )	7.38·10 <sup>-1</sup>	4.625·10 <sup>2</sup>	9.66·10 <sup>-1</sup>	8.526·10 <sup>2</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	3.00·10 <sup>-1</sup>	1.881·10 <sup>2</sup>	4.18·10 <sup>-1</sup>	3.693·10 <sup>2</sup>

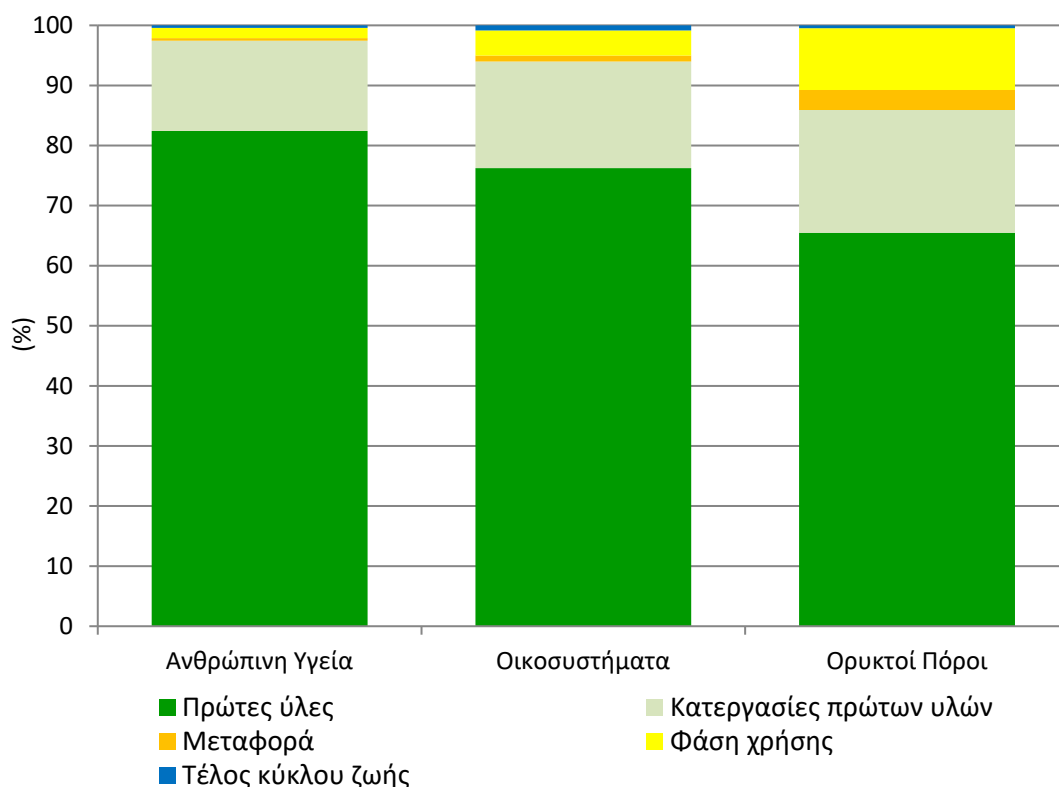
Ορισμένα ποσοτικά αποτελέσματα του υπό εξέταση συστήματος για τις δύο τοποθεσίες εγκατάστασης, για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων και τις δύο λειτουργικές μονάδες δίνονται στον Πιν. 4.1. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, συμπεραίνεται ότι οι απόλυτες τιμές ισοδύναμων εκπομπών του συστήματος είναι σημαντικά υψηλές. Για παράδειγμα, όσον αφορά την κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η λειτουργία του συστήματος, για εγκατάσταση στη Γερμανία, συνεπάγεται εκπομπή 2.97 kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_{2,eq}$ ) ανά θερμική kWh, η οποία παρέχεται στο κτήριο, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη Σουηδία είναι ίση με 3.88 kg. Η τιμή αυτή είναι σημαντικά υψηλότερη από άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες θέρμανσης για εφαρμογή σε αντίστοιχη κλίμακα. Για παράδειγμα, η λειτουργία ενός λέβητα φυσικού αερίου για εγκατάσταση στην Αγγλία, συνεπάγεται 0.220 kg  $CO_{2,eq}$  ανά θερμική kWh [71]. Αντίστοιχα, η λειτουργία μίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με αποθήκευση στο έδαφος στην περιοχή της Ιταλίας, συνεπάγεται περίπου 0.195 kg  $CO_{2,eq}/kWh$  [84]. Από την άλλη, πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι το σύστημα SWS-Heating είναι ένα σύστημα το οποίο καλύπτει αποκλειστικά τα φορτία θέρμανσης και ΖΝΧ του κτηρίου και επομένως δεν είναι ένα πλήρες σύστημα ηλιακής θέρμανσης και ψύξης, όπου σε αυτή την περίπτωση ο αντίκτυπος της κατασκευής των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος διαιρείται με τη συνολική ζήτηση (θέρμανση, ψύξη και ΖΝΧ), και επομένως ο αντίκτυπος του συστήματος είναι χαμηλότερος ανά θερμική kWh. Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η κύρια συνιστώσα του συστήματος η οποία χρήζει πρωτίστως βελτίωσης, είναι η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας. Ωστόσο, τονίζεται, ότι ο αντίκτυπος του συστήματος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συγκεκριμένη συνιστώσα, είναι ακόμα σχετικά υψηλός, καθώς για την περίπτωση της Γερμανίας, εκπέμπονται περίπου 0.66 kg  $CO_{2,eq}$  ανά θερμική kWh, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη Σουηδία είναι 0.57 kg  $CO_{2,eq}$  ανά θερμική kWh. Λαμβάνοντας υπόψη τη δεύτερη λειτουργική μονάδα, τα αποτελέσματα ακολουθούν την ίδια τάση, με το σύστημα να εκπέμπει 1859 kg  $CO_{2,eq}$  ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας του κτηρίου και για όλη τη διάρκεια ζωής του, θεωρώντας εγκατάσταση στη Γερμανία, ενώ για εγκατάσταση στη Σουηδία, η λειτουργία του συστήματος συνεπάγεται εκπομπές ίσες με 3423 kg  $CO_{2,eq}$  ανά τετραγωνικό μέτρο.

Σε επίπεδο “endpoint” (Εικ. 4.1 και Εικ. 4.2), παρατηρείται ότι ο αντίκτυπος της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης αντιστοιχεί σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% σε όλες τις κατηγορίες βλάβης και για τις δύο τοποθεσίες εγκατάστασης. Η κλίμακα στα παρακάτω διαγράμματα επιλέγεται να ξεκινά από το 60% (Εικ. 4.1 έως Εικ. 4.4), προκειμένου να είναι περισσότερο εμφανής η συνεισφορά των υπόλοιπων συνιστωσών. Μία αξιοσημείωτη συνεισφορά είναι αυτή του προσροφητικού υλικού και της κατανάλωσης φυσικού αερίου, τα οποία αντιστοιχούν σε ποσοστό από 5.4% έως 5.7% και από 6.2% έως 8.4% του συνολικού αντικτύπου, αντίστοιχα, όντας σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του επιπέδου “midpoint”.



#### 4.1.2 Συνεισφορά των φάσεων του κύκλου ζωής στο συνολικό αντίκτυπο του συστήματος

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, τα αποτελέσματα για το σύστημα SWS-Heating παρουσιάζονται ανά φάση του κύκλου ζωής αυτού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η συνεισφορά των πρώτων υλών, των διαδικασιών επεξεργασίας (κατεργασιών) αυτών, των μεταφορών, της κατανάλωσης ενέργειας που σχετίζεται με τη φάση της λειτουργίας (ή χρήσης) του συστήματος, και τέλος των διεργασιών που σχετίζονται με τη μεταφορά και την επεξεργασία των αποβλήτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής της διάταξης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επίπεδο “endpoint” και ενδεικτικά για την περίπτωση εγκατάστασης στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας προκειμένου να αναδειχθούν εκτός από τις συνιστώσες, ειδικότερα τα σημεία εκείνα τα οποία χρήζουν βελτίωσης στον κύκλο ζωής αυτών. Επιπλέον, με το συγκεκριμένο τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων, διαπιστώνεται και το εύρος επίδρασης ορισμένων παραδοχών στα αποτελέσματα, όπως η επιλογή του σετ δεδομένων της ecoinvent “Metal working, average ...” για τη μοντελοποίηση ορισμένων αγνώστων κατεργασιών μετάλλων, το οποίο εισάγει κάποια αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατηγοριοποίηση των διεργασιών σε πρώτες ύλες, κατεργασίες πρώτων υλών, κλπ., γίνεται βάση της αντίστοιχης κατηγοριοποίησης της βάσης δεδομένων της ecoinvent, ενώ δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν πλήρως τα παραπάνω στάδια για κάθε διεργασία, λόγω της δομής αυτής. Για παράδειγμα, οι είσοδοι για την παραγωγή του χάλυβα, ο οποίος αποτελεί μία πρώτη ύλη του υπό εξέταση συστήματος, περιλαμβάνουν και αυτές, αντίστοιχα, εισόδους για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής αυτών (όπως πρώτες ύλες, ενέργεια, κλπ.), και ούτω καθ’ εξής. Επομένως, είναι πρακτικά αδύνατος ένας πλήρης διαχωρισμός.



Εικ. 4.5 Συνεισφορά των φάσεων του κύκλου ζωής στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα, οι πρώτες ύλες για την κατασκευή των συνιστωσών του συστήματος, και κυρίως τα μέταλλα τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μονάδων εποχιακής αποθήκευσης ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος, άνω του 60%, του περιβαλλοντικού αντίκτυπου του συστήματος σε όλες τις κατηγορίες βλάβης. Η δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά αντιστοιχεί στις διαδικασίες επεξεργασίας των πρώτων υλών, η συνεισφορά των οποίων κυμαίνεται από 15.0% έως 20.4% του συνολικού αποτυπώματος του συστήματος, για την κατηγορία της ανθρώπινης υγείας και των ορυκτών πόρων αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες φάσεις του κύκλου ζωής του συστήματος εμφανίζουν σχετικά μικρή συνεισφορά, με εξαίρεση την κατηγορία των ορυκτών πόρων όπου η κατανάλωση φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού κατά τη φάση λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζουν σχετικά αυξημένο αντίκτυπο.

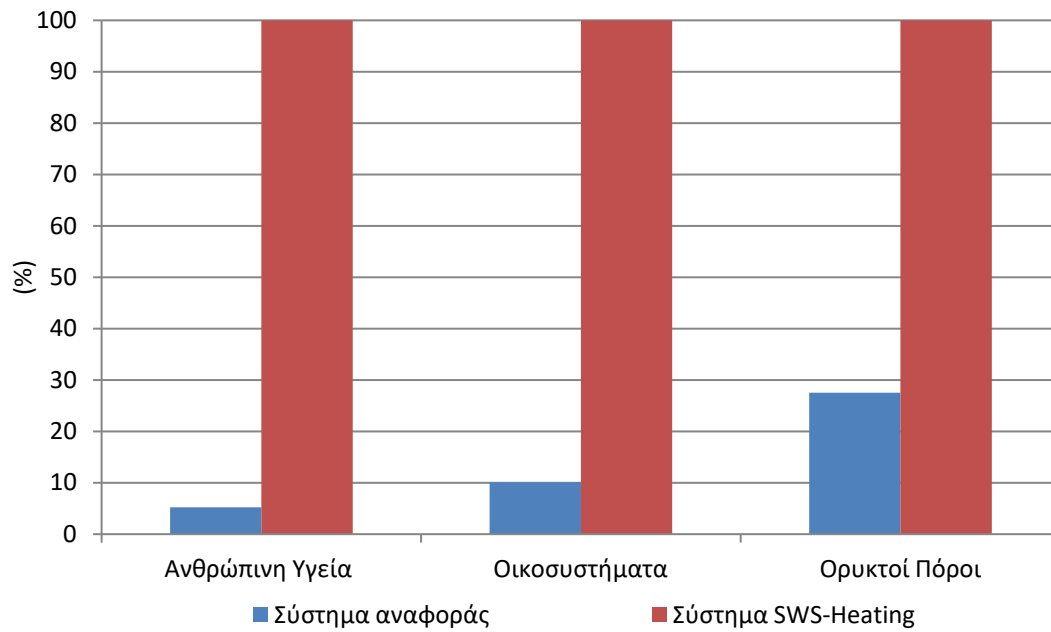
#### 4.1.3 Σύγκριση με το σύστημα αναφοράς

Στη συνέχεια, συγκρίνεται η περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος SWS-Heating με αυτή του συστήματος αναφοράς (όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2), για εγκατάσταση στις δύο βασικές τοποθεσίες, δηλαδή στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και στη Στοκχόλμη της Σουηδίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μόνο σε επίπεδο “endpoint”, καθώς η εικόνα σε επίπεδο “midpoint” είναι αρκετά παρόμοια, ενώ η απλοποιημένη προσέγγιση στα χρησιμοποιούμενα σετ δεδομένων για το σύστημα αναφοράς μπορεί να οδηγήσει σε ορισμένες αποκλίσεις. Ορισμένα ποσοτικά αποτελέσματα για τα δύο συστήματα σε επίπεδο “midpoint” δίδονται στον Πιν. 4.2, ενώ το σύνολο αυτών παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.

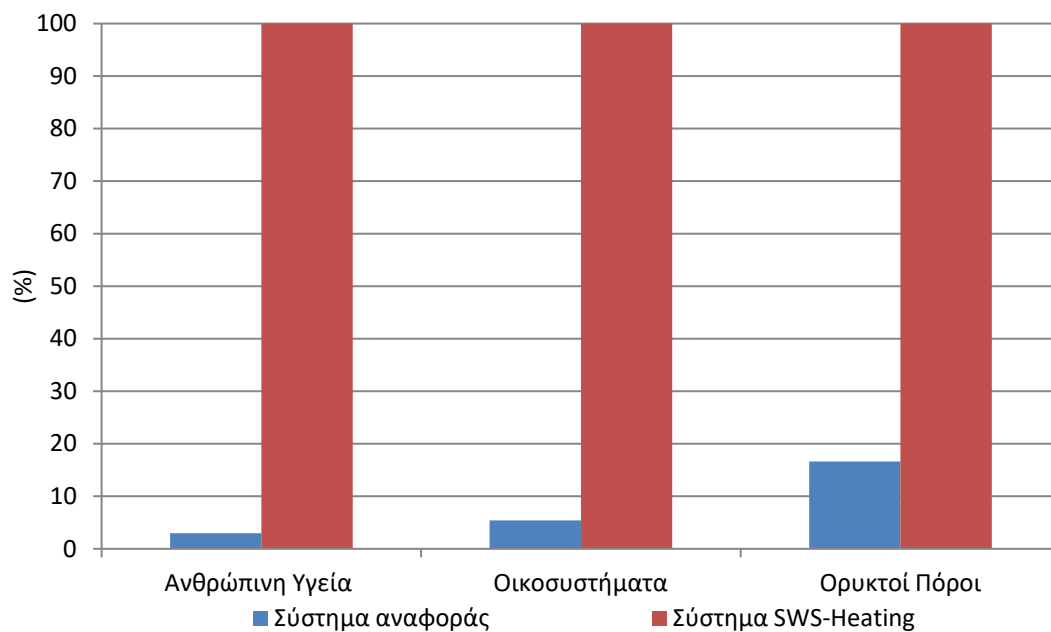
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα παρακάτω διαγράμματα, το σύστημα αναφοράς παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε όλες τις κατηγορίες βλάβης, με τον αντίκτυπο αυτού να προσεγγίζει ένα μέγιστο το οποίο είναι μικρότερο από το 30% του αντικτύπου του συστήματος SWS-Heating, και το οποίο αντιστοιχεί στην κατηγορία των ορυκτών πόρων για εγκατάσταση στη Γερμανία. Στην περίπτωση της Σουηδίας, η εικόνα είναι ακόμη πιο ευνοϊκή για το σύστημα αναφοράς, με την αντίστοιχη τιμή να είναι ίση με 20%. Ο αυξημένος αντίκτυπος του συστήματος αναφοράς στη συγκεκριμένη κατηγορία οφείλεται στην αυξημένη κατανάλωση φυσικού αερίου του συστήματος αναφοράς (Πιν. 3.4 και Πιν. 3.5). Στις υπόλοιπες κατηγορίες, η επίπτωση του συστήματος αναφοράς κυμαίνεται από 5.2% έως 10.1% και από 3.0% έως 5.4% της αντίστοιχης του συστήματος SWS-Heating, για εγκατάσταση στη Γερμανία και τη Σουηδία αντίστοιχα, υποδεικνύοντας τη σχετικά κακή περιβαλλοντική απόδοση του τελευταίου.

Βάση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στον Πιν. 4.2, σημειώνεται ότι εν γένει, το σύστημα SWS-Heating παρουσιάζει υψηλότερη επίπτωση κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με το σύστημα αναφοράς, με μόνη εξαίρεση την κατηγορία της εξάντλησης των ορυκτών πόρων, όπου η επίπτωση των συστημάτων διαφέρει κατά δύο τάξεις μεγέθους, λόγω της μάζας των πρώτων υλών του συστήματος. Σε αυτό το σημείο ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το υπό εξέταση σύστημα βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και επομένως το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητάς του (Technology Readiness Level – TRL) είναι χαμηλό, ενώ εν γένει, τα συστήματα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας τα οποία βασίζονται σε θερμοχημικά υλικά, βρίσκονται σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο, παρά των ελκυστικών εφαρμογών τους [85, 86]. Αντίθετα, το σύστημα αναφοράς αποτελεί μία ώριμη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών, όπως στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη, καθώς και στον Καναδά [87, 88].

Τα αποτελέσματα για τις δύο λειτουργικές μονάδες είναι ανάλογα, οπότε τα σχόλια είναι κοινά.



Εικ. 4.6 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”



Εικ. 4.7 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”

Πιν. 4.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία Επίπτωσης	Ρέγκενσμπουργκ		Στοκχόλμη	
	Σύστημα SWS-Heating Λ.Μ.:1 kWh (1 m <sup>2</sup> )	Σύστημα αναφοράς Λ.Μ.:1 kWh (1 m <sup>2</sup> )	Σύστημα SWS-Heating Λ.Μ.:1 kWh (1 m <sup>2</sup> )	Σύστημα αναφοράς Λ.Μ.:1 kWh (1 m <sup>2</sup> )
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	2.97 (1.859·10 <sup>3</sup> )	7.53·10 <sup>-1</sup> (4.722·10 <sup>2</sup> )	3.88 (3.423·10 <sup>3</sup> )	5.34·10 <sup>-1</sup> (4.709·10 <sup>2</sup> )
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.49·10 <sup>-6</sup> (1.563·10 <sup>-3</sup> )	2.87·10 <sup>-7</sup> (1.797·10 <sup>-4</sup> )	3.15·10 <sup>-6</sup> (2.780·10 <sup>-3</sup> )	1.80·10 <sup>-7</sup> (1.587·10 <sup>-4</sup> )
Κατανάλωση νερού (m <sup>3</sup> )	2.88·10 <sup>-2</sup> (1.803·10 <sup>1</sup> )	2.46·10 <sup>-3</sup> (1.545)	4.01·10 <sup>-2</sup> (3.544·10 <sup>1</sup> )	2.37·10 <sup>-3</sup> (2.090)
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.16·10 <sup>-1</sup> (7.247·10 <sup>1</sup> )	7.16·10 <sup>-3</sup> (4.489)	1.65·10 <sup>-1</sup> (1.455·10 <sup>2</sup> )	7.79·10 <sup>-3</sup> (6.874)
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg oil <sub>eq</sub> )	7.38·10 <sup>-1</sup> (4.625·10 <sup>2</sup> )	2.23·10 <sup>-1</sup> (1.395·10 <sup>2</sup> )	9.66·10 <sup>-1</sup> (8.526·10 <sup>2</sup> )	1.65·10 <sup>-1</sup> (1.453·10 <sup>2</sup> )
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	3.00·10 <sup>-1</sup> (1.881·10 <sup>2</sup> )	6.52·10 <sup>-3</sup> (4.091)	4.18·10 <sup>-1</sup> (3.693·10 <sup>2</sup> )	5.76·10 <sup>-3</sup> (5.081)

## 4.2 Μελέτη σεναρίων

### 4.2.1 Επίδραση της τοποθεσίας εγκατάστασης

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος SWS-Heating για την περίπτωση εγκατάστασης αυτού σε διαφορετικές τοποθεσίες. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από το βασικό σενάριο εγκατάστασης στο Ρέγκενσμπουργκ και τη Στοκχόλμη, εξετάζεται η εγκατάσταση αυτού στην Ελβετία, τη Ρουμανία, την Ιρλανδία και την Πολωνία, στις πόλεις της Ζυρίχης, του Βουκουρεστίου, του Δουβλίνου και της Βαρσοβίας, αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαστασιολόγηση του συστήματος και τα ακριβή τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού για τις διάφορες τοποθεσίες προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων στα πλαίσια του ερευνητικού έργου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αντιστοιχούν κυρίως στη βασική λειτουργική μονάδα, ίση με 1 kWh παραγόμενης θερμικής ενέργειας, ενώ δείχνουν ποσοτικά την επίδραση της διαφορετικών θερμικών φορτίων στην εκάστοτε τοποθεσία εγκατάστασης, της μάζας του προσροφητικού υλικού, του ενεργειακού μείγματος κάθε χώρας, καθώς και των διαφορετικών αποστάσεων μεταφοράς των συνιστωσών του συστήματος από την τοποθεσία κατασκευής αυτών, στις διαφορετικές τοποθεσίες εγκατάστασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις, ο σημαντικότερος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει τον αντίκτυπο του συστήματος σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων είναι η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης, σύμφωνα με τα διαγράμματα των Εικ. 4.3 και Εικ. 4.4 που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εγκατάσταση του συστήματος να ευνοείται στις τοποθεσίες όπου απαιτείται η μικρότερη μάζα προσροφητικού υλικού, καθώς στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, η απόδοση του συστήματος είναι ανάλογη της μάζας αυτού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο υψηλότερος αντίκτυπος από τη λειτουργία του συστήματος, σε όλες σχεδόν τις υπό εξέταση κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται για εγκατάσταση στη Βαρσοβία της Πολωνίας (Εικ. 4.10). Το σύστημα, σε αυτή την περίπτωση περιλαμβάνει την ίδια ποσότητα προσροφητικού υλικού ( $\approx 4$  τόνοι) με την περίπτωση της Στοκχόλμης, στη Σουηδία. Ωστόσο, οι χαμηλότερες απαιτήσεις σε θέρμανση και ΖΝΧ στη Βαρσοβία (περίπου ίσες με το 87% των αντιστοίχων στη Στοκχόλμη), είναι η κύρια αιτία για την οποία το η λειτουργία του συστήματος παρουσιάζει χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της Εικ. 4.10, η μόνη κατηγορία στην οποία η Σουηδία παρουσιάζει υψηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, είναι η κατηγορία της ιονίζουσας ακτινοβολίας, το οποίο οφείλεται στο ενεργειακό μείγμα αυτής, όπως περιγράφηκε παραπάνω (ενότητα 4.1.1). Κάποιες αποκλίσεις από τον παραπάνω κανόνα μπορούν να παρατηρηθούν, όπως για παράδειγμα ο υψηλότερος αντίκτυπος της Ιρλανδίας σε σύγκριση με την Ελβετία, στην κατηγορία της εξάντλησης των ορυκτών πόρων, παρά το γεγονός ότι το σύστημα για εγκατάσταση στην Ιρλανδία περιλαμβάνει περίπου 500 κιλά προσροφητικού υλικού λιγότερα. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στη διαφορά των θερμικών φορτίων για τις

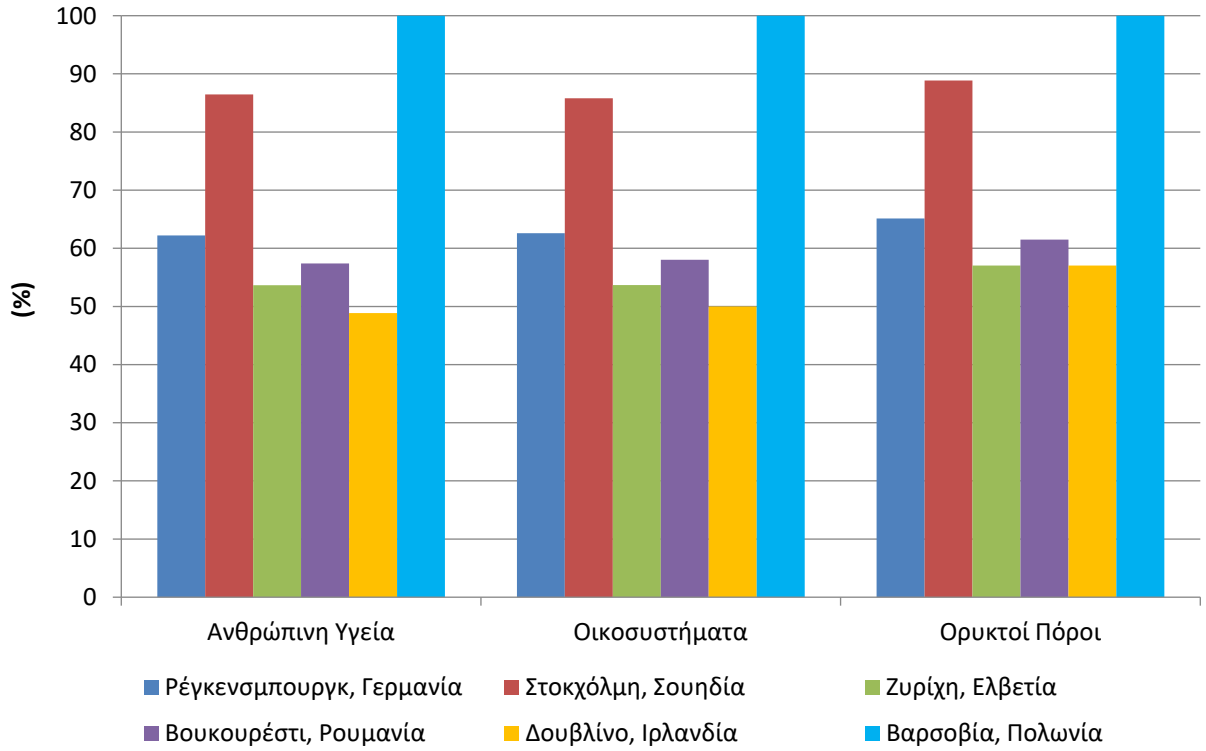
δύο χώρες, σε συνδυασμό με το πιο ρυπογόνο ενεργειακό μείγμα της Ιρλανδίας. Παρ' όλα αυτά, η Ιρλανδία παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση στην πλειοψηφία των υπό εξέταση κατηγοριών επιπτώσεων.

Σε επίπεδο "endpoint" (Εικ. 4.8), παρατηρείται παρόμοια εικόνα με τα αποτελέσματα του επιπέδου "midpoint", με τις επιπτώσεις μεταξύ των διαφόρων χωρών να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις της τάξης του 50% κατά μέγιστο, σε όλες τις κατηγορίες βλαβών, με την Ιρλανδία να παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση σε όλες τις κατηγορίες και την Ελβετία να ακολουθεί, παρουσιάζοντας περίπου την ίδια επίδοση στην κατηγορία των ορυκτών πόρων, ως αποτέλεσμα του ενεργειακού μείγματος της πρώτης, το οποίο βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα. Η χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση παρουσιάζεται από την Πολωνία, όπου παρατηρείται μικρή διαφορά, η οποία κυμαίνεται από 11% έως 14%, από την αμέσως επόμενη χώρα (Σουηδία) για όλες τις κατηγορίες βλάβης.

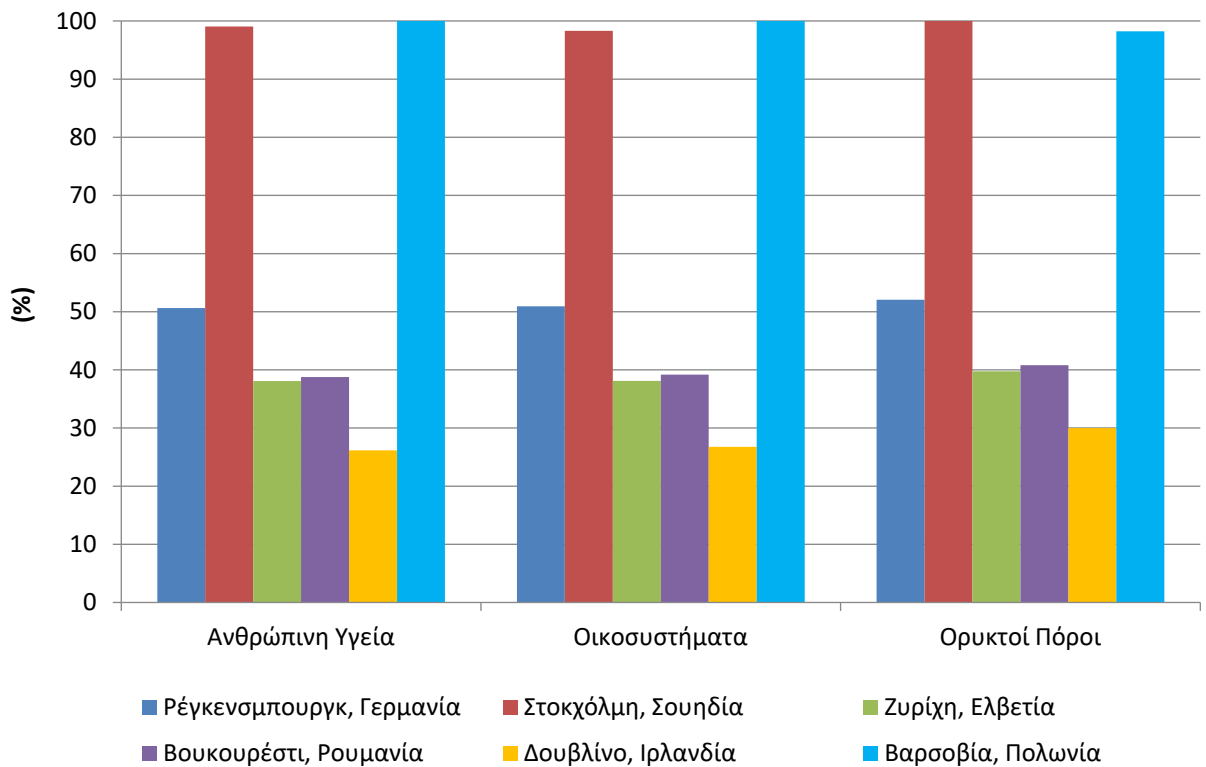
Εξετάζοντας τα αποτελέσματα με τη χρήση της δεύτερης λειτουργικής μονάδας, δηλαδή ανά  $m^2$  επιφάνειας του κτηρίου (Εικ. 4.9), παρατηρείται παρόμοια εικόνα με το διάγραμμα της Εικ. 4.8. Η Πολωνία παρουσιάζει τον υψηλότερο αντίκτυπο στις κατηγορίες της ανθρώπινης υγείας και των οικοσυστημάτων, ενώ στην κατηγορία των ορυκτών πόρων τον υψηλότερο αντίκτυπο παρουσιάζει η Σουηδία. Ωστόσο, οι διαφορές στην περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος, μεταξύ των δύο χωρών με τη συγκεκριμένη λειτουργική μονάδα είναι μικρότερη του 2%, για όλες τις κατηγορίες βλάβης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι εκφράζοντας τα αποτελέσματα ανά  $m^2$  επιφάνειας του κτηρίου, οι υψηλότερες θερμικές απαιτήσεις αυτού για την περίπτωση της Σουηδίας δε λαμβάνονται πλήρως υπόψη στα αποτελέσματα.

Πιν. 4.3 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο "endpoint"

Κατηγορία Επίπτωσης	Γερμανία	Σουηδία	Ελβετία	Ρουμανία	Ιρλανδία	Πολωνία
<b>Λειτουργική μονάδα</b>	<b>1 kWh</b>					
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$3.96 \cdot 10^{-5}$	$2.46 \cdot 10^{-5}$	$2.63 \cdot 10^{-5}$	$2.24 \cdot 10^{-5}$	$4.58 \cdot 10^{-5}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$4.00 \cdot 10^{-8}$	$2.50 \cdot 10^{-8}$	$2.71 \cdot 10^{-8}$	$2.33 \cdot 10^{-8}$	$4.67 \cdot 10^{-8}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$3.37 \cdot 10^{-1}$	$2.17 \cdot 10^{-1}$	$2.33 \cdot 10^{-1}$	$2.16 \cdot 10^{-1}$	$3.80 \cdot 10^{-1}$
<b>Λειτουργική μονάδα</b>	<b>1 m<sup>2</sup></b>					
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$1.79 \cdot 10^{-2}$	$3.49 \cdot 10^{-2}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	$9.23 \cdot 10^{-3}$	<b><math>3.53 \cdot 10^{-2}</math></b>
Οικοσυστήματα (species·yr)	$1.83 \cdot 10^{-5}$	$3.53 \cdot 10^{-5}$	$1.37 \cdot 10^{-5}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$9.62 \cdot 10^{-6}$	<b><math>3.59 \cdot 10^{-5}</math></b>
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$1.55 \cdot 10^2$	<b><math>2.98 \cdot 10^2</math></b>	$1.18 \cdot 10^2$	$1.21 \cdot 10^2$	$8.93 \cdot 10^1$	$2.92 \cdot 10^2$

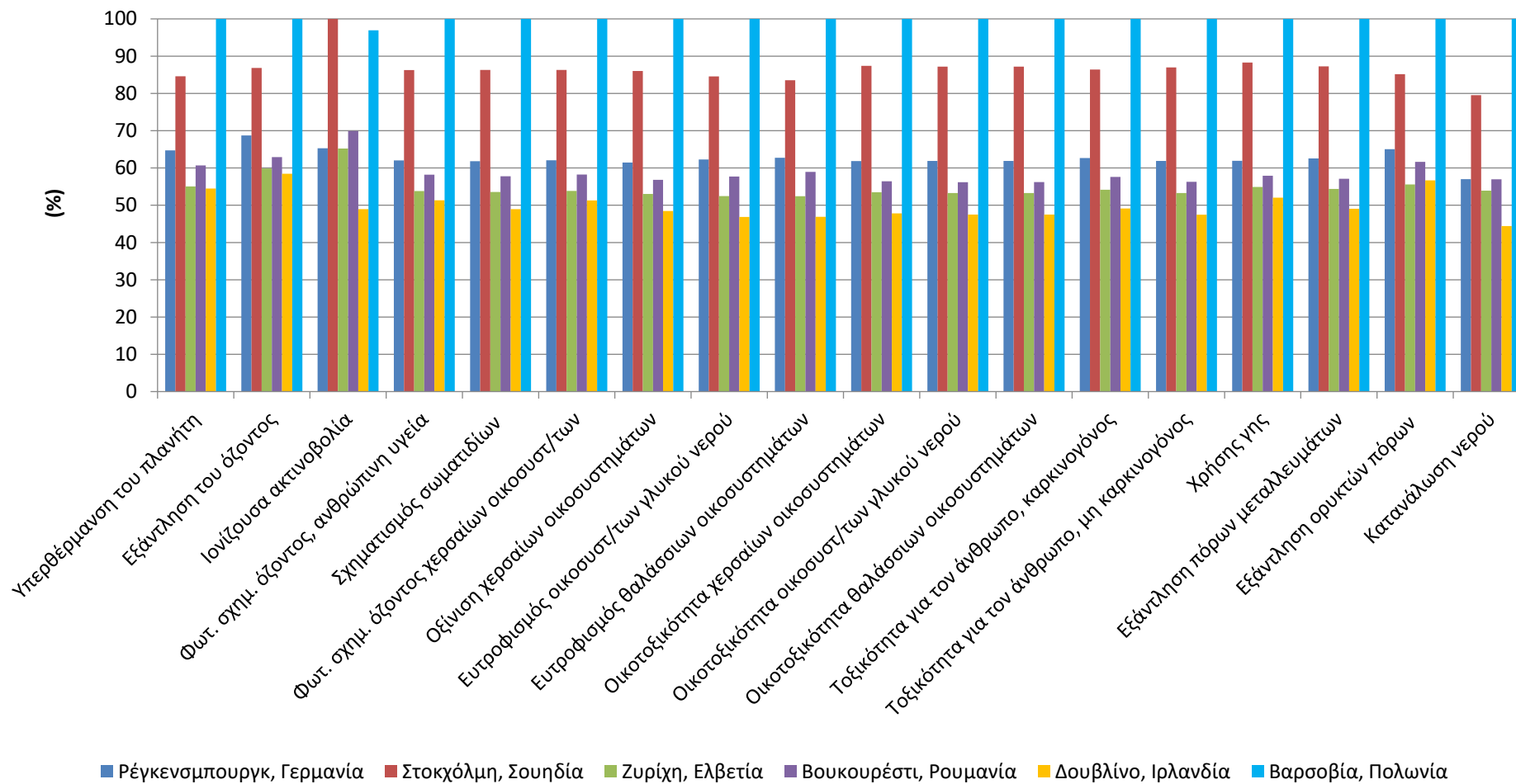


Εικ. 4.8 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating (Λ.Μ. 1 kWh) για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες, σε επίπεδο "endpoint"



Εικ. 4.9 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating (Λ.Μ. 1 m²) για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες, σε επίπεδο "endpoint"

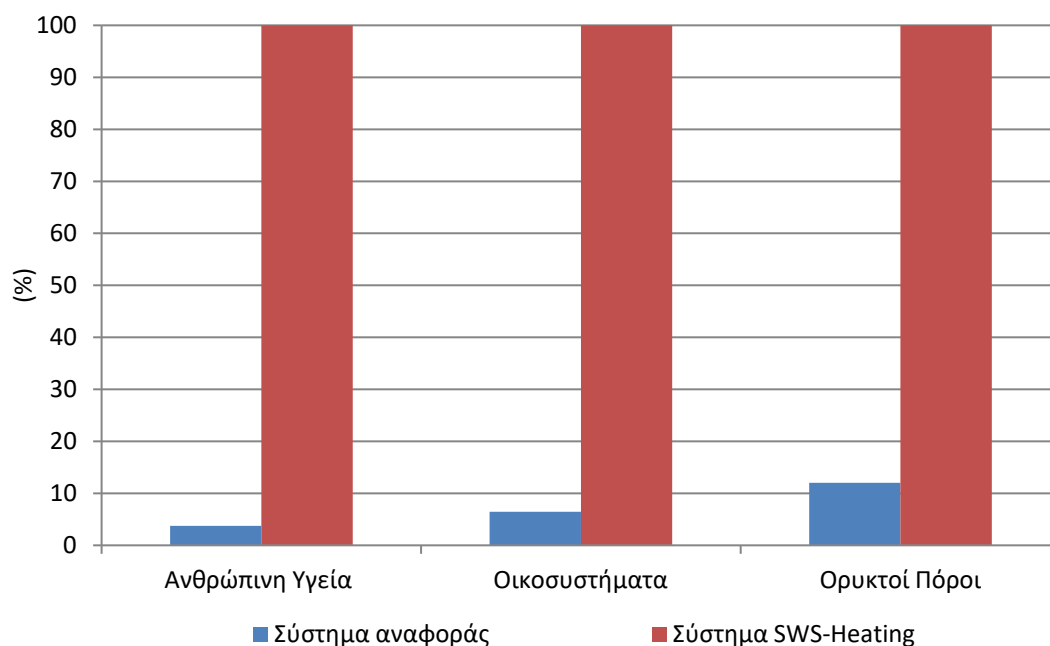




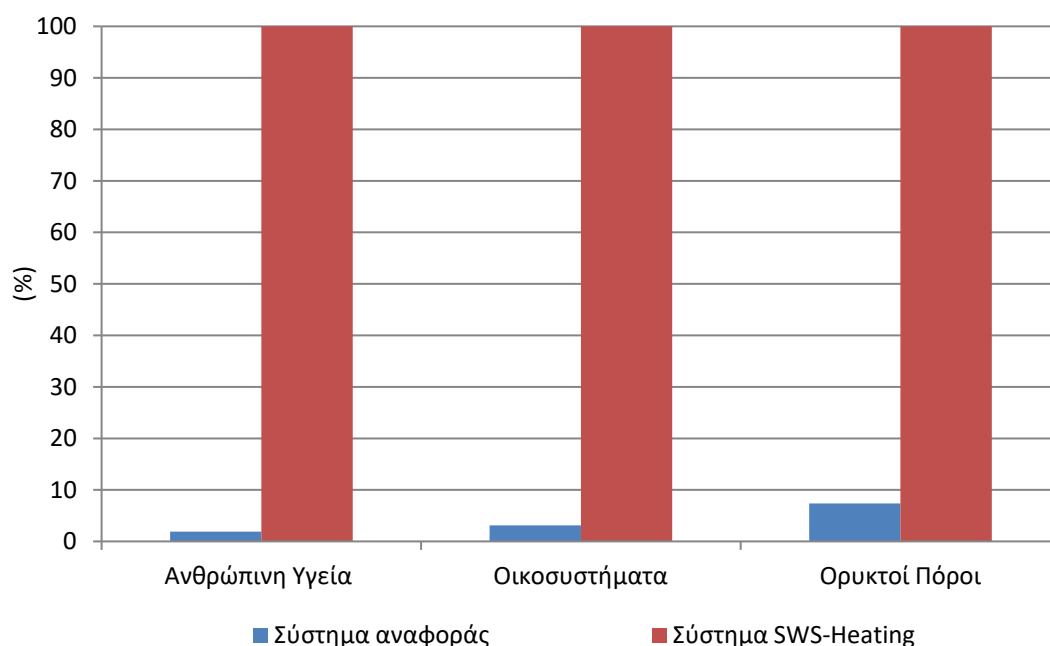
Εικ. 4.10 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating (Λ.Μ. 1kWh) για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες, σε επίπεδο “midpoint”

#### 4.2.2 Σύγκριση με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η απόδοση του συστήματος συγκρίνεται με μία βελτιστοποιημένη εκδοχή του συστήματος αναφοράς. Η διαστασιολόγηση και οι καταναλώσεις αυτού παρουσιάζονται στον Πιν. 4.4. Προφανώς, αναμένεται μεγαλύτερη διαφορά στην περιβαλλοντική απόδοση μεταξύ του συστήματος SWS-Heating και του συγκεκριμένου συστήματος, σε σχέση με το προηγούμενο σύστημα αναφοράς. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (Εικ. 4.11 και Εικ. 4.12), ο αντίκτυπος του βελτιστοποιημένου συστήματος αναφοράς και στις τρεις κατηγορίες βλάβης κυμαίνεται, για εγκατάσταση στη Γερμανία, από 3.7% (για την κατηγορία της ανθρώπινης υγείας) έως 12.0% (για την κατηγορία των ορυκτών πόρων) του αντίστοιχου αντικτύπου του συστήματος SWS-Heating και για εγκατάσταση στη Σουηδία, από 1.9% έως 7.4% για τις κατηγορίες της ανθρώπινης υγείας και των ορυκτών πόρων, αντίστοιχα. Η σημαντική μείωση στον αντίκτυπο του βελτιστοποιημένου συστήματος αναφοράς σε σύγκριση με την παραπάνω εξεταζόμενη λύση, οφείλεται κυρίως στην πολύ χαμηλότερη κατανάλωση φυσικού αερίου αυτού, η οποία είναι χαμηλότερη ακόμα και από την αντίστοιχη του συστήματος SWS, τόσο για λειτουργία στη Γερμανία όσο και για λειτουργία στη Σουηδία. Σημειώνεται ότι η παρούσα σύγκριση είναι εν μέρει μη έγκυρη, καθώς ένα βελτιστοποιημένο εμπορικό σύστημα συγκρίνεται με ένα σύστημα το οποίο βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης και του οποίου η στρατηγική ελέγχου δε συμπεριλαμβάνεται σε αυτήν τη μελέτη, βάση επίσης του χαμηλού επιπέδου τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) αυτού. Ωστόσο, κρίθηκε άξιο έρευνας, προκειμένου να επισημανθεί, με ποσοτικό τρόπο, το μέγεθος της βελτίωσης στην περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος, η οποία προκύπτει μόνο από τη βελτιστοποίηση της φάσης χρήσης και την αντίστοιχη μείωση της εξάρτησης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.



Εικ. 4.11 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”



Εικ. 4.12 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”

Πιν. 4.4 Διαστασιολόγηση και ετήσια κατανάλωση ενέργειας του βελτιστοποιημένου συστήματος αναφοράς

	Ρέγκενσμπουργκ	Στοκχόλμη	
Συνιστώσα/Παράμετρος λειτουργίας	Τιμή		Μονάδα μέτρησης
Δεξαμενή αποθήκευσης	49.5	53.5	m <sup>3</sup>
Επίπεδοι συλλέκτες	10.8	14.5	m <sup>2</sup>
Δοχείο αδράνειας, κυκλοφορητές, λέβητας φ.α.	Κοινά με το σύστημα αναφοράς		
Κατανάλωση φυσικού αερίου	1660	2348	(kWh/έτος)
Κατανάλωση ηλεκτρισμού	797	812	(kWh/έτος)
Ηλιακό κλάσμα	60.3	60.3	(%)

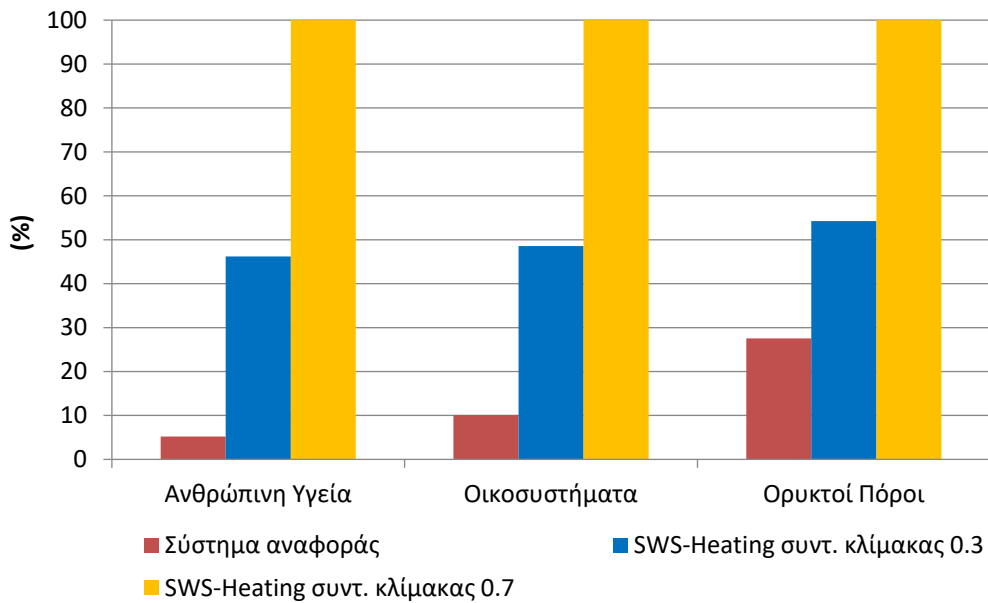
### 4.2.3 Επίδραση του συντελεστή κλίμακας

Από τις προηγούμενες ενότητες γίνεται σαφής ο κυρίαρχος ρόλος της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης στα συνολικά αποτελέσματα του συστήματος. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη έναν διαφορετικό συντελεστή κλίμακας για τη μετάβαση από τις πρωτότυπες μονάδες στο τελικό εμπορικά διαθέσιμο σύστημα. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της μείωσης της τιμής του συντελεστή, ο οποίος θεωρείται ίσος με 0.3 για την παρούσα ανάλυση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή θεωρείται μία σημαντικά αισιόδοξη επιλογή, λαμβάνοντας υπόψη τον τρέχοντα σχεδιασμό του συστήματος.

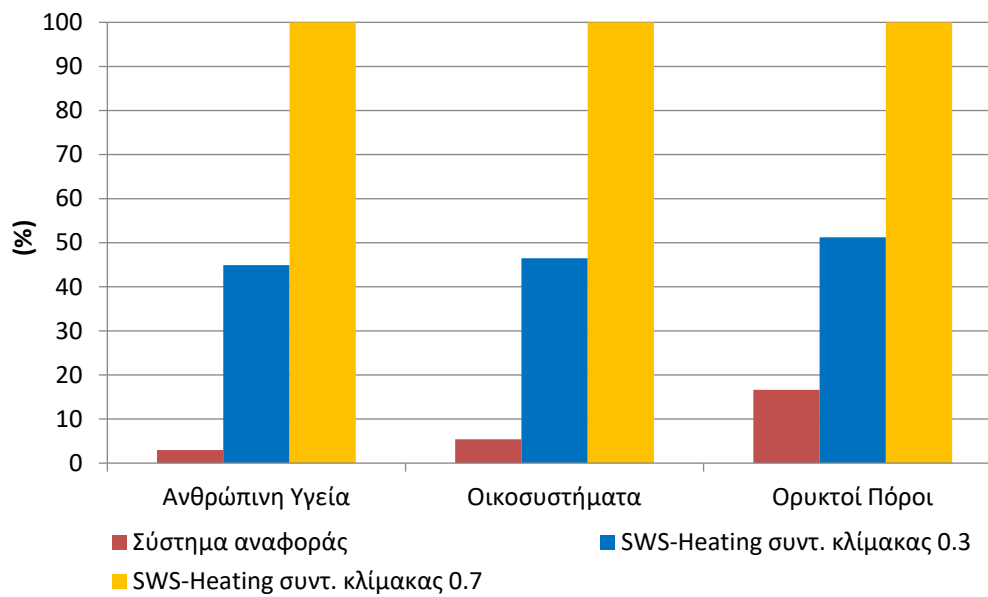
Όπως γίνεται φανερό από τα παρακάτω διαγράμματα (Εικ. 4.15 και Εικ. 4.16), παρά τη μείωση του αντίκτυπου της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης, η συνεισφορά της στο συνολικό αποτύπωμα του συστήματος, για την περίπτωση εγκατάστασης στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, παραμένει υψηλότερη από 50%, ανά παραγόμενη θερμική kWh σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Στην περίπτωση της Στοκχόλμης, η αντίστοιχη ελάχιστη συνεισφορά είναι ίση με 63.3%, ενώ και στις δύο περιπτώσεις αντιστοιχεί στην κατηγορία της εξάντλησης του όζοντος, όπου ο αντίκτυπος των ηλιακών συλλεκτών είναι αυξημένος. Συγκεκριμένα, οι ηλιακοί συλλέκτες ευθύνονται για το 29.5% και το 23.7% του συνολικού αντίκτυπου του συστήματος, για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ και τη Στοκχόλμη, αντίστοιχα.

Σε επίπεδο “endpoint” (Εικ. 4.13 και Εικ. 4.14), όπου συμπεριλαμβάνεται και ο αντίκτυπος του συστήματος αναφοράς για εποπτικούς λόγους, παρατηρείται ότι η μείωση του συντελεστή κλίμακας, έχει ως αποτέλεσμα ο αντίκτυπος του συστήματος να παρουσιάζει μία μείωση της τάξης του 50% σε σχέση με το βασικό σενάριο (συντελεστής κλίμακας 0.7). Ειδικότερα, για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, ο χαμηλότερος αντίκτυπος παρουσιάζεται για την κατηγορία της ανθρώπινης υγείας, όπου είναι ίσος με το 46.2% του αντιστοίχου του βασικού σεναρίου, ενώ ο υψηλότερος παρουσιάζεται για την κατηγορία των ορυκτών πόρων, όπου αντιστοιχεί στο 54.3% αυτού. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε επίπεδο “endpoint” για το βασικό σενάριο (Εικ. 4.1 και Εικ. 4.2), όπου η συνεισφορά της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης στο συνολικό αντίκτυπο είναι υψηλότερη για την κατηγορία ανθρώπινης υγείας και χαμηλότερη για την κατηγορία των ορυκτών πόρων. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και για την περίπτωση εγκατάστασης στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, όπου τα αντίστοιχα ποσοστά είναι ίσα με 44.9% και 51.2%.

Ωστόσο, επισημαίνεται ότι και για τις δύο περιπτώσεις η μείωση του συντελεστή κλίμακας δεν είναι ικανή να καταστήσει την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος ανταγωνιστική σε σχέση με το σύστημα αναφοράς, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του οποίου παραμένει κατά μέγιστο περίπου ίσο με το ήμισυ του συστήματος SWS-Heating, αποτέλεσμα το οποίο αντιστοιχεί στην κατηγορία των ορυκτών πόρων.



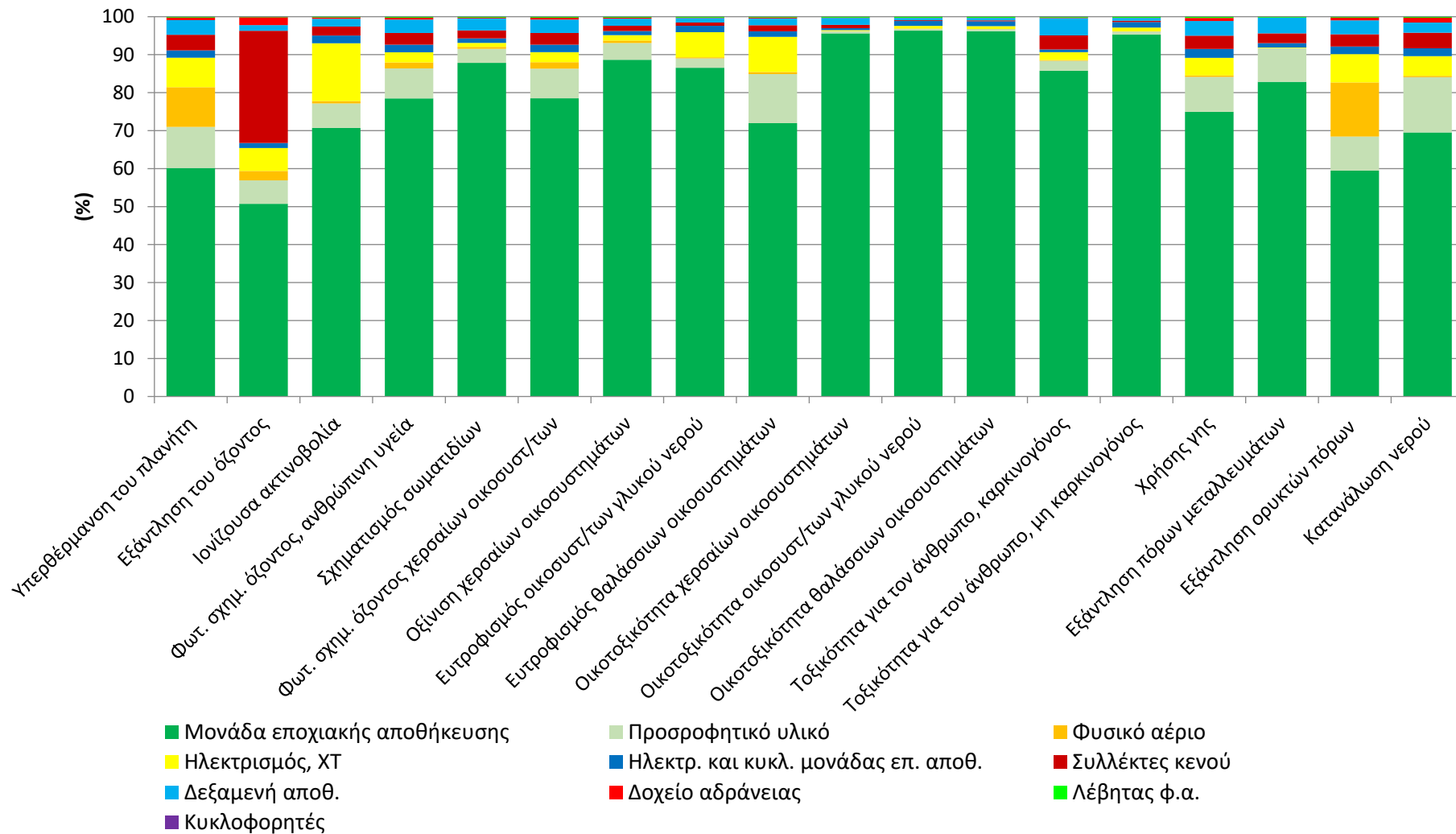
Εικ. 4.13 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”



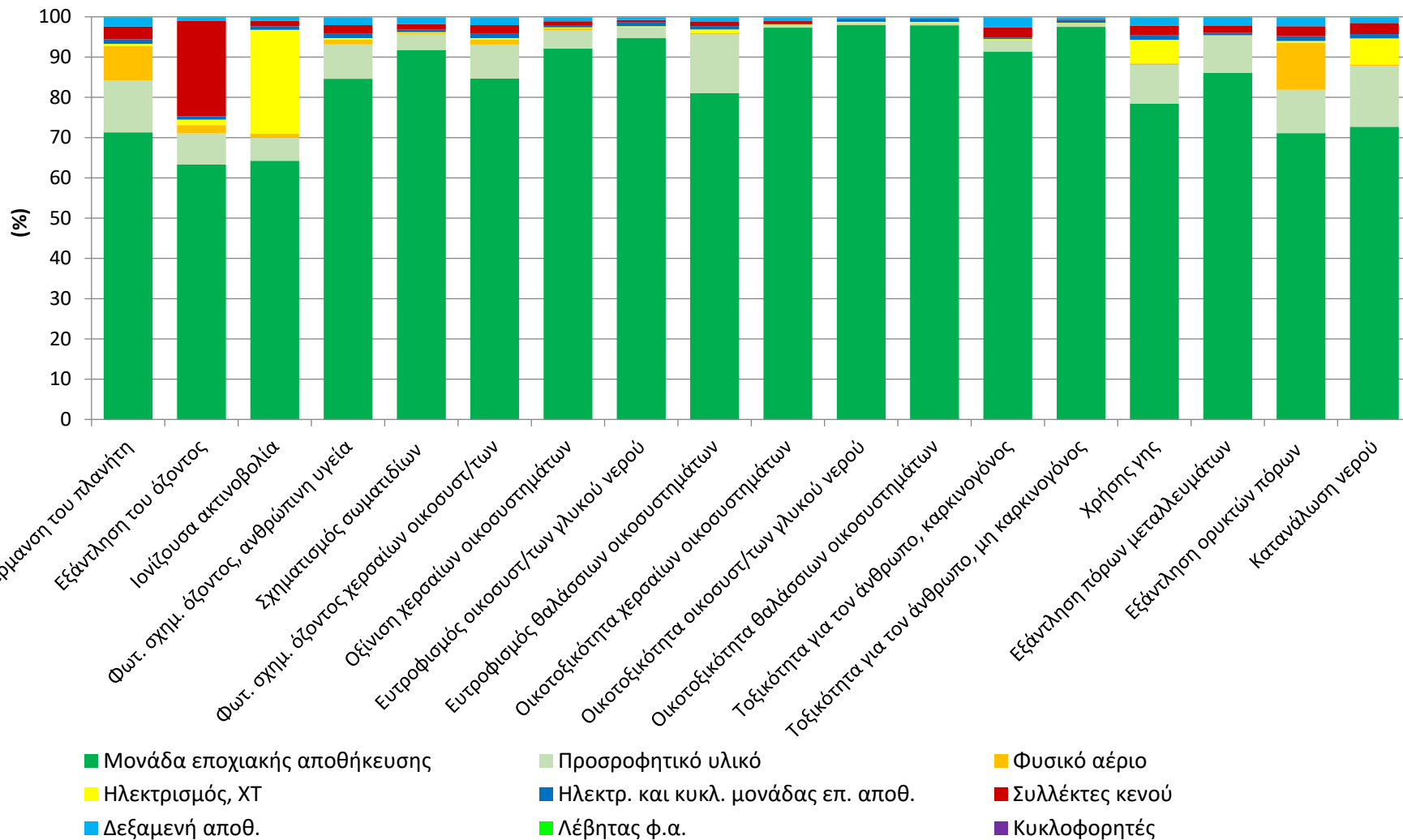
Εικ. 4.14 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”

Πιν. 4.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating, λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, ανά λειτουργική μονάδα και για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία Επίπτωσης	Ρέγκενσμπουργκ Λ.Μ.:1 kWh (1 m <sup>2</sup> )	Στοκχόλμη Λ.Μ.:1 kWh (1 m <sup>2</sup> )
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	1.65 (1.032·10 <sup>3</sup> )	1.99 (1.755·10 <sup>3</sup> )
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	1.49·10 <sup>-6</sup> (9.321·10 <sup>-4</sup> )	1.71·10 <sup>-6</sup> (1.508·10 <sup>-3</sup> )
Κατανάλωση νερού (m <sup>3</sup> )	1.49·10 <sup>-2</sup> (9.359)	2.04·10 <sup>-2</sup> (1.800·10 <sup>1</sup> )
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	5.78·10 <sup>-2</sup> (3.624·10 <sup>1</sup> )	8.05·10 <sup>-2</sup> (7.110·10 <sup>1</sup> )
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg oil <sub>eq</sub> )	4.11·10 <sup>-1</sup> (2.579·10 <sup>2</sup> )	4.96·10 <sup>-1</sup> (4.376·10 <sup>2</sup> )
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	1.43·10 <sup>-1</sup> (8.397·10 <sup>1</sup> )	1.95·10 <sup>-1</sup> (1.720·10 <sup>2</sup> )



Εικ. 4.15 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας για συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε επίπεδο “midpoint”



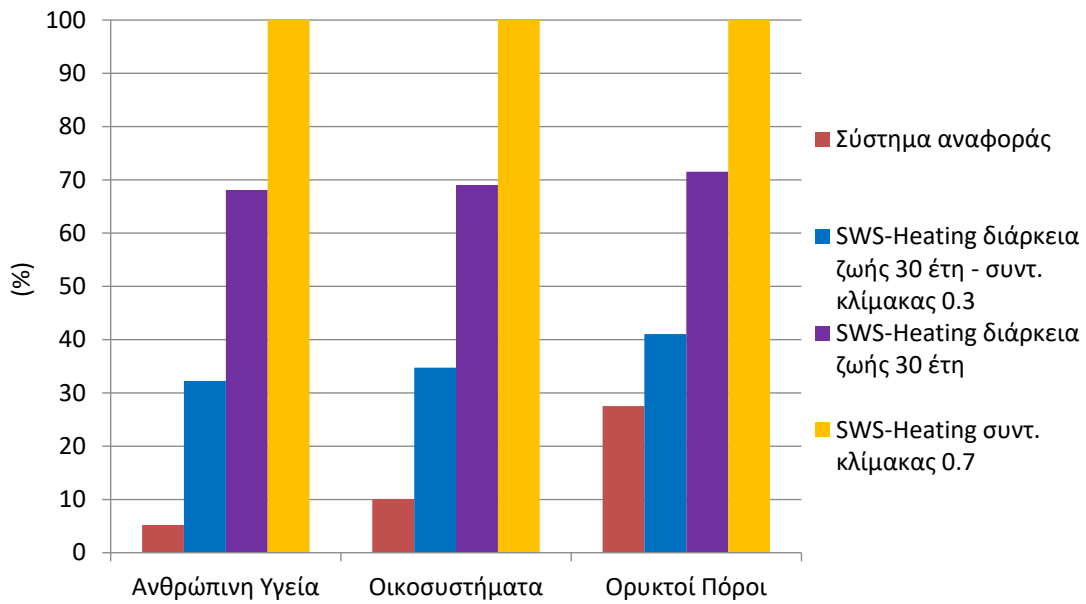
Εικ. 4.16 Συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας για συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε επίπεδο "midpoint"



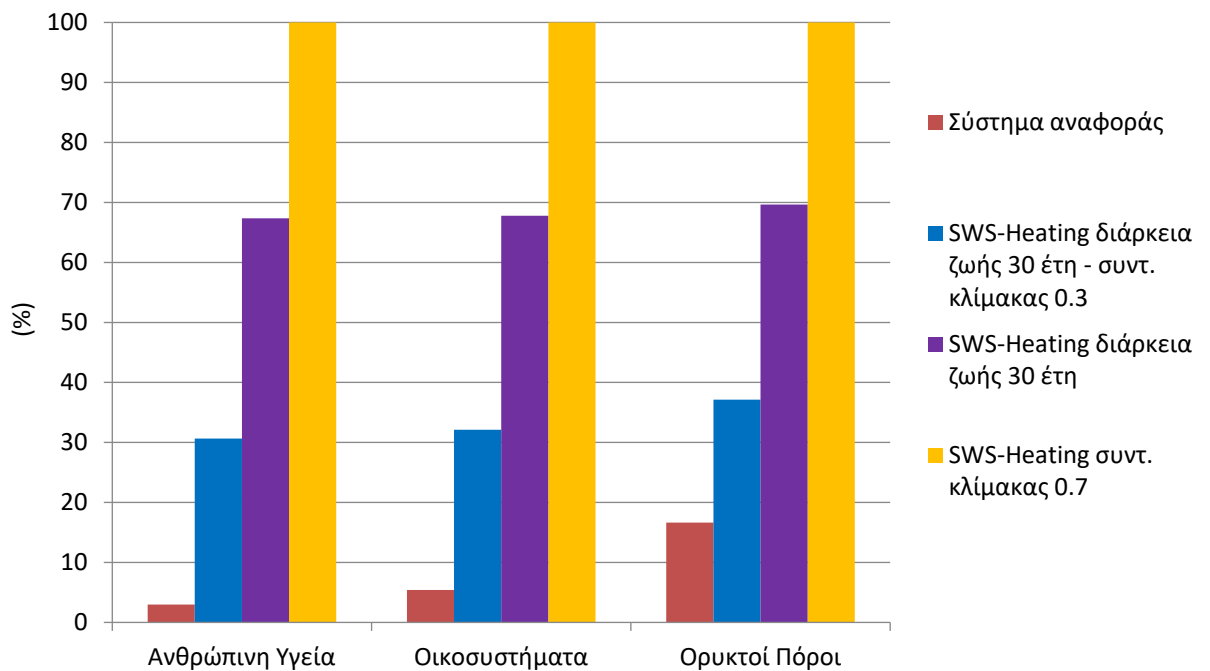
#### 4.2.4 Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος

Σε αυτήν την ενότητα, διερευνάται η επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος στην περιβαλλοντική απόδοση αυτού. Συγκεκριμένα, η διάρκεια ζωής της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης (εξαιρουμένων των ηλεκτρονικών μερών και των κυκλοφορητών), καθώς και του προσροφητικού υλικού θεωρείται ίση με 30 χρόνια, το οποίο αποτελεί μία αύξηση δέκα ετών σε σχέση με την αρχική εκτίμηση. Στα διαγράμματα που ακολουθούν περιλαμβάνεται μια επιπλέον περίπτωση, η οποία αποτελεί συνδυασμό της ανάλυσης ευαισθησίας της προηγούμενης ενότητας με την παρούσα, δηλαδή εξετάζεται η απόδοση του συστήματος για διάρκεια ζωής ίση με 30 έτη και για συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μόνο σε επίπεδο “endpoint”, προκειμένου να παρέχεται μια πιο σαφής εικόνα της περιβαλλοντικής απόδοσης των συστημάτων.

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα (Εικ. 4.17 και Εικ. 4.18), η αύξηση της διάρκειας ζωής της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης και του προσροφητικού υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αντίκτυπου του συστήματος κατά περίπου 30% σε όλες τις κατηγορίες βλαβών, για εγκατάσταση τόσο στη Γερμανία όσο και στη Σουηδία. Αυτό συνιστά σε μια σημαντική βελτίωση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί αποκλειστικά εξασφαλίζοντας ότι το προσροφητικό υλικό και τα αντίστοιχα εξαρτήματα της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης (εναλλάκτες θερμότητας, βαλβίδες κενού κ.λπ.) μπορούν να διατηρήσουν τη λειτουργικότητά τους για επιπλέον 10 έτη. Λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη διάρκεια ζωής, ο αντίκτυπος του συστήματος μειώνεται ακόμα περισσότερο, παρουσιάζοντας μείωση έως 68% και 70% σε σχέση με το βασικό σενάριο (για την κατηγορία της ανθρώπινης υγείας) για εγκατάσταση στη Γερμανία και τη Σουηδία, αντίστοιχα. Ωστόσο, ακόμα και με αυτές τις υποθέσεις, ο αντίκτυπος του συστήματος παραμένει σημαντικά υψηλότερος από το αντίστοιχο του συστήματος αναφοράς, με τη μόνη κατηγορία όπου μπορεί να παρατηρηθεί κάποια βελτίωση και όπου η απόδοση των συστημάτων είναι συγκρίσιμη, να είναι η κατηγορία των ορυκτών πόρων. Σε αυτή την κατηγορία και για εγκατάσταση στη Γερμανία, ο αντίκτυπος του συστήματος είναι κατά περίπου 50% υψηλότερος σε σχέση με το σύστημα αναφοράς.



Εικ. 4.17 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή κλίμακας ίσο με 0.3, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”



Εικ. 4.18 Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή διάρκεια ζωής ίση με 30 έτη, σε αναφορά με το βασικό σενάριο για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η περιβαλλοντική απόδοση ενός καινοτόμου, ηλιακά τροφοδοτούμενου, συστήματος παροχής θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης με εποχιακή αποθήκευση θερμότητας σε προσροφητικό μέσο. Όσον αφορά το βασικό σενάριο, δηλαδή την εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και τη Στοκχόλμη της Σουηδίας, διαπιστώνεται η κυρίαρχη επίδραση της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτού, ως αποτέλεσμα της μεγάλης μάζας πρώτων υλών – κυρίως χάλυβα και χαλκού – από τις οποίες αποτελείται. Προκειμένου να βελτιωθεί η περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος SWS-Heating, αποτελεί πρωταρχικό στόχο η αύξηση της χωρητικότητας (σε προσροφητικό υλικό) των μονάδων εποχιακής αποθήκευσης, ώστε να μειωθεί η συνολική μάζα του συστήματος διατηρώντας τα χαρακτηριστικά απόδοσής του. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι απαραίτητες αλλαγές και στο σχεδιασμό του συστήματος, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των εναλλακτών θερμότητας που το απαρτίζουν. Όσον αφορά τη σύγκριση του συστήματος SWS-Heating, έναντι ενός συστήματος το οποίο βασίζεται στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε νερό, υπάρχει μία ξεκάθαρη υπεροχή του τελευταίου σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο τρέχων σχεδιασμός του συστήματος απαιτεί εκτεταμένες βελτιώσεις προκειμένου η λειτουργία αυτού να οδηγήσει σε περιβαλλοντικό όφελος.

Η μελέτη επίδρασης της τοποθεσίας εγκατάστασης του συστήματος έδειξε, όπως αναμενόταν, ότι η απόδοση αυτού είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μάζα του προσροφητικού υλικού την οποία περιλαμβάνει η διάταξη. Ως αποτέλεσμα, η Ιρλανδία αποτελεί την ευνοϊκότερη επιλογή, καθώς σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η μικρότερη μάζα προσροφητικού. Αντίστοιχα, οι τοποθεσίες που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι η Πολωνία και η Σουηδία, όπου και απαιτείται η μεγαλύτερη μάζα προσροφητικού υλικού συγκριτικά με όλες τις υπό εξέταση χώρες. Ωστόσο, η θερμική ζήτηση του κτηρίου και το ενεργειακό μείγμα της χώρας επηρεάζουν και αυτά τα αποτελέσματα, ειδικά στην κατηγορία των ορυκτών πόρων. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση του συστήματος για εγκατάσταση στην Ιρλανδία είναι παρόμοια με αυτή στην Ελβετία, λόγω του βασισμένου σε ορυκτά καύσιμα ενεργειακού μείγματος της πρώτης, γεγονός που μετριάζει τα οφέλη από τη μειωμένη χρήση προσροφητικού υλικού. Μια πτυχή της χρήσης ως λειτουργικής μονάδας της επιφάνειας του κτηρίου ( $1 \text{ m}^2$ ), είναι ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται σημαντικά από τα θερμικά φορτία αυτού. Στην περίπτωση αυτή, ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του συστήματος αναφορικά με τη μάζα του προσροφητικού υλικού. Ως αποτέλεσμα, η διαφορά στην απόδοση μεταξύ της Σουηδίας και της Πολωνίας είναι μικρότερη από 2% ανά  $\text{m}^2$  επιφάνειας δαπέδου και στις τρεις κατηγορίες βλάβης.

Με τη σύγκριση του συστήματος SWS-Heating με μία βελτιστοποιημένη εκδοχή του συστήματος αναφοράς, παρά το γεγονός ότι οδήγησε σε περαιτέρω επιβάρυνση της περιβαλλοντικής εικόνας του πρώτου, υπογραμμίστηκε η πιθανή αύξηση της απόδοσης του συστήματος αποκλειστικά από τη βελτιστοποίηση της φάσης χρήσης και τη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

Η ανάλυση ευαισθησίας η οποία πραγματοποιήθηκε σε αναφορά με τον συντελεστή κλίμακας, αποκάλυψε ότι η μείωση του συντελεστή στην τιμή 0.3, οδηγεί σε σημαντική μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου του συστήματος κατά περίπου 50% σε όλες τις κατηγορίες βλάβης, τόσο για την περίπτωση της Γερμανίας όσο και για την περίπτωση της Σουηδίας. Ωστόσο, παρά τη μείωση αυτή, η απόδοση του συστήματος παραμένει χειρότερη από την αντίστοιχη του συστήματος αναφοράς. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάρκεια ζωής των μονάδων εποχιακής αποθήκευσης καθώς και του προσροφητικού είναι ίση με 30 χρόνια, παρατηρείται μείωση του αντικτύπου κατά περίπου 30%, ενώ αν ληφθεί υπόψη και ο μειωμένος συντελεστής κλίμακας, η συνολική μείωση προσεγγίζει το 70%, για την κατηγορία της ανθρώπινης υγείας, σε σχέση με το βασικό σενάριο. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, ο αντίκτυπος του συστήματος αναφοράς παραμένει χαμηλότερος σε όλες τις κατηγορίες βλάβης.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης αποτελεί τη σημαντικότερη πρόκληση του συστήματος από περιβαλλοντική άποψη. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση αυτού, είναι μείζονος σημασίας η εστίαση στη μείωση της μάζας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση του προσροφητικού υλικού, οδηγώντας σε αύξηση της χωρητικότητας της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης, ενώ ενδεχομένως θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση ορισμένων μεταλλικών συνιστωσών αυτών, με άλλα μη μεταλλικά υλικά, όπως κατάλληλα πλαστικά. Παράλληλα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι σημαντική η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το σύστημα SWS-Heating βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητάς του είναι ακόμα χαμηλό, γεγονός το οποίο δικαιολογεί εν μέρει τα παραπάνω προβλήματα.

## **5.2 Αξιοπιστία δεδομένων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης θα πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν αυτά. Αρχικά, θα πρέπει να εξακριβωθεί η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του συστήματος σε επίπεδο συλλογής αυτών. Έπειτα, η χρήση της βάσης δεδομένων της ecoinvent για τη μοντελοποίηση των συλλεχθέντων δεδομένων εισάγει το ζήτημα της αντιπροσωπευτικότητας αυτής, καθώς τα δεδομένα της αφορούν ήδη εμπορικές τεχνολογίες, ενώ το υπό εξέταση σύστημα βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η συγκεκριμένη βάση δεδομένων είναι από τις πιο αξιόπιστες

και ενημερωμένες σε παγκόσμιο επίπεδο. Ανάλογα, θα πρέπει να διαπιστωθεί και η επιλογή της μεθόδου εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe.

Κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος SWS-Heating, η πλειονότητα των δεδομένων προήλθε από τους συνεργάτες κατασκευαστές στο έργο. Ωστόσο, ορισμένες συνιστώσες αυτού δε συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση λόγω έλλειψης των αντίστοιχων δεδομένων. Επιπλέον, έγιναν ορισμένες προσεγγίσεις κατά την επεξεργασία των παρεχόμενων δεδομένων, με σημαντικότερη την επιλογή του συντελεστή κλίμακας για τη μονάδα εποχιακής αποθήκευσης.

Επομένως, ένα σημείο για περαιτέρω έρευνα, είναι η πλήρης και ακριβής καταγραφή των πρώτων υλών, της προέλευσης αυτών, των κατεργασιών και των διαδικασιών παραγωγής που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του τελικού εμπορικού συστήματος, καθώς και όλων εκείνων των εξαρτημάτων (σωληνώσεις και λοιπά εξαρτήματα) τα χρησιμοποιούνται για την ένωση των επιμέρους συνιστωσών αυτού. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να τονιστεί ότι λόγω των συνθηκών της πανδημίας COVID-19 και των επιπτώσεων αυτής στο έργο, η ανάπτυξη ορισμένων συνιστωσών του συστήματος δεν εξελίχθηκε όπως είχε αρχικά σχεδιαστεί, με αποτέλεσμα τη χρήση, κατά την παρούσα φάση, πιο συμβατικών/ενεργοβόρων τεχνολογιών, οι οποίες ενδεχομένως οδήγησαν σε υποβάθμιση της περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος. Παράλληλα, θα πρέπει να εξεταστεί η λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες και να καταγραφούν με ακρίβεια οι καταναλώσεις φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού του συστήματος, καθώς τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη αποτελούν αποτελέσματα προσομοιώσεων. Αντίστοιχα, οι ίδιες ενέργειες θα πρέπει να γίνουν και για το σύστημα αναφοράς, προκειμένου τα δεδομένα να ανταποκρίνονται όσο το δυνατό περισσότερο στην πραγματική λειτουργία.

Δεδομένων των υψηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων τις οποίες συνεπάγεται η χρήση μετάλλων (όπως χάλυβα και χαλκού), θα ήταν ενδιαφέρουσα η διερεύνηση της επίδρασης στην περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος, της αντικατάστασης ορισμένων μεταλλικών μερών με άλλα υλικά, όπως κατάλληλα πλαστικά.

Παράλληλα, καθώς το σύστημα SWS-Heating αποτελεί ένα σύστημα θέρμανσης, θα ήταν ουσιαστικής σημασίας η διεξαγωγή παρόμοιας μελέτης προκειμένου να διερευνηθεί η περιβαλλοντική απόδοση αυτού για λειτουργία καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, δηλαδή και για την κάλυψη των αναγκών σε ψύξη, με τη χρήση ενδεχομένως ενός ψύκτη απορρόφησης.

Τέλος, ένα ακόμη σημείο για μελλοντική μελέτη είναι η χρήση διαφορετικού τρόπου μοντελοποίησης των δεδομένων (εντός της βάσης δεδομένων της ecoinvent), δηλαδή ουσιαστικά η επιλογή διαφορετικής μεθόδου κατανομής, καθώς και διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, προκειμένου να διαπιστωθεί η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πιν. Α.1 Είσοδοι για τον εφεδρικό λέβητα φυσικού αερίου και αντίστοιχα σετ δεδομένων από τη βάση της ecoinvent

Συνιστώσα ή μέρος του κύκλου ζωής του προϊόντος	Είσοδοι (Πρώτες ύλες, Κατεργασίες, Ενέργεια)	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σετ δεδομένων της ecoinvent
<b>Πρώτες Ύλες</b>				
	Σιλικόνη	0.115	kg	Silicone product (RER)   market for silicone product   Cut-off, U
	Ελαστομερές (EPDM)	0.064	kg	Synthetic rubber (GLO)   market for   Cut-off, U
	Στυρόλιο βουταδιενίου ακρυλονιτρίλιου (ABS)	1.171	kg	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO)   market for   Cut-off, U
	Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	0.005	kg	Polyvinylchloride, suspension polymerised (GLO)   market for   Cut-off, U
	Αλουμίνιο	1.905	kg	Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA)   market for   Cut-off, U
	Χάλυβας	22.879	kg	Steel, low-alloyed (GLO)   market for   Cut-off, U
	Ανοξείδωτος χάλυβας	6.736	kg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled (GLO)   market for   Cut-off, U
	Ορείχαλκος	3.215	kg	Brass (RoW)   market for brass   Cut-off, U
	Χαλκός	2.29	kg	Copper (GLO)   market for   Cut-off, U
	Ηλεκτρονικά μέρη	0.248	kg	Electronics, for control units (GLO)   market for   Cut-off, U

	Καλωδίωση	5.72308	m	Cable, connector for computer, without plugs (GLO)   market for   Cut-off, U
	Φίλμ πολυαιθυλενίου	0.073	kg	Packaging film, low density polyethylene (GLO)   market for   Cut-off, U
	Ξύλο	0.852	lt	Fibreboard, hard (GLO)   market for   Cut-off, U
	Χαρτί	2.022	kg	Kraft paper, unbleached (GLO)   market for   Cut-off, U
	Πολυστυρένιο	1.008	kg	Polystyrene foam slab (GLO)   market for   Cut-off, U
<b>Κατεργασίες/Μετασηματισμός πρώτων υλών</b>				
	Κατεργασία αλουμινίου	1.905	kg	Metal working, average for aluminium product manufacturing (RER)   processing   Cut-off, U
	Κατεργασία Χάλυβα	22.879	kg	Metal working, average for steel product manufacturing (RER)   processing   Cut-off, U
	Κατεργασία ανοξείδωτου χάλυβα	6.736	kg	Metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)   processing   Cut-off, U
	Κατεργασία χαλκού	2.29	kg	Metal working, average for copper product manufacturing (RER)   processing   Cut-off, U
<b>Συναρμολόγηση λέβητα</b>				
	Ηλεκτρισμός (Μεσαίας τάσης)	22.2	kWh	Electricity, medium voltage (IT)   market for   Cut-off, U
	Θερμότητα (Φυσικό αέριο)	116.6	MJ	Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)   heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW   Cut-off, U

Πιν. Α.2 Αποστάσεις μεταφοράς και αντίστοιχα σετ δεδομένων από την ecoinvent

Αφετηρία	Προορισμός	Απόσταση (km)	Σετ δεδομένων της ecoinvent
Γερμανία (Λειψία)	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	353	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
Σουηδία (Μάλμε)	Γερμανία (Λειψία)	549	>>
		49 (θαλάσσια μετ.)	Transport, freight, sea, ferry (GLO)   market for transport, freight, sea, ferry   Cut-off, U
Ιταλία (Μεσίνα)	Γερμανία (Λειψία)	2029	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
Γερμανία (Angermunde)	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	615	>>
Ηνωμένο Βασίλειο (Πίτερμπορο)	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	1173	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
		63 (θαλάσσια μετ.)	Transport, freight, sea, ferry (GLO)   market for transport, freight, sea, ferry   Cut-off, U
Ιταλία (Λεγκάνο)	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	598	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
Γερμανία (Angermunde)	Σουηδία (Στοκχόλμη)	1049	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
		49 (θαλάσσια μετ.)	Transport, freight, sea, ferry (GLO)   market for transport, freight, sea, ferry   Cut-off, U
Ηνωμένο Βασίλειο (Πίτερμπορο)	Σουηδία (Στοκχόλμη)	654	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
		920 (θαλάσσια μετ.)	Transport, freight, sea, ferry (GLO)   market for transport, freight, sea, ferry   Cut-off, U
Ιταλία (Λεγκάνο)	Σουηδία (Στοκχόλμη)	2051	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (RER)   transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Cut-off, U
		49 (θαλάσσια μετ.)	Transport, freight, sea, ferry (GLO)   market for transport, freight, sea, ferry   Cut-off, U
<b>Λοιπές μεταφορές εντός ευρωπαϊκού εδάφους</b>			



Χώρος εγκατάστασης	Χώρος Ταφής/Καύσης αποβλήτων	24	Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry (RoW)  processing   Cut-off, U
--------------------	---------------------------------	----	---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρουσιάζονται οι κύριες εξισώσεις για τη μοντελοποίηση των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος αναφοράς.

### Ηλιακοί συλλέκτες

Όσον αφορά τους ηλιακούς συλλέκτες, η απόδοσή τους μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας εμπειρικές πολυωνυμικές εκφράσεις οι οποίες συσχετίζουν την αλλαγή της απόδοσης με την ηλιακή ακτινοβολία και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο κύκλωμα των συλλεκτών και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εμπειρικές πολυωνυμικές εξισώσεις είναι δευτέρου βαθμού ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας, όπως φαίνεται παρακάτω [89]:

$$\eta_{col} = c_0 - c_1 \frac{T_{col} - T_{amb}}{I_{sol}} - c_2 \frac{(T_{col} - T_{amb})^2}{I_{sol}} \quad (1)$$

όπου  $T_{col}$  είναι η μέση θερμοκρασία του ρευστού που κυκλοφορεί στο κύκλωμα των συλλεκτών,  $T_{amb}$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $I_{sol}$  η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο,  $c_0, c_1, c_2$  είναι σταθερές που ορίζονται αριθμητικά ή πειραματικά ανάλογα με τον υπό εξέταση συλλέκτη.

Για την εκτίμηση αυτών των σταθερών, χρησιμοποιείται ένα εμπορικό μοντέλο επίπεδων συλλεκτών, και συγκεκριμένα το Vitosol 300-F SV3C. Οι τιμές των σταθερών, που αναφέρονται στον Πιν. Β.1, λήφθηκαν από το πιστοποιητικό Solar Keymark του προαναφερθέντος μοντέλου [90].

*Πιν. Β.1 Συντελεστές απόδοσης για το μοντέλο επίπεδου συλλέκτη που χρησιμοποιείται στη μελέτη [90]*

Σταθερά	Τιμή
$c_0$ (-)	0.868
$c_1$ ( $W/m^2K$ )	3.188
$c_2$ ( $W/m^2K^2$ )	0.018

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της απόδοσης των συλλεκτών, μπορεί να προσδιοριστεί η θερμότητα που απορροφάται, ως εξής:

$$\eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{col}}{A_{col} \cdot I_{sol}} \Rightarrow \dot{Q}_{col} = \eta_{col} \cdot A_{col} \cdot I_{sol} \quad (2)$$

Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού που εξέρχεται από τους συλλέκτες μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$T_{col,o} = T_{col,i} + \frac{\dot{Q}_{col}}{\dot{m}_{col} \cdot c_{p,mean}} \quad (3)$$

### Δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας

Όσον αφορά τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, μοντελοποιήθηκε με βάση δεδομένα που παρέχονται από μια υπάρχουσα υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης στην Αθήνα [69]. Η μοντελοποίηση βασίστηκε σε απλά μοντέλα διαστρωμάτωσης δεξαμενών, τα οποία τροποποιήθηκαν προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής θερμικών απωλειών με βάση τα παρεχόμενα δεδομένα.

Η δεξαμενή μοντελοποιήθηκε χωρίζοντάς τη σε έναν αριθμό από ζώνες ανάμιξης, θεωρώντας μία ομοιόμορφη θερμοκρασία εντός κάθε ζώνης. Εφαρμόζοντας τα ενεργειακά ισοζύγια για κάθε ζώνη ανάμιξης, δημιουργείται ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων και επιλύεται αριθμητικά μέσω διακριτοποίησης με την μέθοδο Euler με πρόσω παραγωγή. Η επιλογή της πρόσω παραγωγής επιλέχθηκε προκειμένου να ενισχυθεί η σταθερότητα της λύσης.

Με βάση τον διαχωρισμό της δεξαμενής σε 50 ζώνες ανάμιξης, το ενεργειακό ισοζύγιο εντός μίας ζώνης ανάμιξης  $i$  για ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$  μπορεί να εκφραστεί με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_i \frac{U_{t,i} - U_{t-1,i}}{\Delta t} = \frac{\lambda_i + \Delta\lambda_i}{\Delta x_i} A_c (T_{t,i-1} - T_{t,i}) + \frac{\lambda_i + \Delta\lambda_i}{\Delta x_i} A_c (T_{t,i+1} - T_{t,i}) - \dot{m}_{DHW} (h_{t,i} - h_{t,i+1}) + \dot{m}_{col} (h_{t,i-1} - h_{t,i}) - \dot{m}_{SH} (h_{t,i} - h_{t,i+1}) - U_l A_{o,i} \cdot (T_{t,i} - T_{t,amb}) \quad (4)$$

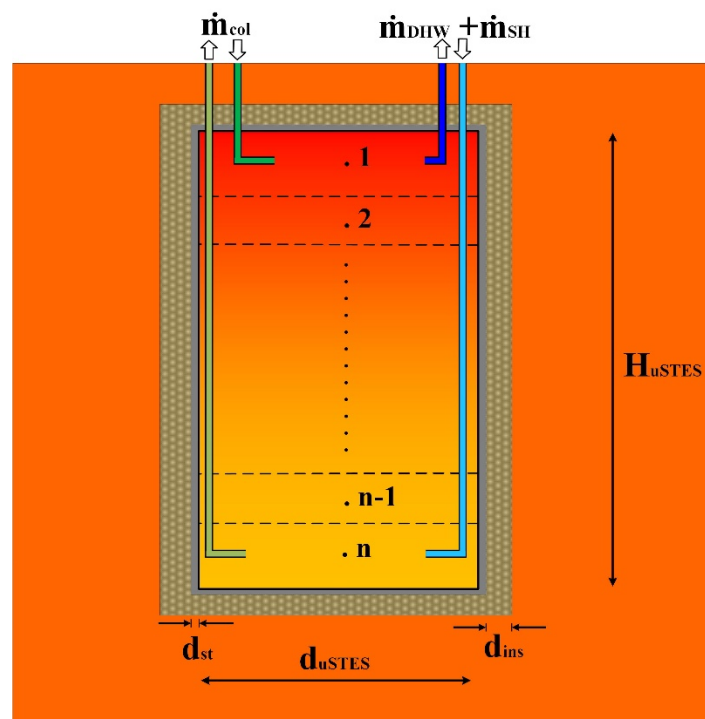
Στην εξίσωση (4),  $M_i$  είναι η συνολική μάζα νερού στη ζώνη  $i$ ,  $U$  είναι η εσωτερική ενέργεια,  $h_i$  η ενθαλπία του νερού στη ζώνη  $i$ ,  $\lambda_i$  είναι η θερμική αγωγιμότητα, ο όρος  $A_c$  αναφέρεται στην επιφάνεια αγωγής μεταξύ δύο διαδοχικών ζωνών,  $\dot{m}_{DHW}$ ,  $\dot{m}_{col}$ ,  $\dot{m}_{SH}$  είναι οι ροές μάζας του ΖΝΧ, των ηλιακών συλλεκτών και του νερού για τη θέρμανση χώρου αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικ. Β.1. Ο όρος  $U_l$  αναφέρεται στο συντελεστή θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον από την εξωτερική επιφάνεια,  $A_{o,i}$ , κάθε ζώνης, ενώ  $T_{amb}$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος τη χρονική στιγμή  $t$  και, τέλος,  $\Delta x_i$  είναι το ύψος της ζώνης  $i$ .

Όσον αφορά τον συντελεστή θερμικών απωλειών,  $U_l$ , βάση των [91, 92] μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη εξίσωση:

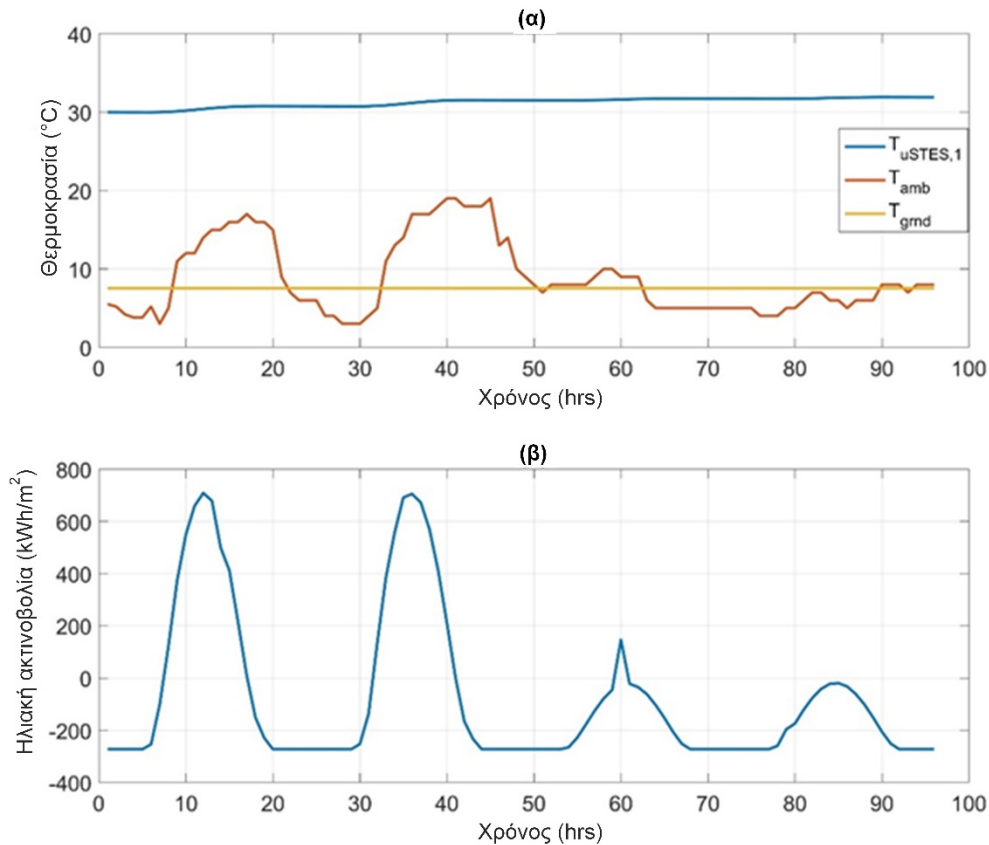
$$U_l = \frac{1}{\frac{d_{st}}{\lambda_{st}} + \frac{d_{ins}}{\lambda_{ins}} + R_{grnd}} \quad (5)$$

Όπου  $d_{st}$ ,  $d_{ins}$  είναι το πάχος του τοιχώματος και το πάχος της μόνωσης, αντίστοιχα, ενώ τα  $\lambda_{st}$ ,  $\lambda_{ins}$  αναφέρονται στη θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος και της μόνωσης, αντίστοιχα. Τέλος, ο όρος  $R_{grnd}$  αναφέρεται στη θερμική αντίσταση του εδάφους. Οι τιμές των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές της υπό εξέταση δεξαμενής αποθήκευσης δεν παρουσιάζονται λόγω της εμπιστευτικής φύσης αυτών.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή των 50 ζωνών ανάμιξης είναι σχετικά υψηλή όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος, ωστόσο προτιμήθηκε προκειμένου να ενισχυθεί η ακρίβεια των υπολογισμών. Μια εικόνα της απόδοσης του μοντέλου που αναπτύχθηκε, κατά τις τέσσερις πρώτες ημέρες λειτουργίας των θεωρούμενων ετήσιων προσομοιώσεων (Μάιος) δίνεται στην Εικ. Β.2.



Εικ. Β.1 Απεικόνιση διακριτοποίησης της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας



Εικ. Β.2 (α) Προφίλ φόρτισης της πάνω ζώνης της δεξαμενής κατά τις πρώτες τέσσερις μέρες των προσομοιώσεων στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και (β) ηλιακή ακτινοβολία για τις ίδιες μέρες

### Δοχείο αδράνειας και λοιπές συνιστώσες

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για το δοχείο αδράνειας βασίζεται σε μία παρόμοια προσέγγιση με τη δεξαμενή αποθήκευσης. Το δοχείο θεωρείται ότι χωρίζεται σε 20 ζώνες ανάμιξης εντός κάθε μίας από τις οποίες το νερό έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία. Μεταξύ των ζωνών λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας που συμβάλλουν στην τελική διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας και για κάθε ζώνη ικανοποιούνται οι εξισώσεις ισοζυγίου μάζας και ενέργειας.

Για κάθε ζώνη ανάμιξης, λαμβάνεται υπόψη μια ομοιόμορφη θερμοκρασία και εφαρμόζεται ένα ενεργειακό ισοζύγιο για τη μοντελοποίηση της μεταφορά θερμότητας και μάζας στα όρια της [93]. Η θερμοκρασία της πρώτης ζώνης (κορυφή της δεξαμενής) θεωρείται ότι είναι ίση με τη θερμοκρασία του ρεύματος που τροφοδοτεί την κατανάλωση ΖΝΧ, ενώ η θερμοκρασία της τελευταίας ζώνης (πυθμένας της δεξαμενής) είναι ίση με τη θερμοκρασία του ρεύματος που επιστρέφει σε αυτή.

Για συνολικά 20 θερμοκρασιακές ζώνες τη χρονική στιγμή  $t$ , οι εξισώσεις ισοζυγίου ενέργειας είναι:

- Για την πρώτη ζώνη,  $i = 1$ :

$$\frac{M_{bt,i} U_{bt,(t,1)} - U_{bt,(t-1,1)}}{20 \Delta t} = \dot{m}_{uSTES}(h_{uSTES,feed} - h_{bt,(t,1)}) + \dot{m}_{DHW}(h_{bt,(t,2)} - h_{bt,(t,1)}) - U_l A_{bt,1} \cdot (T_{bt,(t,1)} - T_{amb}) \quad (6)$$

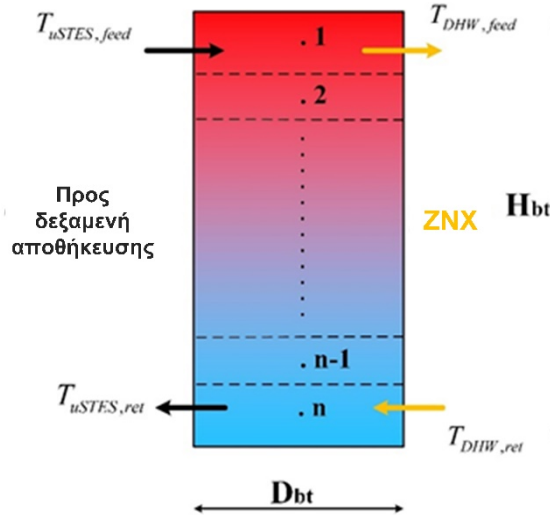
- Για τις ενδιάμεσες ζώνες,  $i = (2, \dots, n - 1)$ :

$$\frac{M_{bt,i} U_{bt,(t,i)} - U_{bt,(t-1,i)}}{20 \Delta t} = \dot{m}_{uSTES}(h_{bt,(t,i-1)} - h_{bt,(t,i)}) + \dot{m}_{DHW}(h_{bt,(t,i+1)} - h_{bt,(t,i)}) - U_l A_{bt,i} \cdot (T_{bt,(t,i)} - T_{amb}) \quad (7)$$

- Για την τελευταία ζώνη,  $j = n$ :

$$\frac{M_{bt,i} U_{bt,(t,20)} - U_{bt,(t-1,20)}}{20 \Delta t} = \dot{m}_{uSTES}(h_{bt,(t,19)} - h_{bt,(t,20)}) + \dot{m}_{DHW}(h_{DHW,ret} - h_{bt,(t,20)}) - U_l A_{bt,20} \cdot (T_{bt,(t,20)} - T_{amb}) \quad (8)$$

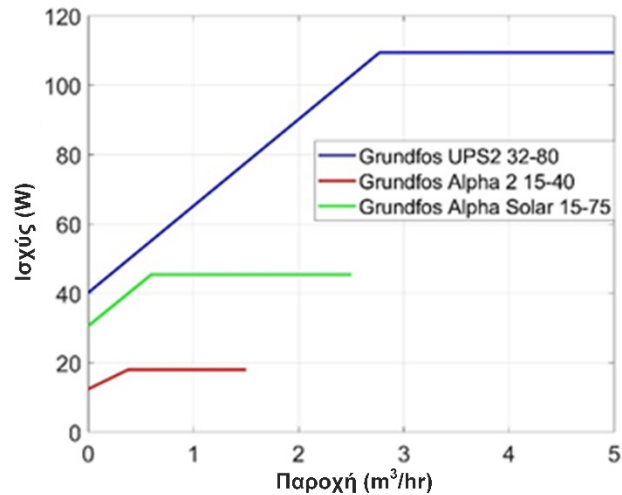
Στις παραπάνω εξισώσεις το bt αναφέρεται στο δοχείο και το t στη χρονική στιγμή της εφαρμογής του ενεργειακού ισοζυγίου. Στην εξίσωση (6),  $M_{bt}$  είναι η συνολική μάζα του νερού στη ζώνη i,  $U$  η εσωτερική ενέργεια,  $h_{bt,(t,1)}$  είναι η ενθαλπία του νερού στη ζώνη i κατά τη χρονική στιγμή t,  $h_{uSTES,in}$  η ενθαλπία του ρεύματος εισόδου στο δοχείο αδράνειας από τη δεξαμενή αποθήκευσης,  $\dot{m}_{DHW}$ ,  $\dot{m}_{uSTES}$  είναι οι παροχές μάζας του ZNX και του ρεύματος που εξέρχεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικ. Β.3. Ο όρος  $U_l$  αναφέρεται στο συντελεστή θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον από την εξωτερική επιφάνεια,  $A_{bt}$ , κάθε ζώνης, ενώ  $T_{amb}$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος τη χρονική στιγμή t.



Εικ. Β.3 Θερμική διαστρωμάτωση εντός του δοχείου αδράνειας

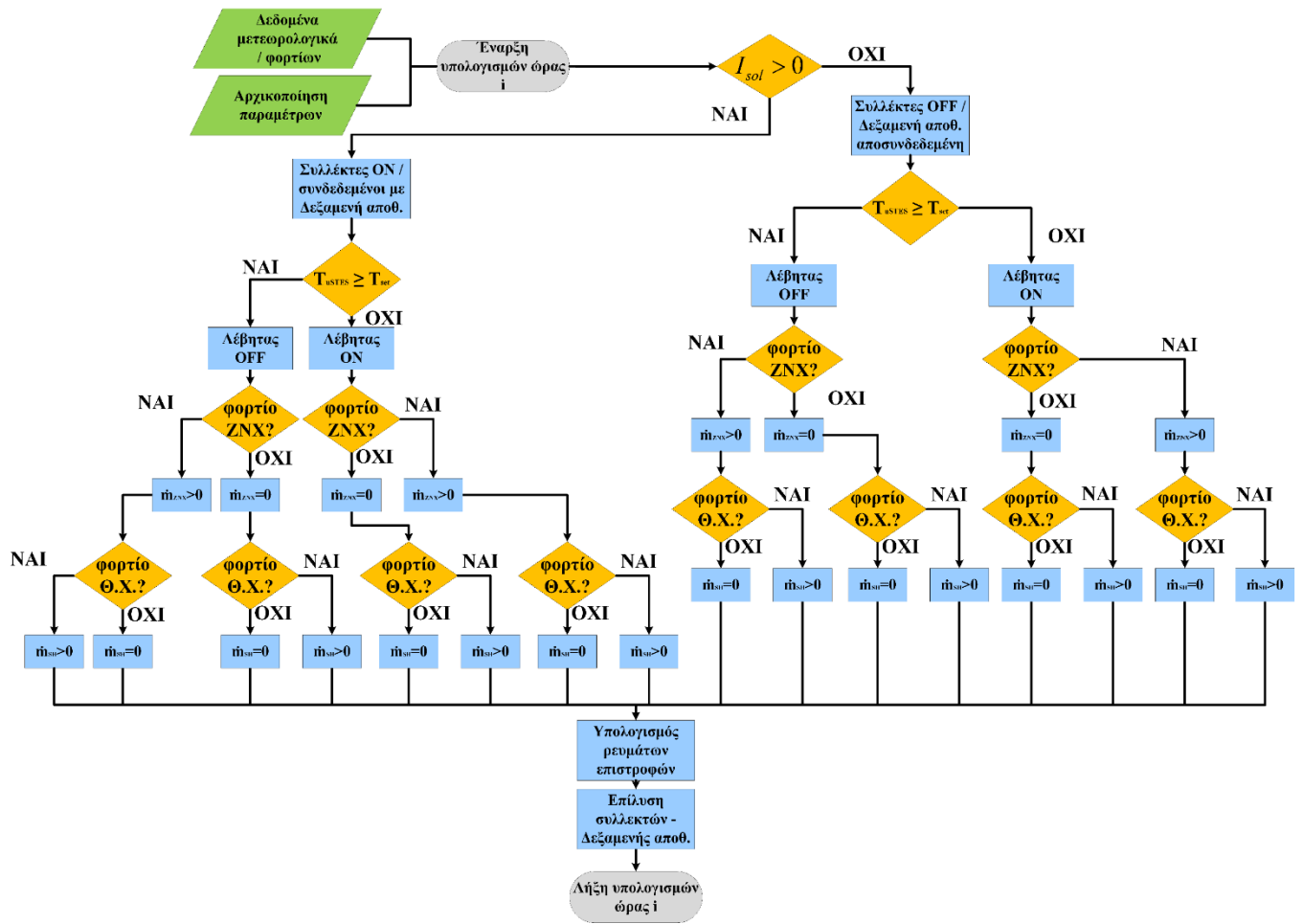
Ο συντελεστής θερμικών απωλειών του δοχείου αδράνειας προς το περιβάλλον,  $U_l$ , θεωρήθηκε ίσος με  $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , η οποία είναι μία τυπική τιμή για ένα μονωμένο δοχείο.

Όσον αφορά την κατανάλωση των κυκλοφορητών, χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες προσαρμογής βάσει των εμπορικών μοντέλων για κάθε παροχή μάζας (Εικ. Β.4). Βάση της ονοματολογίας της Εικ. 2.8, ο κυκλοφορητής CP<sub>1</sub> μοντελοποιήθηκε με βάση το εμπορικό μοντέλο Grundfos Alpha Solar 15-75. Οι κυκλοφορητές CP<sub>2</sub> και CP<sub>5</sub> μοντελοποιήθηκαν με βάση το εμπορικό μοντέλο Grundfos UPS2 32-80. Τέλος, οι υπόλοιποι κυκλοφορητές CP<sub>3</sub> και CP<sub>4</sub> μοντελοποιήθηκαν με βάση το εμπορικό μοντέλο Grundfos Alpha 2 15-40.



Εικ. Β.4 Καμπύλες ισχύος των υπό εξέταση κυκλοφορητών

Όσον αφορά το λέβητα φυσικού αερίου, λήφθηκε υπόψη μέσος βαθμός απόδοσης ίσος με 0.90. Τέλος, το διάγραμμα ροής για τη επίλυση του συστήματος για κάθε ώρα του χρόνου δίνεται στην Εικ. Β.5.



Εικ. Β.5 Διάγραμμα ροής για την επίλυση του μοντέλου του συστήματος αναφοράς



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ. ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΚΖ

Πιν. Γ.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας ανά θερμική kWh, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία επίπτωσης	Σύνολο	Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης	Προσοφθητικό υλικό	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρισμός, ΧΤ	Ηλεκτρ. και κυκλ. μονάδας επ. αποθ.	Συλλέκτες κενού	Δεξαμενή αποθ.	Δοχείο αδράνειας	Λέβητας φ.α.	Κυκλοφορητές
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	2.97	2.31	1.78·10 <sup>-1</sup>	1.72·10 <sup>-1</sup>	1.28·10 <sup>-1</sup>	3.17·10 <sup>-2</sup>	6.80·10 <sup>-2</sup>	6.34·10 <sup>-2</sup>	1.14·10 <sup>-2</sup>	2.75·10 <sup>-3</sup>	6.01·10 <sup>-4</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.49·10 <sup>-6</sup>	1.76·10 <sup>-6</sup>	9.19·10 <sup>-8</sup>	3.67·10 <sup>-8</sup>	8.99·10 <sup>-8</sup>	1.98·10 <sup>-8</sup>	4.39·10 <sup>-7</sup>	2.22·10 <sup>-8</sup>	3.08·10 <sup>-8</sup>	1.86·10 <sup>-9</sup>	4.19·10 <sup>-10</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	2.91·10 <sup>-1</sup>	2.47·10 <sup>-1</sup>	9.70·10 <sup>-3</sup>	9.41·10 <sup>-4</sup>	2.28·10 <sup>-2</sup>	3.04·10 <sup>-3</sup>	3.56·10 <sup>-3</sup>	3.03·10 <sup>-3</sup>	5.91·10 <sup>-4</sup>	2.39·10 <sup>-4</sup>	2.45·10 <sup>-5</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.06·10 <sup>-2</sup>	9.47·10 <sup>-3</sup>	4.08·10 <sup>-4</sup>	8.20·10 <sup>-5</sup>	1.38·10 <sup>-4</sup>	1.02·10 <sup>-4</sup>	1.60·10 <sup>-4</sup>	1.83·10 <sup>-4</sup>	2.58·10 <sup>-5</sup>	9.82·10 <sup>-6</sup>	2.61·10 <sup>-6</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	1.62·10 <sup>-2</sup>	1.53·10 <sup>-2</sup>	2.75·10 <sup>-4</sup>	3.72·10 <sup>-5</sup>	7.83·10 <sup>-5</sup>	8.85·10 <sup>-5</sup>	1.57·10 <sup>-4</sup>	2.34·10 <sup>-4</sup>	1.62·10 <sup>-5</sup>	1.41·10 <sup>-5</sup>	4.23·10 <sup>-6</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.09·10 <sup>-2</sup>	9.73·10 <sup>-3</sup>	4.15·10 <sup>-4</sup>	8.92·10 <sup>-5</sup>	1.40·10 <sup>-4</sup>	1.05·10 <sup>-4</sup>	1.63·10 <sup>-4</sup>	1.88·10 <sup>-4</sup>	2.67·10 <sup>-5</sup>	1.01·10 <sup>-5</sup>	2.68·10 <sup>-6</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	3.75·10 <sup>-2</sup>	3.55·10 <sup>-2</sup>	7.58·10 <sup>-4</sup>	1.12·10 <sup>-4</sup>	2.43·10 <sup>-4</sup>	1.85·10 <sup>-4</sup>	2.40·10 <sup>-4</sup>	3.19·10 <sup>-4</sup>	4.67·10 <sup>-5</sup>	3.43·10 <sup>-5</sup>	9.55·10 <sup>-6</sup>

Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	$5.86 \cdot 10^{-3}$	$5.49 \cdot 10^{-3}$	$6.74 \cdot 10^{-5}$	$6.89 \cdot 10^{-6}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$4.61 \cdot 10^{-5}$	$2.35 \cdot 10^{-5}$	$3.16 \cdot 10^{-5}$	$3.07 \cdot 10^{-6}$	$5.31 \cdot 10^{-6}$	$1.40 \cdot 10^{-6}$
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	$2.44 \cdot 10^{-4}$	$2.09 \cdot 10^{-4}$	$1.61 \cdot 10^{-5}$	$6.92 \cdot 10^{-7}$	$1.15 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-6}$	$1.98 \cdot 10^{-6}$	$2.22 \cdot 10^{-6}$	$2.83 \cdot 10^{-7}$	$2.36 \cdot 10^{-7}$	$4.30 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	$2.55 \cdot 10^2$	$2.50 \cdot 10^2$	$6.58 \cdot 10^{-1}$	$2.62 \cdot 10^{-2}$	$2.68 \cdot 10^{-1}$	$5.81 \cdot 10^{-1}$	1.00	2.06	$6.49 \cdot 10^{-2}$	$2.18 \cdot 10^{-1}$	$6.72 \cdot 10^{-2}$
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	4.16	4.09	$9.20 \cdot 10^{-3}$	$8.05 \cdot 10^{-4}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$	$2.32 \cdot 10^{-2}$	$3.59 \cdot 10^{-3}$	$1.13 \cdot 10^{-2}$	$7.97 \cdot 10^{-4}$	$3.83 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.27	5.19	$1.21 \cdot 10^{-2}$	$1.09 \cdot 10^{-3}$	$1.71 \cdot 10^{-2}$	$3.02 \cdot 10^{-2}$	$5.03 \cdot 10^{-3}$	$1.51 \cdot 10^{-2}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$4.86 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.02	$9.53 \cdot 10^{-1}$	$1.24 \cdot 10^{-2}$	$8.37 \cdot 10^{-4}$	$9.92 \cdot 10^{-3}$	$3.44 \cdot 10^{-3}$	$1.76 \cdot 10^{-2}$	$2.17 \cdot 10^{-2}$	$4.08 \cdot 10^{-4}$	$9.99 \cdot 10^{-4}$	$3.62 \cdot 10^{-4}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	$5.31 \cdot 10^1$	$5.20 \cdot 10^1$	$1.91 \cdot 10^{-1}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$2.29 \cdot 10^{-1}$	$3.44 \cdot 10^{-1}$	$7.52 \cdot 10^{-2}$	$1.72 \cdot 10^{-1}$	$1.52 \cdot 10^{-2}$	$4.88 \cdot 10^{-2}$	$1.33 \cdot 10^{-2}$
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	$1.16 \cdot 10^{-1}$	$1.01 \cdot 10^{-1}$	$5.32 \cdot 10^{-3}$	$2.10 \cdot 10^{-4}$	$2.69 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$	$2.02 \cdot 10^{-3}$	$2.23 \cdot 10^{-3}$	$4.78 \cdot 10^{-4}$	$1.57 \cdot 10^{-4}$	$2.63 \cdot 10^{-5}$
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	$3.00 \cdot 10^{-1}$	$2.76 \cdot 10^{-1}$	$1.26 \cdot 10^{-2}$	$5.10 \cdot 10^{-5}$	$2.22 \cdot 10^{-4}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$	$3.70 \cdot 10^{-3}$	$5.88 \cdot 10^{-3}$	$5.50 \cdot 10^{-5}$	$2.31 \cdot 10^{-4}$	$6.11 \cdot 10^{-5}$

Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	7.38·10 <sup>-1</sup>	5.71·10 <sup>-1</sup>	3.68·10 <sup>-2</sup>	5.86·10 <sup>-2</sup>	3.07·10 <sup>-2</sup>	8.26·10 <sup>-3</sup>	1.33·10 <sup>-2</sup>	1.51·10 <sup>-2</sup>	3.05·10 <sup>-3</sup>	7.27·10 <sup>-4</sup>	1.44·10 <sup>-4</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	2.88·10 <sup>-2</sup>	2.42·10 <sup>-2</sup>	2.17·10 <sup>-3</sup>	5.07·10 <sup>-5</sup>	7.78·10 <sup>-4</sup>	3.08·10 <sup>-4</sup>	6.14·10 <sup>-4</sup>	3.98·10 <sup>-4</sup>	1.92·10 <sup>-4</sup>	3.37·10 <sup>-5</sup>	4.64·10 <sup>-6</sup>

Πιν. Γ.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας ανά θερμική kWh, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία επίπτωσης	Σύνολο	Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης	Προσοφητικό υλικό	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρισμός. ΧΤ	Ηλεκτρ. και κυκλ. μονάδας επ. αποθ.	Συλλέκτες κενού	Δεξαμενή αποθ.	Λέβητας φ.α.	Κυκλοφορητές
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	3.88	3.31	2.56·10 <sup>-1</sup>	1.70·10 <sup>-1</sup>	1.11·10 <sup>-2</sup>	2.26·10 <sup>-2</sup>	6.30·10 <sup>-2</sup>	4.56·10 <sup>-2</sup>	2.00·10 <sup>-3</sup>	4.27·10 <sup>-4</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	3.15·10 <sup>-6</sup>	2.52·10 <sup>-6</sup>	1.33·10 <sup>-7</sup>	3.50·10 <sup>-8</sup>	2.32·10 <sup>-8</sup>	1.41·10 <sup>-8</sup>	4.04·10 <sup>-7</sup>	1.61·10 <sup>-8</sup>	1.36·10 <sup>-9</sup>	2.98·10 <sup>-10</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	4.46·10 <sup>-1</sup>	3.60·10 <sup>-1</sup>	1.38·10 <sup>-2</sup>	2.26·10 <sup>-3</sup>	6.21·10 <sup>-2</sup>	2.16·10 <sup>-3</sup>	3.28·10 <sup>-3</sup>	2.16·10 <sup>-3</sup>	1.71·10 <sup>-4</sup>	1.74·10 <sup>-5</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.47·10 <sup>-2</sup>	1.37·10 <sup>-2</sup>	5.92·10 <sup>-4</sup>	7.94·10 <sup>-5</sup>	2.70·10 <sup>-5</sup>	7.30·10 <sup>-5</sup>	1.50·10 <sup>-4</sup>	1.34·10 <sup>-4</sup>	7.18·10 <sup>-6</sup>	1.85·10 <sup>-6</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	2.26·10 <sup>-2</sup>	2.18·10 <sup>-2</sup>	3.96·10 <sup>-4</sup>	3.57·10 <sup>-5</sup>	1.81·10 <sup>-5</sup>	6.30·10 <sup>-5</sup>	1.45·10 <sup>-4</sup>	1.67·10 <sup>-4</sup>	1.01·10 <sup>-5</sup>	3.01·10 <sup>-6</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.51·10 <sup>-2</sup>	1.40·10 <sup>-2</sup>	6.02·10 <sup>-4</sup>	8.65·10 <sup>-5</sup>	2.75·10 <sup>-5</sup>	7.48·10 <sup>-5</sup>	1.53·10 <sup>-4</sup>	1.38·10 <sup>-4</sup>	7.40·10 <sup>-6</sup>	1.91·10 <sup>-6</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	5.25·10 <sup>-2</sup>	5.06·10 <sup>-2</sup>	1.09·10 <sup>-3</sup>	1.07·10 <sup>-4</sup>	4.48·10 <sup>-5</sup>	1.32·10 <sup>-4</sup>	2.23·10 <sup>-4</sup>	2.30·10 <sup>-4</sup>	2.45·10 <sup>-5</sup>	6.79·10 <sup>-6</sup>
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	7.95·10 <sup>-3</sup>	7.77·10 <sup>-3</sup>	9.60·10 <sup>-5</sup>	1.78·10 <sup>-6</sup>	7.26·10 <sup>-6</sup>	3.28·10 <sup>-5</sup>	2.16·10 <sup>-5</sup>	2.25·10 <sup>-5</sup>	3.77·10 <sup>-6</sup>	9.95·10 <sup>-7</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	3.25·10 <sup>-4</sup>	2.95·10 <sup>-4</sup>	2.29·10 <sup>-5</sup>	3.99·10 <sup>-7</sup>	1.43·10 <sup>-6</sup>	1.31·10 <sup>-6</sup>	1.82·10 <sup>-6</sup>	1.58·10 <sup>-6</sup>	1.68·10 <sup>-7</sup>	3.05·10 <sup>-8</sup>

Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.61·10 <sup>2</sup>	3.56·10 <sup>2</sup>	9.95·10 <sup>-1</sup>	2.40·10 <sup>-2</sup>	1.73·10 <sup>-1</sup>	4.14·10 <sup>-1</sup>	9.29·10 <sup>-1</sup>	1.47	1.56·10 <sup>-1</sup>	4.77·10 <sup>-2</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.86	5.81	1.31·10 <sup>-2</sup>	6.45·10 <sup>-4</sup>	7.29·10 <sup>-3</sup>	1.65·10 <sup>-2</sup>	3.31·10 <sup>-3</sup>	8.06·10 <sup>-3</sup>	2.72·10 <sup>-3</sup>	7.56·10 <sup>-4</sup>
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	7.43	7.36	1.72·10 <sup>-2</sup>	8.71·10 <sup>-4</sup>	8.92·10 <sup>-3</sup>	2.15·10 <sup>-2</sup>	4.65·10 <sup>-3</sup>	1.07·10 <sup>-2</sup>	3.45·10 <sup>-3</sup>	9.59·10 <sup>-4</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.41	1.35	1.77·10 <sup>-2</sup>	5.91·10 <sup>-4</sup>	1.43·10 <sup>-3</sup>	2.44·10 <sup>-3</sup>	1.62·10 <sup>-2</sup>	1.54·10 <sup>-2</sup>	7.11·10 <sup>-4</sup>	2.57·10 <sup>-4</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	7.47·10 <sup>1</sup>	7.38·10 <sup>1</sup>	2.72·10 <sup>-1</sup>	9.70·10 <sup>-3</sup>	4.63·10 <sup>-2</sup>	2.44·10 <sup>-1</sup>	6.94·10 <sup>-2</sup>	1.23·10 <sup>-1</sup>	3.47·10 <sup>-2</sup>	9.45·10 <sup>-3</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.65·10 <sup>-1</sup>	1.47·10 <sup>-1</sup>	7.74·10 <sup>-3</sup>	2.83·10 <sup>-4</sup>	4.72·10 <sup>-3</sup>	9.60·10 <sup>-4</sup>	1.89·10 <sup>-3</sup>	1.62·10 <sup>-3</sup>	1.15·10 <sup>-4</sup>	1.87·10 <sup>-5</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	4.18·10 <sup>-1</sup>	3.91·10 <sup>-1</sup>	1.79·10 <sup>-2</sup>	4.98·10 <sup>-5</sup>	1.58·10 <sup>-4</sup>	1.16·10 <sup>-3</sup>	3.40·10 <sup>-3</sup>	4.18·10 <sup>-3</sup>	1.64·10 <sup>-4</sup>	4.34·10 <sup>-5</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	9.66·10 <sup>-1</sup>	8.23·10 <sup>-1</sup>	5.32·10 <sup>-2</sup>	5.81·10 <sup>-2</sup>	2.02·10 <sup>-3</sup>	5.89·10 <sup>-3</sup>	1.24·10 <sup>-2</sup>	1.09·10 <sup>-2</sup>	5.34·10 <sup>-4</sup>	1.03·10 <sup>-4</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	4.01·10 <sup>-2</sup>	3.46·10 <sup>-2</sup>	3.09·10 <sup>-3</sup>	7.01·10 <sup>-5</sup>	1.32·10 <sup>-3</sup>	2.19·10 <sup>-4</sup>	5.65·10 <sup>-4</sup>	2.84·10 <sup>-4</sup>	2.40·10 <sup>-5</sup>	3.29·10 <sup>-6</sup>

Πιν. Γ.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας του κτηρίου, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία επίπτωσης	Σύνολο	Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης	Προσοφθητικό υλικό	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρισμός. ΧΤ	Ηλεκτρ. και κυκλ. μονάδας επ. αποθ.	Συλλέκτες κενού	Δεξαμενή αποθ.	Δοχείο αδράνειας	Λέβητας φ.α.	Κυκλοφορητές
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	1.86·10 <sup>3</sup>	1.45·10 <sup>3</sup>	1.12·10 <sup>2</sup>	1.08·10 <sup>2</sup>	7.99·10 <sup>1</sup>	1.99·10 <sup>1</sup>	4.26·10 <sup>1</sup>	3.97·10 <sup>1</sup>	7.18	1.72	3.76·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	1.56·10 <sup>-3</sup>	1.10·10 <sup>-3</sup>	5.76·10 <sup>-5</sup>	2.30·10 <sup>-5</sup>	5.63·10 <sup>-5</sup>	1.24·10 <sup>-5</sup>	2.75·10 <sup>-4</sup>	1.39·10 <sup>-5</sup>	1.93·10 <sup>-5</sup>	1.17·10 <sup>-6</sup>	2.63·10 <sup>-7</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	1.83·10 <sup>2</sup>	1.55·10 <sup>2</sup>	6.08	5.90·10 <sup>-1</sup>	1.43·10 <sup>1</sup>	1.91	2.23	1.90	3.70·10 <sup>-1</sup>	1.50·10 <sup>-1</sup>	1.53·10 <sup>-2</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	6.64	5.94	2.56·10 <sup>-1</sup>	5.14·10 <sup>-2</sup>	8.67·10 <sup>-2</sup>	6.43·10 <sup>-2</sup>	1.01·10 <sup>-1</sup>	1.15·10 <sup>-1</sup>	1.62·10 <sup>-2</sup>	6.16·10 <sup>-3</sup>	1.63·10 <sup>-3</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	1.01·10 <sup>1</sup>	9.58	1.73·10 <sup>-1</sup>	2.33·10 <sup>-2</sup>	4.91·10 <sup>-2</sup>	5.55·10 <sup>-2</sup>	9.83·10 <sup>-2</sup>	1.46·10 <sup>-1</sup>	1.02·10 <sup>-2</sup>	8.84·10 <sup>-3</sup>	2.65·10 <sup>-3</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	6.81	6.10	2.60·10 <sup>-1</sup>	5.59·10 <sup>-2</sup>	8.78·10 <sup>-2</sup>	6.58·10 <sup>-2</sup>	1.02·10 <sup>-1</sup>	1.18·10 <sup>-1</sup>	1.67·10 <sup>-2</sup>	6.35·10 <sup>-3</sup>	1.68·10 <sup>-3</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	2.35·10 <sup>1</sup>	2.23·10 <sup>1</sup>	4.75·10 <sup>-1</sup>	7.04·10 <sup>-2</sup>	1.52·10 <sup>-1</sup>	1.16·10 <sup>-1</sup>	1.50·10 <sup>-1</sup>	2.00·10 <sup>-1</sup>	2.93·10 <sup>-2</sup>	2.15·10 <sup>-2</sup>	5.99·10 <sup>-3</sup>
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	3.67	3.44	4.23·10 <sup>-2</sup>	4.32·10 <sup>-3</sup>	1.13·10 <sup>-1</sup>	2.89·10 <sup>-2</sup>	1.47·10 <sup>-2</sup>	1.98·10 <sup>-2</sup>	1.92·10 <sup>-3</sup>	3.33·10 <sup>-3</sup>	8.79·10 <sup>-4</sup>

Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	1.53·10 <sup>-1</sup>	1.31·10 <sup>-1</sup>	1.01·10 <sup>-2</sup>	4.34·10 <sup>-4</sup>	7.20·10 <sup>-3</sup>	1.16·10 <sup>-3</sup>	1.24·10 <sup>-3</sup>	1.39·10 <sup>-3</sup>	1.77·10 <sup>-4</sup>	1.48·10 <sup>-4</sup>	2.69·10 <sup>-5</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.60·10 <sup>5</sup>	1.57·10 <sup>5</sup>	4.12·10 <sup>2</sup>	1.65·10 <sup>1</sup>	1.68·10 <sup>2</sup>	3.64·10 <sup>2</sup>	6.27·10 <sup>2</sup>	1.29·10 <sup>3</sup>	4.07·10 <sup>1</sup>	1.37·10 <sup>2</sup>	4.21·10 <sup>1</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	2.61·10 <sup>3</sup>	2.56·10 <sup>3</sup>	5.77	5.05·10 <sup>-1</sup>	8.39	1.45·10 <sup>1</sup>	2.25	7.11	5.00·10 <sup>-1</sup>	2.40	6.67·10 <sup>-1</sup>
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.31·10 <sup>3</sup>	3.25·10 <sup>3</sup>	7.56	6.82·10 <sup>-1</sup>	1.07·10 <sup>1</sup>	1.90·10 <sup>1</sup>	3.16	9.44	6.56·10 <sup>-1</sup>	3.04	8.46·10 <sup>-1</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	6.40·10 <sup>2</sup>	5.98·10 <sup>2</sup>	7.79	5.24·10 <sup>-1</sup>	6.22	2.16	1.10·10 <sup>1</sup>	1.36·10 <sup>1</sup>	2.56·10 <sup>-1</sup>	6.26·10 <sup>-1</sup>	2.27·10 <sup>-1</sup>
Τοξικότητα για τον μη άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.33·10 <sup>4</sup>	3.26·10 <sup>4</sup>	1.19·10 <sup>2</sup>	9.38	1.44·10 <sup>2</sup>	2.16·10 <sup>2</sup>	4.71·10 <sup>1</sup>	1.08·10 <sup>2</sup>	9.53	3.06·10 <sup>1</sup>	8.34
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	7.25·10 <sup>1</sup>	6.34·10 <sup>1</sup>	3.33	1.31·10 <sup>-1</sup>	1.69	8.44·10 <sup>-1</sup>	1.27	1.40	2.99·10 <sup>-1</sup>	9.83·10 <sup>-2</sup>	1.65·10 <sup>-2</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	1.88·10 <sup>2</sup>	1.73·10 <sup>2</sup>	7.91	3.20·10 <sup>-2</sup>	1.39·10 <sup>-1</sup>	1.02	2.32	3.69	3.45·10 <sup>-2</sup>	1.45·10 <sup>-1</sup>	3.83·10 <sup>-2</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	4.62·10 <sup>2</sup>	3.58·10 <sup>2</sup>	2.31·10 <sup>1</sup>	3.67·10 <sup>1</sup>	1.92·10 <sup>1</sup>	5.18	8.32	9.45	1.91	4.56·10 <sup>-1</sup>	9.05·10 <sup>-2</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	1.80·10 <sup>1</sup>	1.52·10 <sup>1</sup>	1.36	3.18·10 <sup>-2</sup>	4.87·10 <sup>-1</sup>	1.93·10 <sup>-1</sup>	3.85·10 <sup>-1</sup>	2.50·10 <sup>-1</sup>	1.20·10 <sup>-1</sup>	2.11·10 <sup>-2</sup>	2.91·10 <sup>-3</sup>

Πιν. Γ.4 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας ανά  $m^2$  επιφάνειας του κτηρίου, σε επίπεδο "midpoint"

Κατηγορία επίπτωσης	Σύνολο	Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης	Προσοφητικό υλικό	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρισμός ΧΤ	Ηλεκτρ. και κυκλ. μονάδας επ. αποθ.	Συλλέκτες κενού	Δεξαμενή αποθ.	Λέβητας φ.α.	Κυκλοφορητές
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	3.42·10 <sup>3</sup>	2.92·10 <sup>3</sup>	2.26·10 <sup>2</sup>	1.50·10 <sup>2</sup>	9.79	1.99·10 <sup>1</sup>	5.56·10 <sup>1</sup>	4.02·10 <sup>1</sup>	1.77	3.76·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.78·10 <sup>-3</sup>	2.23·10 <sup>-3</sup>	1.17·10 <sup>-4</sup>	3.09·10 <sup>-5</sup>	2.05·10 <sup>-5</sup>	1.24·10 <sup>-5</sup>	3.57·10 <sup>-4</sup>	1.42·10 <sup>-5</sup>	1.20·10 <sup>-6</sup>	2.63·10 <sup>-7</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	3.94·10 <sup>2</sup>	3.18·10 <sup>2</sup>	1.22·10 <sup>1</sup>	2.00	5.48·10 <sup>1</sup>	1.91	2.90	1.91	1.51·10 <sup>-1</sup>	1.53·10 <sup>-2</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.30·10 <sup>1</sup>	1.21·10 <sup>1</sup>	5.23·10 <sup>-1</sup>	7.00·10 <sup>-2</sup>	2.38·10 <sup>-2</sup>	6.45·10 <sup>-2</sup>	1.32·10 <sup>-1</sup>	1.18·10 <sup>-1</sup>	6.34·10 <sup>-3</sup>	1.63·10 <sup>-3</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	1.99·10 <sup>1</sup>	1.92·10 <sup>1</sup>	3.49·10 <sup>-1</sup>	3.15·10 <sup>-2</sup>	1.60·10 <sup>-2</sup>	5.56·10 <sup>-2</sup>	1.28·10 <sup>-1</sup>	1.48·10 <sup>-1</sup>	8.90·10 <sup>-3</sup>	2.65·10 <sup>-3</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.33·10 <sup>1</sup>	1.24·10 <sup>1</sup>	5.31·10 <sup>-1</sup>	7.64·10 <sup>-2</sup>	2.43·10 <sup>-2</sup>	6.61·10 <sup>-2</sup>	1.35·10 <sup>-1</sup>	1.22·10 <sup>-1</sup>	6.53·10 <sup>-3</sup>	1.68·10 <sup>-3</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	4.63·10 <sup>1</sup>	4.47·10 <sup>1</sup>	9.59·10 <sup>-1</sup>	9.46·10 <sup>-2</sup>	3.95·10 <sup>-2</sup>	1.16·10 <sup>-1</sup>	1.97·10 <sup>-1</sup>	2.03·10 <sup>-1</sup>	2.16·10 <sup>-2</sup>	5.99·10 <sup>-3</sup>
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	7.02	6.86	8.47·10 <sup>-2</sup>	1.57·10 <sup>-3</sup>	6.40·10 <sup>-3</sup>	2.89·10 <sup>-2</sup>	1.91·10 <sup>-2</sup>	1.98·10 <sup>-2</sup>	3.33·10 <sup>-3</sup>	8.79·10 <sup>-4</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	2.87·10 <sup>-1</sup>	2.60·10 <sup>-1</sup>	2.02·10 <sup>-2</sup>	3.52·10 <sup>-4</sup>	1.26·10 <sup>-3</sup>	1.16·10 <sup>-3</sup>	1.61·10 <sup>-3</sup>	1.39·10 <sup>-3</sup>	1.48·10 <sup>-4</sup>	2.69·10 <sup>-5</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.18·10 <sup>5</sup>	3.15·10 <sup>5</sup>	8.79·10 <sup>2</sup>	2.12·10 <sup>1</sup>	1.53·10 <sup>2</sup>	3.65·10 <sup>2</sup>	8.20·10 <sup>2</sup>	1.30·10 <sup>3</sup>	1.38·10 <sup>2</sup>	4.21·10 <sup>1</sup>

Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.17·10 <sup>3</sup>	5.13·10 <sup>3</sup>	1.16·10 <sup>1</sup>	5.69·10 <sup>-1</sup>	6.43	1.45·10 <sup>1</sup>	2.92	7.12	2.40	6.67·10 <sup>-1</sup>
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4- DCB <sub>eq</sub> )	6.56·10 <sup>3</sup>	6.50·10 <sup>3</sup>	1.52·10 <sup>1</sup>	7.69·10 <sup>-1</sup>	7.87	1.90·10 <sup>1</sup>	4.10	9.45	3.05	8.46·10 <sup>-1</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4- DCB <sub>eq</sub> )	1.24·10 <sup>3</sup>	1.19·10 <sup>3</sup>	1.56·10 <sup>1</sup>	5.22·10 <sup>-1</sup>	1.26	2.16	1.43·10 <sup>1</sup>	1.36·10 <sup>1</sup>	6.27·10 <sup>-1</sup>	2.27·10 <sup>-1</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	6.59·10 <sup>4</sup>	6.52·10 <sup>4</sup>	2.40·10 <sup>2</sup>	8.57	4.09·10 <sup>1</sup>	2.16·10 <sup>2</sup>	6.13·10 <sup>1</sup>	1.08·10 <sup>2</sup>	3.06·10 <sup>1</sup>	8.34
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.45·10 <sup>2</sup>	1.30·10 <sup>2</sup>	6.83	2.49·10 <sup>-1</sup>	4.17	8.47·10 <sup>-1</sup>	1.67	1.43	1.02·10 <sup>-1</sup>	1.65·10 <sup>-2</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	3.69·10 <sup>2</sup>	3.45·10 <sup>2</sup>	1.58·10 <sup>1</sup>	4.40·10 <sup>-2</sup>	1.39·10 <sup>-1</sup>	1.03	3.00	3.69	1.45·10 <sup>-1</sup>	3.83·10 <sup>-2</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	8.53·10 <sup>2</sup>	7.26·10 <sup>2</sup>	4.70·10 <sup>1</sup>	5.13·10 <sup>1</sup>	1.78	5.20	1.09·10 <sup>1</sup>	9.61	4.71·10 <sup>-1</sup>	9.05·10 <sup>-2</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	3.54·10 <sup>1</sup>	3.05·10 <sup>1</sup>	2.73	6.19·10 <sup>-2</sup>	1.16	1.93·10 <sup>-1</sup>	4.99·10 <sup>-1</sup>	2.50·10 <sup>-1</sup>	2.12·10 <sup>-2</sup>	2.91·10 <sup>-3</sup>



Πιν. Γ.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία βλάβης	Σύνολο	Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης	Προσοφητικό υλικό	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρισμός. ΧΤ	Ηλεκτρ. και κυκλ. μονάδας επ. αποθ.	Συλλέκτες κενού	Δεξαμενή αποθ.	Δοχείο αδράνειας	Λέβητας φ.α.	Κυκλοφορητές
<b>1 kWh</b>											
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$2.68 \cdot 10^{-5}$	$4.28 \cdot 10^{-7}$	$1.89 \cdot 10^{-7}$	$2.53 \cdot 10^{-7}$	$1.75 \cdot 10^{-7}$	$2.38 \cdot 10^{-7}$	$3.18 \cdot 10^{-7}$	$2.61 \cdot 10^{-8}$	$2.59 \cdot 10^{-8}$	$7.46 \cdot 10^{-9}$
Οικοσυστήματα (species-yr)	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$2.63 \cdot 10^{-8}$	$8.41 \cdot 10^{-10}$	$5.25 \cdot 10^{-10}$	$5.88 \cdot 10^{-10}$	$2.12 \cdot 10^{-10}$	$3.14 \cdot 10^{-10}$	$3.47 \cdot 10^{-10}$	$5.53 \cdot 10^{-11}$	$2.71 \cdot 10^{-11}$	$6.92 \cdot 10^{-12}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$1.98 \cdot 10^{-1}$	$1.32 \cdot 10^{-2}$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$3.18 \cdot 10^{-3}$	$2.22 \cdot 10^{-3}$	$4.01 \cdot 10^{-3}$	$4.71 \cdot 10^{-3}$	$1.03 \cdot 10^{-3}$	$2.42 \cdot 10^{-4}$	$4.47 \cdot 10^{-5}$
<b>1 m<sup>2</sup></b>											
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$1.79 \cdot 10^{-2}$	$1.68 \cdot 10^{-2}$	$2.68 \cdot 10^{-4}$	$1.19 \cdot 10^{-4}$	$1.59 \cdot 10^{-4}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$	$1.49 \cdot 10^{-4}$	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.63 \cdot 10^{-5}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$4.68 \cdot 10^{-6}$
Οικοσυστήματα (species-yr)	$1.83 \cdot 10^{-5}$	$1.65 \cdot 10^{-5}$	$5.27 \cdot 10^{-7}$	$3.29 \cdot 10^{-7}$	$3.69 \cdot 10^{-7}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	$1.97 \cdot 10^{-7}$	$2.17 \cdot 10^{-7}$	$3.47 \cdot 10^{-8}$	$1.70 \cdot 10^{-8}$	$4.34 \cdot 10^{-9}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$1.55 \cdot 10^2$	$1.24 \cdot 10^2$	8.30	$1.30 \cdot 10^1$	1.99	1.39	2.51	2.95	$6.44 \cdot 10^{-1}$	$1.52 \cdot 10^{-1}$	$2.80 \cdot 10^{-2}$

Πιν. Γ.6 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία βλάβης	Σύνολο	Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης	Προσοφητικό υλικό	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρισμός. ΧΤ	Ηλεκτρ. και κυκλ. μονάδας επ. αποθ.	Συλλέκτες κενού	Δεξαμενή αποθ.	Λέβητας φ.α.	Κυκλοφορητές
<b>1 kWh</b>										
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$3.96 \cdot 10^{-5}$	$3.81 \cdot 10^{-5}$	$6.13 \cdot 10^{-7}$	$1.84 \cdot 10^{-7}$	$3.98 \cdot 10^{-8}$	$1.25 \cdot 10^{-7}$	$2.20 \cdot 10^{-7}$	$2.27 \cdot 10^{-7}$	$1.85 \cdot 10^{-8}$	$5.30 \cdot 10^{-9}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$4.00 \cdot 10^{-8}$	$3.75 \cdot 10^{-8}$	$1.21 \cdot 10^{-9}$	$5.14 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$1.51 \cdot 10^{-10}$	$2.92 \cdot 10^{-10}$	$2.50 \cdot 10^{-10}$	$1.95 \cdot 10^{-11}$	$4.91 \cdot 10^{-12}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$3.37 \cdot 10^{-1}$	$2.88 \cdot 10^{-1}$	$1.92 \cdot 10^{-2}$	$2.08 \cdot 10^{-2}$	$4.67 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-3}$	$3.76 \cdot 10^{-3}$	$3.43 \cdot 10^{-3}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$3.18 \cdot 10^{-5}$
<b>1 m<sup>2</sup></b>										
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$3.49 \cdot 10^{-2}$	$3.37 \cdot 10^{-2}$	$5.41 \cdot 10^{-4}$	$1.63 \cdot 10^{-4}$	$3.52 \cdot 10^{-5}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$	$1.94 \cdot 10^{-4}$	$2.00 \cdot 10^{-4}$	$1.63 \cdot 10^{-5}$	$4.68 \cdot 10^{-6}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$3.53 \cdot 10^{-5}$	$3.31 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-6}$	$4.54 \cdot 10^{-7}$	$9.25 \cdot 10^{-8}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	$2.57 \cdot 10^{-7}$	$2.20 \cdot 10^{-7}$	$1.72 \cdot 10^{-8}$	$4.34 \cdot 10^{-9}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$2.98 \cdot 10^2$	$2.54 \cdot 10^2$	$1.70 \cdot 10^1$	$1.83 \cdot 10^1$	$4.12 \cdot 10^{-1}$	1.40	3.32	3.02	$1.59 \cdot 10^{-1}$	$2.80 \cdot 10^{-2}$

Πιν. Γ.7 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία επίπτωσης	Σύστημα SWS-Heating		Σύστημα αναφοράς	
	1 kWh	1 m <sup>2</sup>	1 kWh	1 m <sup>2</sup>
Λειτουργική μονάδα				
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	2.97	1.86·10 <sup>3</sup>	7.53·10 <sup>-1</sup>	4.72·10 <sup>2</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.49·10 <sup>-6</sup>	1.56·10 <sup>-3</sup>	2.87·10 <sup>-7</sup>	1.80·10 <sup>-4</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	2.91·10 <sup>-1</sup>	1.83·10 <sup>2</sup>	2.92·10 <sup>-2</sup>	1.83·10 <sup>1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.06·10 <sup>-2</sup>	6.64	8.20·10 <sup>-4</sup>	5.14·10 <sup>-1</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	1.62·10 <sup>-2</sup>	1.01·10 <sup>1</sup>	6.18·10 <sup>-4</sup>	3.88·10 <sup>-1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.09·10 <sup>-2</sup>	6.81	8.66·10 <sup>-4</sup>	5.43·10 <sup>-1</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	3.75·10 <sup>-2</sup>	2.35·10 <sup>1</sup>	1.49·10 <sup>-3</sup>	9.36·10 <sup>-1</sup>
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	5.86·10 <sup>-3</sup>	3.67	3.18·10 <sup>-4</sup>	1.99·10 <sup>-1</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	2.44·10 <sup>-4</sup>	1.53·10 <sup>-1</sup>	2.19·10 <sup>-5</sup>	1.38·10 <sup>-2</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	2.55·10 <sup>2</sup>	1.60·10 <sup>5</sup>	4.02	2.52·10 <sup>3</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	4.16	2.61·10 <sup>3</sup>	7.83·10 <sup>-2</sup>	4.91·10 <sup>1</sup>
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.27	3.31·10 <sup>3</sup>	9.96·10 <sup>-2</sup>	6.25·10 <sup>1</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.02	6.40·10 <sup>2</sup>	4.35·10 <sup>-2</sup>	2.73·10 <sup>1</sup>

Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.31·10 <sup>1</sup>	3.33·10 <sup>4</sup>	1.09	6.83·10 <sup>2</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.16·10 <sup>-1</sup>	7.25·10 <sup>1</sup>	7.16·10 <sup>-3</sup>	4.49
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	3.00·10 <sup>-1</sup>	1.88·10 <sup>2</sup>	6.52·10 <sup>-3</sup>	4.09
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	7.38·10 <sup>-1</sup>	4.62·10 <sup>2</sup>	2.23·10 <sup>-1</sup>	1.40·10 <sup>2</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	2.88·10 <sup>-2</sup>	1.80·10 <sup>1</sup>	7.53·10 <sup>-1</sup>	1.55

Πιν. Γ.8 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία βλάβης	Σύστημα SWS-Heating		Σύστημα αναφοράς	
	1 kWh	1 m <sup>2</sup>	1 kWh	1 m <sup>2</sup>
Λειτουργική μονάδα				
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	2.85·10 <sup>-5</sup>	1.79·10 <sup>-2</sup>	1.48·10 <sup>-6</sup>	9.31·10 <sup>-4</sup>
Οικοσυστήματα (species·yr)	2.92·10 <sup>-8</sup>	1.83·10 <sup>-5</sup>	2.95·10 <sup>-9</sup>	1.85·10 <sup>-6</sup>
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	2.47·10 <sup>-1</sup>	1.55·10 <sup>2</sup>	6.81·10 <sup>-2</sup>	4.27·10 <sup>1</sup>

Πιν. Γ.9 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία επίπτωσης	Σύστημα SWS-Heating		Σύστημα αναφοράς	
	1 kWh	1 m <sup>2</sup>	1 kWh	1 m <sup>2</sup>
Λειτουργική μονάδα				
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	3.88	3.423·10 <sup>3</sup>	5.34·10 <sup>-1</sup>	4.709·10 <sup>2</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	3.15·10 <sup>-6</sup>	2.780·10 <sup>-3</sup>	1.80·10 <sup>-7</sup>	1.587·10 <sup>-4</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	4.46·10 <sup>-1</sup>	3.940·10 <sup>2</sup>	5.33·10 <sup>-2</sup>	4.706·10 <sup>1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.47·10 <sup>-2</sup>	1.299·10 <sup>1</sup>	6.14·10 <sup>-4</sup>	5.423·10 <sup>-1</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	2.26·10 <sup>-2</sup>	1.994·10 <sup>1</sup>	5.35·10 <sup>-4</sup>	4.725·10 <sup>-1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.51·10 <sup>-2</sup>	1.334·10 <sup>1</sup>	6.49·10 <sup>-4</sup>	5.728·10 <sup>-1</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	5.25·10 <sup>-2</sup>	4.630·10 <sup>1</sup>	1.29·10 <sup>-3</sup>	1.139
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	7.95·10 <sup>-3</sup>	7.021	1.43·10 <sup>-4</sup>	1.260·10 <sup>-1</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	3.25·10 <sup>-4</sup>	2.865·10 <sup>-1</sup>	9.32·10 <sup>-6</sup>	8.223·10 <sup>-3</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.61·10 <sup>2</sup>	3.184·10 <sup>5</sup>	4.81	4.241·10 <sup>3</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.86	5.173·10 <sup>3</sup>	8.72·10 <sup>-2</sup>	7.696·10 <sup>1</sup>
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	7.43	6.560·10 <sup>3</sup>	1.10·10 <sup>-1</sup>	9.740·10 <sup>1</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.41	1.242·10 <sup>3</sup>	2.97·10 <sup>-2</sup>	2.621·10 <sup>1</sup>

Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	$7.47 \cdot 10^1$	$6.590 \cdot 10^4$	1.08	$9.560 \cdot 10^2$
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	$1.65 \cdot 10^{-1}$	$1.455 \cdot 10^2$	$7.79 \cdot 10^{-3}$	6.874
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	$4.18 \cdot 10^{-1}$	$3.693 \cdot 10^2$	$5.76 \cdot 10^{-3}$	5.081
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	$9.66 \cdot 10^{-1}$	$8.526 \cdot 10^2$	$1.65 \cdot 10^{-1}$	$1.453 \cdot 10^2$
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	$4.01 \cdot 10^{-2}$	$3.544 \cdot 10^1$	$2.37 \cdot 10^{-3}$	2.090

Πιν. Γ.10 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το σύστημα αναφοράς και ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο "endpoint"

Κατηγορία βλάβης	Σύστημα SWS-Heating		Σύστημα αναφοράς	
	1 kWh	1 m <sup>2</sup>	1 kWh	1 m <sup>2</sup>
Λειτουργική μονάδα				
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$3.96 \cdot 10^{-5}$	$3.49 \cdot 10^{-2}$	$1.18 \cdot 10^{-6}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$4.00 \cdot 10^{-8}$	$3.53 \cdot 10^{-5}$	$2.16 \cdot 10^{-9}$	$1.91 \cdot 10^{-6}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$3.37 \cdot 10^{-1}$	$2.98 \cdot 10^2$	$5.61 \cdot 10^{-2}$	$4.95 \cdot 10^1$

Πιν. Γ.11 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες ανά θερμική kWh, σε επίπεδο “midpoint”

Κατηγορία επίπτωσης	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	Σουηδία (Στοκχόλμη)	Ελβετία (Ζυρίχη)	Ρουμανία (Βουκουρέστι)	Ιρλανδία (Δουβλίνο)	Πολωνία (Βαρσοβία)
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	2.97	3.88	2.52	2.78	2.50	4.58
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.49·10 <sup>-6</sup>	3.15·10 <sup>-6</sup>	2.17·10 <sup>-6</sup>	2.28·10 <sup>-6</sup>	2.12·10 <sup>-6</sup>	3.63·10 <sup>-6</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	2.91·10 <sup>-1</sup>	4.46·10 <sup>-1</sup>	2.91·10 <sup>-1</sup>	3.12·10 <sup>-1</sup>	2.19·10 <sup>-1</sup>	4.33·10 <sup>-1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.06·10 <sup>-2</sup>	1.47·10 <sup>-2</sup>	9.18·10 <sup>-3</sup>	9.93·10 <sup>-3</sup>	8.75·10 <sup>-3</sup>	1.71·10 <sup>-2</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	1.62·10 <sup>-2</sup>	2.26·10 <sup>-2</sup>	1.40·10 <sup>-2</sup>	1.51·10 <sup>-2</sup>	1.28·10 <sup>-2</sup>	2.62·10 <sup>-2</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	1.09·10 <sup>-2</sup>	1.51·10 <sup>-2</sup>	9.42·10 <sup>-3</sup>	1.02·10 <sup>-2</sup>	8.98·10 <sup>-3</sup>	1.75·10 <sup>-2</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	3.75·10 <sup>-2</sup>	5.25·10 <sup>-2</sup>	3.23·10 <sup>-2</sup>	3.47·10 <sup>-2</sup>	2.95·10 <sup>-2</sup>	6.10·10 <sup>-2</sup>
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	5.86·10 <sup>-3</sup>	7.95·10 <sup>-3</sup>	4.93·10 <sup>-3</sup>	5.43·10 <sup>-3</sup>	4.41·10 <sup>-3</sup>	9.41·10 <sup>-3</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	2.44·10 <sup>-4</sup>	3.25·10 <sup>-4</sup>	2.04·10 <sup>-4</sup>	2.29·10 <sup>-4</sup>	1.82·10 <sup>-4</sup>	3.89·10 <sup>-4</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	2.55·10 <sup>2</sup>	3.61·10 <sup>2</sup>	2.21·10 <sup>2</sup>	2.33·10 <sup>2</sup>	1.97·10 <sup>2</sup>	4.13·10 <sup>2</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	4.16	5.86	3.58	3.78	3.19	6.72
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.27	7.43	4.54	4.79	4.05	8.52
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.02	1.41	8.82·10 <sup>-1</sup>	9.38·10 <sup>-1</sup>	8.00·10 <sup>-1</sup>	1.63

Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	5.31·10 <sup>1</sup>	7.47·10 <sup>1</sup>	4.57·10 <sup>1</sup>	4.83·10 <sup>1</sup>	4.07·10 <sup>1</sup>	8.59·10 <sup>1</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.16·10 <sup>-1</sup>	1.65·10 <sup>-1</sup>	1.03·10 <sup>-1</sup>	1.08·10 <sup>-1</sup>	9.71·10 <sup>-2</sup>	1.87·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	3.00·10 <sup>-1</sup>	4.18·10 <sup>-1</sup>	2.61·10 <sup>-1</sup>	2.74·10 <sup>-1</sup>	2.35·10 <sup>-1</sup>	4.79·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	7.38·10 <sup>-1</sup>	9.66·10 <sup>-1</sup>	6.30·10 <sup>-1</sup>	6.99·10 <sup>-1</sup>	6.43·10 <sup>-1</sup>	1.13
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	2.88·10 <sup>-2</sup>	4.01·10 <sup>-2</sup>	2.72·10 <sup>-2</sup>	2.87·10 <sup>-2</sup>	2.24·10 <sup>-2</sup>	5.05·10 <sup>-2</sup>

Πιν. Γ.12 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας κτηρίου, σε επίπεδο "midpoint"

Κατηγορία επίπτωσης	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	Σουηδία (Στοκχόλμη)	Ελβετία (Ζυρίχη)	Ρουμανία (Βουκουρέστι)	Ιρλανδία (Δουβλίνο)	Πολωνία (Βαρσοβία)
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	1.86·10 <sup>3</sup>	3.42·10 <sup>3</sup>	1.38·10 <sup>3</sup>	1.45·10 <sup>3</sup>	1.03·10 <sup>3</sup>	3.53·10 <sup>3</sup>
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	1.56·10 <sup>-3</sup>	2.78·10 <sup>-3</sup>	1.19·10 <sup>-3</sup>	1.19·10 <sup>-3</sup>	8.74·10 <sup>-4</sup>	2.79·10 <sup>-3</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	1.83·10 <sup>2</sup>	3.94·10 <sup>2</sup>	1.59·10 <sup>2</sup>	1.62·10 <sup>2</sup>	9.02·10 <sup>1</sup>	3.33·10 <sup>2</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	6.64	1.30·10 <sup>1</sup>	5.02	5.17	3.61	1.31·10 <sup>1</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	1.01·10 <sup>1</sup>	1.99·10 <sup>1</sup>	7.67	7.87	5.29	2.02·10 <sup>1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	6.81	1.33·10 <sup>1</sup>	5.15	5.30	3.71	1.35·10 <sup>1</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	2.35·10 <sup>1</sup>	4.63·10 <sup>1</sup>	1.77·10 <sup>1</sup>	1.80·10 <sup>1</sup>	1.22·10 <sup>1</sup>	4.70·10 <sup>1</sup>



Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	3.67	7.02	2.70	2.82	1.82	7.25
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	1.53·10 <sup>-1</sup>	2.87·10 <sup>-1</sup>	1.11·10 <sup>-1</sup>	1.19·10 <sup>-1</sup>	7.52·10 <sup>-2</sup>	2.99·10 <sup>-1</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.60·10 <sup>5</sup>	3.18·10 <sup>5</sup>	1.21·10 <sup>5</sup>	1.21·10 <sup>5</sup>	8.14·10 <sup>4</sup>	3.18·10 <sup>5</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	2.61·10 <sup>3</sup>	5.17·10 <sup>3</sup>	1.96·10 <sup>3</sup>	1.96·10 <sup>3</sup>	1.32·10 <sup>3</sup>	5.18·10 <sup>3</sup>
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.31·10 <sup>3</sup>	6.56·10 <sup>3</sup>	2.48·10 <sup>3</sup>	2.49·10 <sup>3</sup>	1.67·10 <sup>3</sup>	6.57·10 <sup>3</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	6.40·10 <sup>2</sup>	1.24·10 <sup>3</sup>	4.82·10 <sup>2</sup>	4.88·10 <sup>2</sup>	3.30·10 <sup>2</sup>	1.25·10 <sup>3</sup>
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	3.33·10 <sup>4</sup>	6.59·10 <sup>4</sup>	2.50·10 <sup>4</sup>	2.51·10 <sup>4</sup>	1.68·10 <sup>4</sup>	6.61·10 <sup>4</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	7.25·10 <sup>1</sup>	1.45·10 <sup>2</sup>	5.60·10 <sup>1</sup>	5.63·10 <sup>1</sup>	4.01·10 <sup>1</sup>	1.44·10 <sup>2</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	1.88·10 <sup>2</sup>	3.69·10 <sup>2</sup>	1.43·10 <sup>2</sup>	1.43·10 <sup>2</sup>	9.71·10 <sup>1</sup>	3.69·10 <sup>2</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	4.62·10 <sup>2</sup>	8.53·10 <sup>2</sup>	3.44·10 <sup>2</sup>	3.64·10 <sup>2</sup>	2.65·10 <sup>2</sup>	8.74·10 <sup>2</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	1.80·10 <sup>1</sup>	3.54·10 <sup>1</sup>	1.49·10 <sup>1</sup>	1.50·10 <sup>1</sup>	9.25	3.89·10 <sup>1</sup>

Πιν. Γ.13 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating για εγκατάσταση σε όλες τις υπό εξέταση τοποθεσίες και ανά λειτουργική μονάδα, σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία βλάβης	Γερμανία (Ρέγκενσμπουργκ)	Σουηδία (Στοκχόλμη)	Ελβετία (Ζυρίχη)	Ρουμανία (Βουκουρέστι)	Ιρλανδία (Δουβλίνο)	Πολωνία (Βαρσοβία)
<b>1 kWh</b>						
<b>Ανθρώπινη Υγεία (DALY)</b>	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$3.96 \cdot 10^{-5}$	$2.46 \cdot 10^{-5}$	$2.63 \cdot 10^{-5}$	$2.24 \cdot 10^{-5}$	$4.58 \cdot 10^{-5}$
<b>Οικοσυστήματα (species·yr)</b>	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$4.00 \cdot 10^{-8}$	$2.50 \cdot 10^{-8}$	$2.71 \cdot 10^{-8}$	$2.33 \cdot 10^{-8}$	$4.67 \cdot 10^{-8}$
<b>Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)</b>	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$3.37 \cdot 10^{-1}$	$2.17 \cdot 10^{-1}$	$2.33 \cdot 10^{-1}$	$2.16 \cdot 10^{-1}$	$3.80 \cdot 10^{-1}$
<b>1 m<sup>2</sup></b>						
<b>Ανθρώπινη Υγεία (DALY)</b>	$1.79 \cdot 10^{-2}$	$3.49 \cdot 10^{-2}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	$9.23 \cdot 10^{-3}$	$3.53 \cdot 10^{-2}$
<b>Οικοσυστήματα (species·yr)</b>	$1.83 \cdot 10^{-5}$	$3.53 \cdot 10^{-5}$	$1.37 \cdot 10^{-5}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$9.62 \cdot 10^{-6}$	$3.59 \cdot 10^{-5}$
<b>Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)</b>	$1.55 \cdot 10^2$	$2.98 \cdot 10^2$	$1.18 \cdot 10^2$	$1.21 \cdot 10^2$	$8.93 \cdot 10^1$	$2.92 \cdot 10^2$

Πιν. Γ.14 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία βλάβης	Σύστημα SWS-Heating	Σύστημα αναφοράς
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-6}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$1.88 \cdot 10^{-9}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$2.98 \cdot 10^{-2}$

Πιν. Γ.15 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating σε αναφορά με το βελτιστοποιημένο σύστημα αναφοράς ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”

Κατηγορία βλάβης	Σύστημα SWS-Heating	Σύστημα αναφοράς
Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	$3.96 \cdot 10^{-5}$	$7.49 \cdot 10^{-7}$
Οικοσυστήματα (species·yr)	$4.00 \cdot 10^{-8}$	$1.25 \cdot 10^{-9}$
Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)	$3.37 \cdot 10^{-1}$	$2.48 \cdot 10^{-2}$

Πιν. Γ.16 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “midpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας

Κατηγορία επίπτωσης	Σύστημα αναφοράς	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη	Σύστημα SWS-Heating
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	7.53·10 <sup>-1</sup>	1.26	1.65	2.14	2.97
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	2.87·10 <sup>-7</sup>	1.20·10 <sup>-6</sup>	1.49·10 <sup>-6</sup>	1.88·10 <sup>-6</sup>	2.49·10 <sup>-6</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	2.92·10 <sup>-2</sup>	1.11·10 <sup>-1</sup>	1.50·10 <sup>-1</sup>	2.06·10 <sup>-1</sup>	2.91·10 <sup>-1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	8.20·10 <sup>-4</sup>	3.68·10 <sup>-3</sup>	5.17·10 <sup>-3</sup>	7.29·10 <sup>-3</sup>	1.06·10 <sup>-2</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	6.18·10 <sup>-4</sup>	5.18·10 <sup>-3</sup>	7.45·10 <sup>-3</sup>	1.10·10 <sup>-2</sup>	1.62·10 <sup>-2</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	8.66·10 <sup>-4</sup>	3.78·10 <sup>-3</sup>	5.31·10 <sup>-3</sup>	7.49·10 <sup>-3</sup>	1.09·10 <sup>-2</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	1.49·10 <sup>-3</sup>	1.18·10 <sup>-2</sup>	1.72·10 <sup>-2</sup>	2.54·10 <sup>-2</sup>	3.75·10 <sup>-2</sup>
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	3.18·10 <sup>-4</sup>	1.91·10 <sup>-3</sup>	2.72·10 <sup>-3</sup>	4.00·10 <sup>-3</sup>	5.86·10 <sup>-3</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	2.19·10 <sup>-5</sup>	8.92·10 <sup>-5</sup>	1.24·10 <sup>-4</sup>	1.69·10 <sup>-4</sup>	2.44·10 <sup>-4</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	4.02	7.62·10 <sup>1</sup>	1.12·10 <sup>2</sup>	1.72·10 <sup>2</sup>	2.55·10 <sup>2</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	7.83·10 <sup>-2</sup>	1.23	1.82	2.79	4.16
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	9.96·10 <sup>-2</sup>	1.57	2.31	3.54	5.27
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	4.35·10 <sup>-2</sup>	3.36·10 <sup>-1</sup>	4.76·10 <sup>-1</sup>	6.99·10 <sup>-1</sup>	1.02

Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.09	1.59·10 <sup>1</sup>	2.34·10 <sup>1</sup>	3.57·10 <sup>1</sup>	5.31·10 <sup>1</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	7.16·10 <sup>-3</sup>	4.16·10 <sup>-2</sup>	5.78·10 <sup>-2</sup>	8.01·10 <sup>-2</sup>	1.16·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	6.52·10 <sup>-3</sup>	9.90·10 <sup>-2</sup>	1.43·10 <sup>-1</sup>	2.04·10 <sup>-1</sup>	3.00·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	2.23·10 <sup>-1</sup>	3.18·10 <sup>-1</sup>	4.11·10 <sup>-1</sup>	5.35·10 <sup>-1</sup>	7.38·10 <sup>-1</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	2.46·10 <sup>-3</sup>	1.07·10 <sup>-2</sup>	1.49·10 <sup>-2</sup>	2.00·10 <sup>-2</sup>	2.88·10 <sup>-2</sup>

Πιν. Γ.17 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά θερμική kWh για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο "midpoint". Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας

Κατηγορία επίπτωσης	Σύστημα αναφοράς	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη	Σύστημα SWS-Heating
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2,eq</sub> )	5.34·10 <sup>-1</sup>	1.43	1.99	2.69	3.88
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	1.80·10 <sup>-7</sup>	1.30·10 <sup>-6</sup>	1.71·10 <sup>-6</sup>	2.26·10 <sup>-6</sup>	3.15·10 <sup>-6</sup>
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60 <sub>eq</sub> )	5.33·10 <sup>-2</sup>	1.84·10 <sup>-1</sup>	2.40·10 <sup>-1</sup>	3.22·10 <sup>-1</sup>	4.46·10 <sup>-1</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x,eq</sub> )	6.14·10 <sup>-4</sup>	4.77·10 <sup>-3</sup>	6.92·10 <sup>-3</sup>	9.97·10 <sup>-3</sup>	1.47·10 <sup>-2</sup>
Σχηματισμός σωματιδίων (kg PM <sub>2.5,eq</sub> )	5.35·10 <sup>-4</sup>	6.92·10 <sup>-3</sup>	1.02·10 <sup>-2</sup>	1.52·10 <sup>-2</sup>	2.26·10 <sup>-2</sup>
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x,eq</sub> )	6.49·10 <sup>-4</sup>	4.90·10 <sup>-3</sup>	7.10·10 <sup>-3</sup>	1.02·10 <sup>-2</sup>	1.51·10 <sup>-2</sup>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2,eq</sub> )	1.29·10 <sup>-3</sup>	1.59·10 <sup>-2</sup>	2.35·10 <sup>-2</sup>	3.52·10 <sup>-2</sup>	5.25·10 <sup>-2</sup>

Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	1.43·10 <sup>-4</sup>	2.37·10 <sup>-3</sup>	3.52·10 <sup>-3</sup>	5.33·10 <sup>-3</sup>	7.95·10 <sup>-3</sup>
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	9.32·10 <sup>-6</sup>	1.06·10 <sup>-4</sup>	1.56·10 <sup>-4</sup>	2.19·10 <sup>-4</sup>	3.25·10 <sup>-4</sup>
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	4.81	1.06·10 <sup>2</sup>	1.57·10 <sup>2</sup>	2.42·10 <sup>2</sup>	3.61·10 <sup>2</sup>
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	8.72·10 <sup>-2</sup>	1.71	2.54	3.92	5.86
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.10·10 <sup>-1</sup>	2.17	3.22	4.97	7.43
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	2.97·10 <sup>-2</sup>	4.35·10 <sup>-1</sup>	6.35·10 <sup>-1</sup>	9.51·10 <sup>-1</sup>	1.41
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (kg 1,4-DCB <sub>eq</sub> )	1.08	2.18·10 <sup>1</sup>	3.25·10 <sup>1</sup>	5.00·10 <sup>1</sup>	7.47·10 <sup>1</sup>
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	7.79·10 <sup>-3</sup>	5.69·10 <sup>-2</sup>	8.05·10 <sup>-2</sup>	1.13·10 <sup>-1</sup>	1.65·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	5.76·10 <sup>-3</sup>	1.33·10 <sup>-1</sup>	1.95·10 <sup>-1</sup>	2.82·10 <sup>-1</sup>	4.18·10 <sup>-1</sup>
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	1.65·10 <sup>-1</sup>	3.60·10 <sup>-1</sup>	4.96·10 <sup>-1</sup>	6.74·10 <sup>-1</sup>	9.66·10 <sup>-1</sup>
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	2.37·10 <sup>-3</sup>	1.44·10 <sup>-2</sup>	2.04·10 <sup>-2</sup>	2.76·10 <sup>-2</sup>	4.01·10 <sup>-2</sup>

Πιν. Γ.18 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στο Ρέγκενσμπουργκ της Γερμανίας, σε επίπεδο “endpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας

Κατηγορία βλάβης	Σύστημα αναφοράς	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη	Σύστημα SWS-Heating
<b>1 kWh</b>					
<b>Ανθρώπινη Υγεία (DALY)</b>	$1.48 \cdot 10^{-6}$	$9.18 \cdot 10^{-6}$	$1.32 \cdot 10^{-5}$	$1.94 \cdot 10^{-5}$	$2.85 \cdot 10^{-5}$
<b>Οικοσυστήματα (species·yr)</b>	$2.95 \cdot 10^{-9}$	$1.01 \cdot 10^{-8}$	$1.42 \cdot 10^{-8}$	$2.02 \cdot 10^{-8}$	$2.92 \cdot 10^{-8}$
<b>Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)</b>	$6.81 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-1}$	$1.34 \cdot 10^{-1}$	$1.77 \cdot 10^{-1}$	$2.47 \cdot 10^{-1}$
<b>1 m<sup>2</sup></b>					
<b>Ανθρώπινη Υγεία (DALY)</b>	$9.31 \cdot 10^{-4}$	$5.76 \cdot 10^{-3}$	$8.25 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$1.79 \cdot 10^{-2}$
<b>Οικοσυστήματα (species·yr)</b>	$1.85 \cdot 10^{-6}$	$6.36 \cdot 10^{-6}$	$8.89 \cdot 10^{-6}$	$1.26 \cdot 10^{-5}$	$1.83 \cdot 10^{-5}$
<b>Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)</b>	$4.27 \cdot 10^1$	$6.36 \cdot 10^1$	$8.41 \cdot 10^1$	$1.11 \cdot 10^2$	$1.55 \cdot 10^2$

Πιν. Γ.19 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος SWS-Heating ανά λειτουργική μονάδα για εγκατάσταση στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, σε επίπεδο “endpoint”. Επίδραση της διάρκειας ζωής του συστήματος και του συντελεστή κλίμακας

Κατηγορία βλάβης	Σύστημα αναφοράς	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Συντ. κλιμ. 0.3	Σύστημα SWS-Heating – Διάρκεια ζωής 30 έτη	Σύστημα SWS-Heating
<b>1 kWh</b>					
<b>Ανθρώπινη Υγεία (DALY)</b>	$1.18 \cdot 10^{-6}$	$1.21 \cdot 10^{-5}$	$1.78 \cdot 10^{-5}$	$2.67 \cdot 10^{-5}$	$3.96 \cdot 10^{-5}$
<b>Οικοσυστήματα (species·yr)</b>	$2.16 \cdot 10^{-9}$	$1.29 \cdot 10^{-8}$	$1.86 \cdot 10^{-8}$	$2.71 \cdot 10^{-8}$	$4.00 \cdot 10^{-8}$
<b>Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)</b>	$5.61 \cdot 10^{-2}$	$1.25 \cdot 10^{-1}$	$1.73 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$	$3.37 \cdot 10^{-1}$
<b>1 m<sup>2</sup></b>					
<b>Ανθρώπινη Υγεία (DALY)</b>	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$1.07 \cdot 10^{-2}$	$1.57 \cdot 10^{-2}$	$2.35 \cdot 10^{-2}$	$3.49 \cdot 10^{-2}$
<b>Οικοσυστήματα (species·yr)</b>	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$1.64 \cdot 10^{-5}$	$2.39 \cdot 10^{-5}$	$3.53 \cdot 10^{-5}$
<b>Ορυκτοί Πόροι (USD 2013)</b>	$4.95 \cdot 10^1$	$1.11 \cdot 10^2$	$1.53 \cdot 10^2$	$2.07 \cdot 10^2$	$2.98 \cdot 10^2$



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. IEA, World Energy Outlook 2019, 2019. Paris. Available from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
2. Eurostat. *Energy consumption in households* 2020; Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households#Energy\\_products\\_used\\_in\\_the\\_residential\\_sector](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_products_used_in_the_residential_sector).
3. IEA, World Energy Outlook 2018, 2018. Paris. Available from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
4. Ευρωπαϊκή Ένωση, *ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2018/2001 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ*, in 328/82. 2018.
5. Kalogirou, S.A., *Solar thermal collectors and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2004. **30**(3): p. 231-295.
6. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα*. 2015, Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ. 652.
7. Tian, Y. and C.Y. Zhao, *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*. Applied Energy, 2013. **104**: p. 538-553.
8. Lauterbach, C., B. Schmitt, and K. Vajen, *System analysis of a low-temperature solar process heat system*. Solar Energy, 2014. **101**: p. 117-130.
9. Benz, N., et al. *Flat-plate solar collector with glass TI*. in *Proceedings of Eurosun*. 1998.
10. Kalogirou, S.A., *Solar energy engineering: processes and systems*. 2014: Academic Press.
11. freehotwater. 2010; Available from: <http://www.freehotwater.com/solar-thermal-101-flat-plate-solar-collectors/>.
12. Shafieian, A., M. Khiadani, and A. Nosrati, *A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **95**: p. 273-304.
13. Hudon, K., *Chapter 20 - Solar Energy – Water Heating*, in *Future Energy (Second Edition)*, T.M. Letcher, Editor. 2014, Elsevier: Boston. p. 433-451.
14. Foster, R., M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy: renewable energy and the environment*. 2010: CRC press.
15. Zeosol. 2021 [cited 17/3/2021]; Available from: <http://zeosol.eu/>.
16. Sabiha, M.A., et al., *Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **51**: p. 1038-1054.
17. Gao, Y., et al., *Effects of thermal mass and flow rate on forced-circulation solar hot-water system: Comparison of water-in-glass and U-pipe evacuated-tube solar collectors*. Solar Energy, 2013. **98**: p. 290-301.
18. Olfian, H., S.S.M. Ajarostaghi, and M. Ebrahimnataj, *Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids*. Solar Energy, 2020. **211**: p. 265-282.
19. Huaian Dingsheng Solar Energy Co., L. 2020 [cited 15/3/2021]; Available from: <http://sssolartech.com/Heat/6.html>.
20. Olia, H., et al., *Application of Nanofluids in Thermal Performance Enhancement of Parabolic Trough Solar Collector: State-of-the-Art*. Applied Sciences, 2019. **9**: p. 463.

21. Fernández-García, A., et al., *Parabolic-trough solar collectors and their applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(7): p. 1695-1721.
22. 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.
23. Xu, J., R.Z. Wang, and Y. Li, *A review of available technologies for seasonal thermal energy storage*. Solar Energy, 2014. **103**: p. 610-638.
24. Rahman, M.M., et al., *Assessment of energy storage technologies: A review*. Energy Conversion and Management, 2020. **223**: p. 113295.
25. Dincer, I. and M. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications, Second Edition*. 2010. i-xix.
26. Thomas Schmidt, O.M. *Solar district heating guidelines, Storage 2012* [cited 22/3/2021]; Available from: <https://www.solar-district-heating.eu/en/knowledge-database/>.
27. Han, Y.M., R.Z. Wang, and Y.J. Dai, *Thermal stratification within the water tank*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(5): p. 1014-1026.
28. Kalaiselvam, S. and R. Parameshwaran, *Seasonal Thermal Energy Storage*. 2014. p. 145-162.
29. Pfeil, M. and H. Koch, *High performance–low cost seasonal gravel/water storage pit*. Solar Energy, 2000. **69**(6): p. 461-467.
30. Givoni, B., *Underground longterm storage of solar energy—An overview*. Solar Energy, 1977. **19**(6): p. 617-623.
31. Abhat, A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. Solar energy, 1983. **30**(4): p. 313-332.
32. Wang, X., et al., *Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope*. Chinese science bulletin, 2009. **54**(6): p. 920-928.
33. Bales, C., et al., *Thermal properties of materials for thermo-chemical storage of solar heat*. Report B2-IEA SHC Task, 2005. **32**.
34. International Organization for Standardization, *ISO:14040, in Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. 2006: Geneva.
35. Dašić, P., *Analysis and evaluation of software tools for life cycle assessment*. Annals of the University of Petrosani, Electrical Engineering, 2007. **9**: p. 6-15.
36. Κορωνάιος, X., *Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Η ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Προσέγγιση στην Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη*.
37. Κακαράς, E. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρροπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ.
38. Koninklijke Philips N.V. 2004 - 2020. 2021 [cited 29/3/2021]; Available from: <https://www.innovationservices.philips.com/news/life-cycle-assessment-finding-best-approach-company/>.
39. International Organization for Standardization, *ISO:14044, in Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. 2006: Geneva.
40. Matthews, H., C. Hendrickson, and D. Matthews, *Life cycle assessment: Quantitative approaches for decisions that matter, 2015*. Publicly available via <http://www.lcatextbook.com/>. Accessed, 2018. **11**.
41. ecoinvent. [cited 30/3/2021]; Available from: <https://www.ecoinvent.org/>.

42. Goedkoop, M., et al., *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.
43. Huijbregts, M., et al., *ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization*. 2016.
44. Pre Sustainability BV, v.a., *SimaPro Database Manual Methods Library*. 2018. 65.
45. 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.
46. Thompson M., E.R., Wildavsky A., *Cultural Theory*. 1990: Westview Print Boulder.
47. Bonamente, E. and A. Aquino, *Environmental performance of innovative ground-source heat pumps with pcm energy storage*. *Energies*, 2020. **13**(1): p. 117.
48. Simons, A. and S.K. Firth, *Life-cycle assessment of a 100% solar fraction thermal supply to a European apartment building using water-based sensible heat storage*. *Energy and Buildings*, 2011. **43**(6): p. 1231-1240.
49. Raluy, R.G., et al., *Life cycle assessment of central solar heating plants with seasonal storage*. *Energy Procedia*, 2014. **48**: p. 966-976.
50. Colclough, S. and T. McGrath, *Net energy analysis of a solar combi system with Seasonal Thermal Energy Store*. *Applied Energy*, 2015. **147**: p. 611-616.
51. Tomasetta, C., C. Van Ree, and J. Griffioen, *Life cycle analysis of underground thermal energy storage*, in *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5*. 2015, Springer. p. 1213-1217.
52. Schüppler, S., P. Fleuchaus, and P. Blum, *Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany*. *Geothermal Energy*, 2019. **7**(1): p. 1-24.
53. Guillén-Lambea, S., et al., *Sustainable enhancement of district heating and cooling configurations by combining thermal energy storage and life cycle assessment*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020: p. 1-11.
54. Karasu, H. and I. Dincer, *Life cycle assessment of integrated thermal energy storage systems in buildings: A case study in Canada*. *Energy and Buildings*, 2020. **217**: p. 109940.
55. Oró, E., et al., *Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants*. *Renewable Energy*, 2012. **44**: p. 166-173.
56. Paiho, S., H. Hoang, and M. Hukkalainen, *Energy and emission analyses of solar assisted local energy solutions with seasonal heat storage in a Finnish case district*. *Renewable Energy*, 2017. **107**: p. 147-155.
57. Aristov, Y.I., et al., *A family of new working materials for solid sorption air conditioning systems*. *Applied thermal engineering*, 2002. **22**(2): p. 191-204.
58. Aristov, Y.I., et al., *Selective water sorbents for multiple applications, I. CaCl<sub>2</sub> confined in mesopores of silica gel: sorption properties*. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 1996. **59**(2): p. 325-333.
59. Aristov, Y.I., *New family of solid sorbents for adsorptive cooling: material scientist approach*. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007. **16**(2): p. 63-72.

60. Grekova, A.D., L.G. Gordeeva, and Y.I. Aristov, *Composite “LiCl/vermiculite” as advanced water sorbent for thermal energy storage*. Applied Thermal Engineering, 2017. **124**: p. 1401-1408.
61. © 2020 AKOTEC. 2021 [cited 7/9/2021]; Available from: <https://www.akotec.eu/>.
62. © 2020 Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH. 2021 [cited 7/9/2021]; Available from: <https://www.sirch.com/start/>.
63. © PCM Products Ltd. 2021 [cited 2/9/2021]; Available from: <https://www.pcmproducts.net/>.
64. ©RIELLO SPA. RESIDENCE| CONDENSING WALL HUNG BOILERS - RESIDENCE 25 KIS. 2021 [cited 14/5/2021]; Available from: [https://www.riello.com/international/products/heating-catalogue-products/residence\\_R-EX-PL-0011659?k=Product+Line%7CR-EX-PL-0004110%7C-](https://www.riello.com/international/products/heating-catalogue-products/residence_R-EX-PL-0011659?k=Product+Line%7CR-EX-PL-0004110%7C-).
65. Che, D., Y. Liu, and C. Gao, *Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler*. Energy Conversion and Management, 2004. **45**(20): p. 3251-3266.
66. Grundfos Holding A/S. 2021; Available from: <https://www.grundfos.com/>.
67. WILO SE. 2021; Available from: <https://wilo.com/gr/el/>.
68. Bai, Y., et al., *Numerical and experimental study of an underground water pit for seasonal heat storage*. Renewable Energy, 2020. **150**: p. 487-508.
69. Drosou, V.N., et al., *The HIGH-COMBI project: High solar fraction heating and cooling systems with combination of innovative components and methods*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **29**: p. 463-472.
70. Pinel, P., et al., *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(7): p. 3341-3359.
71. 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.
72. Symeonidis, A. 2017 [cited 30/3/2021]; Available from: <https://www.ecoinvent.org/support/ecoinvent-forum/topic.html?&tid=429>.
73. Saeki, Y. and T. Emura, *Technical progresses for PVC production*. Progress in Polymer Science, 2002. **27**(10): p. 2055-2131.
74. Vignali, G., *Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology*. Journal of Cleaner Production, 2017. **142**: p. 2493-2508.
75. de Gracia, A., et al., *Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings*. Energy and Buildings, 2010. **42**(9): p. 1517-1523.
76. ©Copyright 2015 Panthermica. 2021; Available from: <https://www.panthermica.gr/thermansy-psyxi/docheia-adraneias>.
77. Copyright © 2021 THERMOGAS. 2021; Available from: <https://thermogas.gr/product-detail/aurocompact-vsc/>.
78. Google. 2021 [cited 15/4/2021]; Available from: <https://www.google.gr/maps/>.
79. University of Wisconsin--Madison. Solar Energy, L., *TRNSYS, a transient simulation program*. 1975: Madison, Wis. : The Laboratory, 1975.
80. IEA, Key World Energy Statistics, 2010. Paris. Available from: [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key\\_stats\\_2010.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf).

81. Directive, E., *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE*. Official Journal of the European Union L, 2012. **197**: p. 38-71.
82. Roumpedakis, T.C., et al., *Life cycle analysis of ZEOSOL solar cooling and heating system*. Renewable Energy, 2020.
83. 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.
84. Bonamente, E. and A. Aquino, *Life-cycle assessment of an innovative ground-source heat pump system with upstream thermal storage*. Energies, 2017. **10**(11): p. 1854.
85. Zhang, H., et al., *Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects*. Progress in Energy and Combustion Science, 2016. **53**: p. 1-40.
86. Antoniadis, C.N. and G. Martinopoulos, *Simulation of Solar Thermal Systems with Seasonal Storage Operation for Residential Scale Applications*. Procedia Environmental Sciences, 2017. **38**: p. 405-412.
87. Lizana, J., et al., *Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **82**: p. 3705-3749.
88. Raluy, R.G., et al., *Environmental assessment of central solar heating plants with seasonal storage located in Spain*. Journal of Cleaner Production, 2021. **314**: p. 128078.
89. Infante Ferreira, C. and D.-S. Kim, *Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific data*. International Journal of Refrigeration, 2014. **39**: p. 23-37.
90. ©Viessmann Luxembourg sarl. *VITOSOL 300-F*. 2019; Available from: <https://www.viessmann.lu/de/wohngebaeude/solarsysteme/Flachkollektoren/vitosol-300-f.html>.
91. Chung, M., J.-U. Park, and H.-K. Yoon, *SIMULATION OF A CENTRAL SOLAR HEATING SYSTEM WITH SEASONAL STORAGE IN KOREA*. Solar Energy, 1998. **64**(4): p. 163-178.
92. Claesson, J., et al., *Markvärme: En handbok om termiska analyser*. 1985: Statens råd för byggnadsforskning.
93. Wischhusen, S. *An enhanced discretization method for storage tank models within energy systems*. in *Proc. of the 5-th International Modelica Conference*. 2006.