

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως μεθοδολογικό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση ηλιακών συλλεκτών ειδικής σχεδίασης

Νεκτάριος Αρναουτάκης

Επιβλέπων καθηγητής
Παπαευθυμίου Σπυρίδων

Χανιά, Μάρτιος 2025

Στη μνήμη των γονιών μου

Περίληψη

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι μία μεθοδολογία εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο το κύκλο ζωής ενός προϊόντος ή ενός συστήματος: επεξεργασία πρώτων υλών, κατασκευή, χρήση, τελική απόρριψη. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή η ΑΚΖ χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων και συγκεκριμένα συστημάτων με ολοκληρωμένη συσκευή συλλέκτη αποθήκης θερμότητας (Integrated Collector Storage, ICS).

Αρχικά μελετώνται εφαρμογές της ΑΚΖ σε ηλιακά θερμικά συστήματα γενικά καθώς και στην τεχνική σχεδίαση τέτοιου τύπου συστημάτων. Αναφέρονται τα είδη του συλλέκτη που χρησιμοποιούνται από τα πιο απλά μέχρι τα πιο σύνθετα - με παραβολικό ανακλαστήρα (Compound Parabolic Concentrator, CPC). Εξετάζονται δύο τύποι ICS συστημάτων: α) σύστημα με ασύμμετρο ανακλαστήρα CPC και διπλό δοχείο νερού και β) σύστημα με συμμετρικό ανακλαστήρα CPC και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά. Τα συγκεκριμένα συστήματα θα αποτελέσουν τη «βάση» για τη πρόταση σχεδιαστικών λύσεων και προτάσεων με στόχο τη παραγωγή νέων ICS συστημάτων με βελτιωμένη απόδοση καθώς επίσης «οικονομικότερα» και με βελτιωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε ολόκληρο το κύκλο λειτουργικής ζωής τους.

Η παραπάνω διαδικασία έγινε με μαθηματική βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδίασης, δηλαδή δημιουργία μαθηματικών παραμετρικών μοντέλων απόδοσης και κόστους με χρήση περισσότερων του ενός αντικειμενικών συναρτήσεων (Πρόβλημα μη γραμμικής πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης: Nonlinear Multi-Objective Optimization).

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος της ΑΚΖ σε ένα συνήθη ICS σύστημα που υπάρχει στην Ελληνική αγορά. Με αυτό τον τρόπο αντλήθηκαν στοιχεία που αφορούσαν τα ICS συστήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια στη διαδικασία βέλτιστης σχεδίασης ώστε να «προσεγγιστούν» παράμετροι των πρότυπων ICS συστημάτων για τους οποίους ήταν πολύ δύσκολο να βρεθούν πραγματικά στοιχεία (όπως για παράδειγμα το κόστος παραγωγής που αφορούσε οικονομικά στοιχεία στη διαδικασία παραγωγής).

Στο επόμενο στάδιο έγινε η παραμετρική βελτιστοποίηση των νέων ICS συστημάτων, με τη δημιουργία των αναλυτικών εξισώσεων σχεδίασης και τον ορισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων ενεργειακής απόδοσης (μέση ημερήσια απόδοση και συντελεστής θερμικών απωλειών δεξαμενής νερού) και κόστους (κόστος παραγωγής στη βιομηχανία). Η διαδικασία αυτή έγινε με συνδυασμό δεδομένων βιβλιογραφίας και μοντελοποίησης ώστε να παραχθούν οι νέες εξισώσεις σχεδίασης των ICS. Χρησιμοποιήθηκε ένας πρωτότυπος μαθηματικός αλγόριθμος που δίνει τη βέλτιστη γεωμετρία των παραβολικών CPC ανακλαστήρων καθώς και τον αριθμό ICS μονάδων που θα εγκατασταθούν σε οικίες, ο οποίος δημιουργήθηκε με βάση ένα παλαιότερο αλγόριθμο μη γραμμικής βελτιστοποίησης μίας όμως αντικειμενικής συνάρτησης. Σε αυτό το στάδιο έγινε και η σύγκριση των νέων καμπύλων απόδοσης (που προκύπτουν από τη μαθηματική βελτιστοποίηση) με τις αντίστοιχες καμπύλες απόδοσης των παλαιότερων μοντέλων και ενός συμβατικού ηλιακού θερμικού συστήματος με επίπεδο συλλέκτη (Flat Plate Thermosiphonic Unit: FPTU). Δημιουργήθηκε επίσης ένα πρωτότυπο δημιουργίας της παραβολικής επιφάνειας σε περιβάλλον CAD για χρήση σε εργαλειομηχανές

αριθμητικού ελέγχου (**CNC: Computerized Numerical Control**) κατασκευής παραβολικών CPC ανακλαστήρων. Στη συνέχεια έγινε η σχεδίαση των υπολοίπων τμημάτων των ICS με μία πρωτότυπη μαθηματική τεχνική υπολογισμού των διαστάσεων τους, με βάση τα πρότυπα τους.

Στο τελικό στάδιο της διατριβής έγινε η ενεργειακή, περιβαλλοντική και οικονομική σύγκριση των νέων ICS με τα αντίστοιχα πρότυπα τους καθώς και με το FPTU ώστε να φανεί η βελτιωμένη απόδοση τους σε σχέση με τα παλαιότερα ICS, η οποία έδειξε ότι τείνει να προσεγγίσει την απόδοση των συμβατικών ηλιακών θερμικών συστημάτων της αγοράς με αρκετά μικρότερο κόστος.

ABSTRACT

LCA methodology studies the environmental impacts throughout the life cycle of a product or system: raw material processing, manufacturing, life time operation and final disposal. In this Phd dissertation, LCA is used as a reference point for the optimal design of special type solar thermal systems: systems with an integrated collector storage (ICS).

Initially applications of LCA methodology in solar heating systems are presented and information about the technical design of conventional solar thermal systems are provided. The types of solar collectors used are described, from the simplest to the most complex – i.e. Compound Parabolic Concentrators (CPCs). Two types of ICS systems are mentioned: a) system with an asymmetric CPC reflector and a double wall tank and b) system with a symmetric CPC reflector and two water storage tanks. These systems were the "prototypes" for proposing design solutions and proposals aimed at producing new ICS systems with improved performance as well as "more economical" and with an improved environmental footprint throughout their entire operational life cycle.

Mathematical optimization was applied in order to simulate the design parameters, i.e. creation of mathematical parametric models of performance and cost. Therefore, more than one objective function was used (Nonlinear Multi-Objective Optimization Problem).

In the first stage of the study, the LCA methodology was applied to a commercial type ICS system of the Greek market. In this way, information about ICS systems were deployed and then used in the optimal design process to "approach" parameters of standard ICS systems for which it was very difficult to find real data (e.g. the production cost).

In the next stage, a Multi-Objective optimization was applied to the new ICS systems, creating the equations and the objective functions of energy efficiency (mean daily efficiency and thermal loss coefficient) and production cost. In this stage, a combination of existing literature and mathematical operations was made to create the design equations of the new ICS systems. A mathematical algorithm was created to evaluate the optimal geometry of the parabolic CPC reflectors as well as the number of ICS units which will be installed in buildings for hot water production, which based on an original algorithm for nonlinear optimization of a single objective function. The energy performance curves of the designed by the algorithm systems were compared with the corresponding energy performance curves of original models and a conventional type solar thermal system (Flat Plate Thermosiphonic Unit: FPTU). The next step was the development of a prototype way to design the parabolic surface in a CAD environment, for use in CNC (Computerized Numerical Control) machines for the manufacturing of parabolic CPC reflectors. Finally, the other parts of the ICS systems were designed using a prototype mathematical technique for calculating their dimensions, based on original models.

In the final stage of the dissertation, the energy, environmental and economic study of the new ICS devices compared to the respective prototypes as well as with the FPTU unit, was made to demonstrate the improvements in the performance of the algorithmically designed versus the original models. The study indicates that the new ICS systems approach the performance of

conventional devices at a much lower cost, so might serve as an advisor for the design and selection of improved ICS devices, which will be installed in buildings for domestic applications.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

1. N. Arnaoutakis, F. Kanelos and S. Papaefthimiou, “Combined Operation, Modeling and life cycle assessment of a Generic Hybrid Power System installed in Crete”, *Energy Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 343–359, May 2018, doi: 10.1007/S12667-017-0241-0/METRICS.
2. N. Arnaoutakis, M. Souliotis, and S. Papaefthimiou, “Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications,” *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 187–200, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.008.
3. M. Souliotis, N. Arnaoutakis, G. Panaras, A. Kavga, and S. Papaefthimiou, “Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications,” *Renew. Energy*, vol. 126, pp. 708–723, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.011.
4. N. Arnaoutakis, M. Milousi, S. Papaefthimiou, P. A. Fokaides, Y. G. Caouris, and M. Souliotis, “Life cycle assessment as a methodological tool for the optimum design of integrated collector storage solar water heaters,” *Energy*, vol. 182, pp. 1084–1099, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.097.
5. N. Arnaoutakis *et al.*, “Design, Energy, Environmental and Cost Analysis of an Integrated Collector Storage Solar Water Heater Based on Multi-Criteria Methodology,” *Energies*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15051673.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Τίτλος (ελληνικά/αγγλικά): «Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως μεθοδολογικό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση ηλιακών συλλεκτών ειδικής σχεδίασης»

“Life Cycle Analysis as a methodological tool for the optimization of solar collectors with special design”

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

(Ονοματεπώνυμο διδάκτορα) Νεκτάριος Αρναουτάκης

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

- | | |
|-------------------------------|--------------------|
| 1. Παπαευθυμίου Σπύρος | (Επιβλέπων) |
| 2. Αραμπατζής Γεώργιος | |
| 3. Σουλιώτης Μανώλης | |

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 05. / 03 / 2025

- | | |
|--|-------------------|
| 1. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Παπαευθυμίου Σπύρος | (υπογραφή) |
| 2. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Αραμπατζής Γεώργιος | |
| 3. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Σουλιώτης Μανώλης | |
| 4. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Ζοπουνίδης Κωνσταντίνος | |
| 5. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Ιψάκης Δημήτριος | |
| 6. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Πουλιέζος Αναστάσιος. | |
| 7. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Λεμονάκης Χρήστος | |

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο Νεκτάριος Αρναουτάκης γεννήθηκε το 1972 στη Νεάπολη Κρήτης και φοίτησε στο Γυμνάσιο και Λύκειο. Το 1990 εισήχθη στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης από όπου αποφοίτησε το 1995.

Στη συνέχεια εισήχθη στο Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων από το οποίο αποφοίτησε με Δίπλωμα Μάστερ το 1999.

Μετά το πέρας των στρατιωτικών του υποχρεώσεων, εργάζεται έως σήμερα στο εργαστήριο Βιομηχανικών Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Συστημάτων της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ομιλεί αγγλικά.

Έχει επίσης αποκτήσει και ένα γιό τον Δημήτρη.

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση της Διδακτορικής μου Διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές Παπαευθυμίου Σπύρο, Σουλιώτη Εμμανουήλ και Αραμπατζή Γεώργιο για τις εύστοχες παρατηρήσεις που έκαναν με σκοπό την βελτίωση της διατριβής.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον επιβλέπωντα καθηγητή κ. Παπαευθυμίου Σπύρο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την βοήθεια, συμπαράσταση και καθοδήγηση που μου παρείχε όσο χρόνο διήρκεσε η εργασία αυτή και επίσης τον καθηγητή του πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας κ. Σουλιώτη Εμμανουήλ για τις πολύτιμες πληροφορίες του πάνω στην πειραματική μελέτη ηλιακών θερμικών συστημάτων με παραβολικό ανακλαστήρα καθώς και για όλη τη βοήθεια του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ τέλος τον Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Πουλιδάκη Γεώργιο για τα πολύτιμα στοιχεία πάνω σε ηλιακούς θερμοσίφωνες με επίπεδο συλλέκτη τα οποία συνέβαλαν σε μέγιστο βαθμό στην συγκριτική μελέτη μεταξύ των ηλιακών θερμικών συστημάτων που έγινε στο τέλος της διδακτορικής διατριβής.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 3 |
| ABSTRACT | 5 |
| Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά | 7 |
| ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ | 9 |
| Ευχαριστίες | 10 |
| Περιεχόμενα..... | 11 |
| 1. Η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και οι εφαρμογές της σε ηλιακά θερμικά συστήματα – Σχεδίαση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού..... | 13 |
| 1.1 Παρουσίαση μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε ηλιακά θερμικά συστήματα..... | 13 |
| 1.2 Σχεδίαση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού | 18 |
| 1.3 Προηγούμενες Εργασίες | 18 |
| 1.3.1 Εφαρμογή της ΑΚΖ στο στάδιο παραγωγής και εγκατάστασης των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού καθώς και τον υπολογισμό της ενέργειας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της κατασκευής και εγκατάστασή τους. | 19 |
| 1.3.2 Μελέτη των αερίων εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού. | 21 |
| 1.3.3 Μελέτη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και του οικονομικού οφέλους στο στάδιο χρήσης. | 22 |
| 1.3.4 Ενέργεια που παράγεται κατά τη χρήση τους και του οικονομικού κέρδους στο στάδιο χρήσης σε σχέση με το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης. | 24 |
| 1.3.5 Βέλτιστη σχεδίαση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής τους απόδοσης. | 25 |
| 1.4 Αντικείμενο της παρούσας μελέτης..... | 28 |
| 1.5 Καινοτομίες διατριβής | 30 |
| 1.6 Δομή διδακτορικού | 31 |
| 2. Ενεργειακή, περιβαλλοντική και οικονομική ανάλυση ηλιακών θερμικών συστημάτων ICS | 33 |
| 2.1 Εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε ένα ηλιακό θερμικό σύστημα ICS με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο (CPC) και μία δεξαμενή νερού χρήσης | 33 |
| 2.2 Υπολογισμός Ενέργειας στο στάδιο κατασκευής του ICS συστήματος με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο (CPC) και μία δεξαμενή νερού χρήσης | 38 |
| 2.3 Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στο στάδιο κατασκευής και εγκατάστασης συστήματος ICS με συμμετρικό κάτοπτρο (CPC) και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά | 38 |
| 2.4 Ενεργειακοί, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί συντελεστές στο στάδιο χρήσης των συστημάτων ICS | 39 |
| 3. Πολυκριτηριακή ανάλυση συστημάτων ICS | 41 |

| | |
|---|----|
| 3.1 Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις συστημάτων ICS | 41 |
| 3.2 Βέλτιστη σχεδίαση συστήματος ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και δεξαμενή νερού χρήσης με διπλό τοίχωμα | 43 |
| 3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο. | 44 |
| 3.2.2 Μεθοδολογία επίλυσης. | 45 |
| 3.3 Βέλτιστη σχεδίαση συστήματος ICS με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά..... | 79 |
| 4.Τεχνοοικονομική ανάλυση συνολικών συστημάτων | 88 |
| Συμπεράσματα | 91 |
| Βιβλιογραφία | 93 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και οι εφαρμογές της σε ηλιακά θερμικά συστήματα – Σχεδίαση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού

1.1 Παρουσίαση μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε ηλιακά θερμικά συστήματα

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) είναι ένα σύνολο συστηματικών διεργασιών με σκοπό την συλλογή και εξέταση των στοιχείων εισόδου και εξόδου των ενεργειακών ισοζυγίων και ισοζυγίων μάζας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με αυτά προσδιορίζοντας τα απευθείας μέσω της λειτουργίας του προϊόντος ή του συστήματος εξυπηρέτησης κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του [1], [2].

Στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί η βιβλιοθήκη Ecoinvent 3.9.1 [3] και το λογισμικό πακέτο SimaPro 9.5 [4]. Η βιβλιοθήκη Ecoinvent 3.9.1 έχει αναπτυχθεί από το Κέντρο ecoinvent στην Ελβετία. Ακολουθεί τα πρότυπα της σειράς ISO 14000 [5], [6], [7] που παρέχουν ένα γενικά αποδεκτό πλαίσιο μεθοδολογίας της AKZ και χρησιμοποιείται από περίπου 4.500 χρήστες σε πάνω από 40 χώρες παγκοσμίως. Η βιβλιοθήκη αυτή παρέχει με συνέπεια και διαφάνεια δεδομένα AKZ σε πεδία ενέργειας (θερμότητα, μη ανανεώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), υλών (πλαστικά, χημικά, μέταλλα, αγροτικά προϊόντα και υλικά δόμησης), μεταφοράς (μέσω των οδών, πλοίων, τρένου, αερομεταφορών και σωληνώσεων) και διαχείρισης απορριμμάτων (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση και ανακύκλωση [3]).

Το λογισμικό SimaPro 9.5 διατίθεται από την PRé Sustainability B.V [4]. Παρέχει τη δυνατότητα παράλληλης μελέτης διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης αντίκτυπου ζωής (Life Cycle Impact Assessment: LCIA). Η μέθοδος σύγκρισης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων που επιλέχθηκε είναι η Recipe Endpoint 2016 Hierarchist [8].

Οι βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σύμφωνα με την μέθοδο Recipe Endpoint παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1 [8]:

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες επιπτώσεων σύμφωνα με την μέθοδο Recipe Endpoint 2016 Hierarchist [8].

| Βασικές Κατηγορίες Επιπτώσεων | Ειδικές κατηγορίες επιπτώσεων | Αντιστοίχιση Διεθνής Ορολογίας |
|----------------------------------|---|--|
| Ανθρώπινη Υγεία | Αραίωση του στρατοσφαιρικού Όζοντος | <i>Ozone depletion</i> |
| | | <i>Photochemical oxidant formation</i> |
| | Τοξικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό | <i>Human toxicity</i> |
| | Ραδιενεργό ακτινοβολία | <i>Ionising radiation</i> |
| | Πολύ μικρά σωματίδια που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα | <i>Particulate matter formation</i> |
| | Επίδραση κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία | <i>Climate change Human Health</i> |
| Ποικιλομορφία του οικοσυστήματος | Επίδραση κλιματικής αλλαγής στο οικοσύστημα | <i>Climate change Ecosystems</i> |
| | Οικοτοξικότητα | <i>Terrestrial ecotoxicity</i> |
| | | <i>Freshwater ecotoxicity</i> |
| | | <i>Marine ecotoxicity</i> |
| | Εκτεταμένη κατοίκηση αγροτικών περιοχών | <i>Agricultural land occupation</i> |
| | | <i>Terrestrial acidification</i> |
| | Αύξηση μεγαλουπόλεων | <i>Urban land occupation</i> |
| | Χρήση γης | <i>Natural land tranformation</i> |
| Διαθεσιμότητα φυσικών πόρων | Ελάττωση Ορυκτών μεταλλευμάτων | <i>Metal depletion</i> |
| | Ελάττωση Ορυκτών καυσίμων | <i>Fossil depletion</i> |

Η μέθοδος Recipe Endpoint επιτρέπει στον αναλυτή να υπολογίσει μια συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας με τη μορφή ενός μοναδικού αποτελέσματος (single score). Το τελικό αποτέλεσμα μετράται με το δείκτη Pt και αναφέρεται στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης του προϊόντος ή της διαδικασίας που μελετάται [9]. Η τιμή του 1 Pt αντιστοιχεί στο ένα χιλιοστό από το ετήσιο περιβαλλοντικό φορτίο που αποδίδεται σε ένα Ευρωπαίο πολίτη [8].

Ένας σημαντικός τομέας στον οποίο βρίσκει εφαρμογή η μέθοδος της AKZ είναι ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στο στάδιο κατασκευής, εγκατάστασης και χρήσης των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού. Πρόκειται για ενεργητικά ηλιακά συστήματα που ζεσταίνουν νερό για οικιακή χρήση χρησιμοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις χώρες που έχουν μεγάλη ηλιοφάνεια, όπως για παράδειγμα στις χώρες της Μεσογείου και στην Ελλάδα [10], [11].

Το κυριότερο μέρος ενός ηλιακού θερμικού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης που είναι η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συνήθεις ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται σε τρία είδη:

- Επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες
- Συλλέκτες με σωλήνες κενού
- Συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες

Τα κύρια στοιχεία ενός ηλιακού θερμικού συστήματος με επίπεδο συλλέκτη (Flat Plate Thermosiphonic Unit: FPTU) [12],[13] ((Εικόνα 1.1(α)) είναι ο επίπεδος απορροφητής (που συνήθως καλύπτεται με ειδική επίστρωση με αυξημένο συντελεστή απορροφητικότητας και μειωμένη εκπεμπικότητα), το γυάλινο κάλυμμα, το υγρό μεταφοράς θερμότητας από τον απορροφητή στη δεξαμενή του νερού και η δεξαμενή του νερού χρήσης. Το υγρό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί μέσω σωλήνων (συνήθως από χαλκό) που περιέχονται στον επίπεδο απορροφητή. Οι επίπεδοι απορροφητές συνήθως κατασκευάζονται από χαλκό ή αλουμίνιο [14]. Η θέρμανση του νερού χρήσης που βρίσκεται στη δεξαμενή νερού επιτυγχάνεται μέσω του υγρού μεταφοράς θερμότητας το οποίο μεταφέρεται από τον απορροφητή στη δεξαμενή με χρήση πλαστικών σωληνώσεων και λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας (Σύστημα κλειστού κυκλώματος [12]).





Εικόνα 1.1: Ηλιακά θερμικά συστήματα με: α. Επίπεδο συλλέκτη (πάνω), β. Συλλέκτη σωλήνων κενού (κάτω) [15].

Στα ηλιακά θερμικά συστήματα με συλλέκτη σωλήνων κενού (**Evacuated Tube Thermosiphonic Unit: ΕΤΤΥ**) [16], [17], [18] (Εικόνα 1.1(β)) ο συλλέκτης αποτελείται από σειρές διπλότοιχων γυάλινων σωλήνων (όπου στο διάκενο μεταξύ των δύο σωλήνων υπάρχει κενό αέρος) που περιέχουν χάλκινους σωλήνες στο κέντρο τους. Το ρευστό θερμαίνεται και έπειτα διοχετεύεται μέσω των σωλήνων σε έναν εναλλάκτη θερμότητας στη δεξαμενή νερού (Συστήματα κλειστού κυκλώματος όπως τα FPTU [16]).

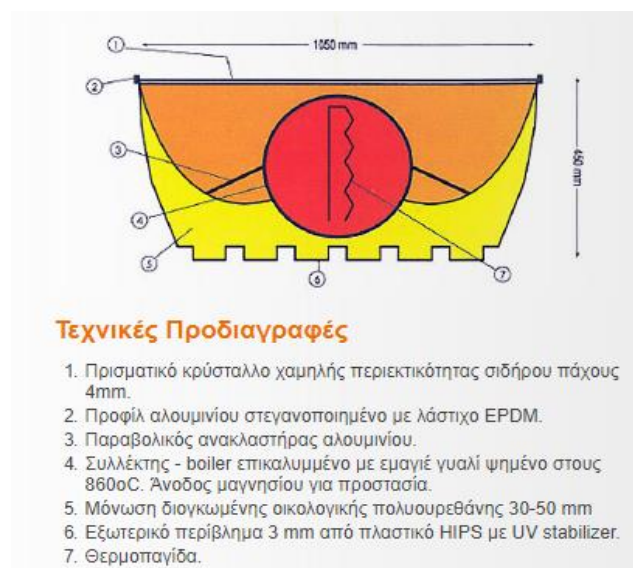
Στην κατηγορία των συστημάτων με συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη κατατάσσονται τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης που διαθέτουν παραβολικό ανακλαστήρα. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν τα ηλιακά θερμικά συστήματα που συνδυάζουν συλλέκτη και αποθήκη θερμότητας σε ενιαία διάταξη, γνωστά και ως ολοκληρωμένες ηλιακές συσκευές συλλέκτη αποθήκης θερμότητας (**Integrated Collector Storage, ICS**) [19], [20], [21] (Εικόνα 1.2(α)). Στα ICS, που χρησιμοποιούνται κυρίως για οικιακές εφαρμογές, η δεξαμενή του νερού χρήσης αποτελεί ταυτόχρονα και το συλλέκτη απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και βρίσκεται συνήθως εντός συμμετρικού συγκεντρωτικού παραβολικού ανακλαστήρα (**Compound Parabolic Concentrator, CPC**) (Εικόνα 1.2(β)) που ονομάζεται αλλιώς και παραβολικό κάτοπτρο [22]. Τα βασικά τμήματα τους (με βάση την εικόνα 1.2(β)) είναι:

- Διάφανη επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 1.2(β) – επιλογές 1 και 2)
- Παραβολικό κάτοπτρο (Εικόνα 1.2(β) – επιλογή 3).
- Δεξαμενή νερού (Εικόνα 1.2(β) – επιλογές 4 και 7).
- Μόνωση πολυουρεθάνης (Εικόνα 1.2(β) – επιλογή 5).
- Εξωτερικό κάλυμμα (Εικόνα 1.2(β) – επιλογή 6).

Πρόκειται για συστήματα ανοικτού κυκλώματος (το νερό χρήσης θερμαίνεται κατευθείαν χωρίς να παρεμβάλλεται υγρό μεταφοράς θερμότητας [22]), έχουν απλή κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία έναντι στα αντίστοιχα FPTU και τα συστήματα με συλλέκτη σωλήνων κενού (Εικόνα 1.1) και επιπλέον η απόδοσή τους είναι κατά 30% ταχύτερη από τα συνήθη συστήματα (λόγω της ταύτισης της δεξαμενής με την συλλεκτική επιφάνεια η οποία

θερμαίνεται σε πολύ υψηλό βαθμό από το παραβολικό κάτοπτρο που συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε αυτήν) [23], [24]. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των ICS μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι είναι αισθητικά καλύτερα από όλα τα άλλα συστήματα του εμπορίου εξαιτίας του μειωμένου όγκου, του χαμηλότερου ύψους τους και της ευκολότερης αρχιτεκτονικής εναρμόνισής τους στα κτίρια (Εικόνα 1.2(α)) [23].

Το μόνο πρόβλημα που εμφανίζουν είναι οι μεγάλες θερμικές απώλειες της δεξαμενής του νερού τη νύχτα ή τις μέρες με μειωμένη ηλιοφάνεια [25] οι οποίες οφείλονται στο ότι τα ICS μονώνονται μόνο μερικώς εσωτερικά με πολυουρεθάνη [24] (Εικόνα 1.2(β) – επιλογή 5: κίτρινο χρώμα). Για να αποφευχθούν οι θερμικές απώλειες των ακάλυπτων τμημάτων (πάνω μέρος) της δεξαμενής και του κατόπτρου χρησιμοποιείται η τεχνική της «παγίδευσης» θερμού αέρα μεταξύ της διάφανης επιφάνειας και του συνδυασμού κατόπτρου – δεξαμενής (Εικόνα 1.2(β) – πορτοκαλί χρώμα) που δυστυχώς δεν μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία [25], [24]. Όλα τα παραπάνω συντελούν στη μείωση της θερμικής απόδοσης των ICS σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους συστημάτων (Εικόνα 1.1) στα οποία η δεξαμενή νερού είναι πλήρως μονωμένη εξωτερικά έναντι στις ατμοσφαιρικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής εγκατάστασης [12], [16], [25],[24].



Τεχνικές Προδιαγραφές

1. Πρισματικό κρύσταλλο χαμηλής περιεκτικότητας σιδήρου πάχους 4mm.
2. Προφίλ αλουμινίου στεγανοποιημένο με λάστιχο EPDM.
3. Παραβολικός ανακλαστήρας αλουμινίου.
4. Συλλέκτης - boiler επικαλυμμένο με εμαγιέ γυαλί ψημένο στους 860°C. Άνοδος μαγνησίου για προστασία.
5. Μόνωση διογκωμένης οικολογικής πολυουρεθάνης 30-50 mm
6. Εξωτερικό περίβλημα 3 mm από πλαστικό HIPS με UV stabilizer.
7. Θερμοπαγίδα.

Εικόνα 1.2: α. Ολοκληρωμένη ηλιακή συσκευή συλλέκτη αποθήκης θερμότητας (πάνω), β. Εμπρόσθια τομή ολοκληρωμένης ηλιακής συσκευής συλλέκτη αποθήκης θερμότητας με συμμετρικό συγκεντρωτικό παραβολικό ανακλαστήρα (CPC) (κάτω) [23].

1.2 Σχεδίαση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού

Ένα θεμελιώδες πρόβλημα στην μελέτη των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού είναι η σχεδίαση τους η οποία προηγείται της κατασκευής τους και έχει στόχο την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση τους κόστους παραγωγής τους [26].

Κατά τη σχεδίαση των συστημάτων αυτών πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη:

- Η γεωγραφική θέση της περιοχής που γίνεται η εγκατάσταση.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος (διαστάσεις συλλεκτών ή μέγεθος δεξαμενής του νερού).
- Το μέγεθος του παραγόμενου θερμικού φορτίου (κατασκευή κατάλληλων μηχανισμών ώστε το σύστημα να έχει την επιθυμητή απόδοση ενέργειας).
- Το κόστος κατασκευής τους (η οικονομική απόδοση του συστήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του κόστους κατασκευής του ώστε να είναι κερδοφόρα η συγκεκριμένη επένδυση).

Ο συνδυασμός των προηγούμενων τεσσάρων προϋποθέσεων οδηγεί σε συστήματα υψηλής απόδοσης τα οποία έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και είναι φιλικά προς το περιβάλλον [27].

1.3 Προηγούμενες Εργασίες

Υπάρχουν αρκετές επιστημονικές εργασίες εφαρμογής της μεθόδου της ΑΚΖ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με επίπεδους συλλέκτες καθώς και στα ηλιακά θερμικά συστήματα με συλλέκτες σωλήνων κενού. Επίσης υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία πάνω στην βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων. Αντίθετα η βιβλιογραφία πάνω στα ίδια πλαίσια έρευνας, είναι περιορισμένη σε συστήματα με συγκεντρωτικούς συλλέκτες (ως επί το πλείστον σε ICS συστήματα) και εστιάζεται περισσότερο σε εφαρμογές που αφορούν σε ηλιακά παραβολικά συστήματα μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρισμού [28].

Όσον αφορά τη μέθοδο της ΑΚΖ, εκτός από τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε όλο το κύκλο ζωής των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ενεργειακή ανάλυση κατά το στάδιο κατασκευής και χρήσης τους καθώς και ο υπολογισμός του οικονομικού οφέλους στο στάδιο λειτουργίας τέτοιων συσκευών.

Για αυτούς τους λόγους έγινε κατηγοριοποίηση όλης της υφιστάμενης βιβλιογραφίας για τα συστήματα αυτά σε πέντε θεματικές ενότητες όπως περιγράφονται παρακάτω:

1.3.1 Εφαρμογή της AKZ στο στάδιο παραγωγής και εγκατάστασης των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού καθώς και τον υπολογισμό της ενέργειας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της κατασκευής και εγκατάστασή τους.

Μελέτη της AKZ για ηλιακό θερμαντή νερού με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη σε όλο τον κύκλο ζωής του συστήματος και υπολογισμός της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή, μεταφορά, εγκατάσταση και συντήρηση του έχει γίνει ήδη από τους *F. Artende et al.* στην εργασία τους: «Life cycle assessment of a solar thermal collector» [29]. Έγινε ανάλυση όλων των σταδίων κατασκευής του ηλιακού συστήματος μέχρι τη διάθεσή του στους καταναλωτές και την τελική απόρριψή του σε χωματερή στο τέλος της ζωής του. Υπολογίστηκαν οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε κάθε στάδιο για όλα τα επιμέρους τμήματα του συστήματος καθώς και η απαιτούμενη ενέργεια κατασκευής σε όλα τα στάδια. Πιο εμπεριστατωμένη μελέτη του περιβαλλοντικού και ενεργειακού ισοζυγίου που προκύπτει κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη γίνεται από τους ίδιους συγγραφείς στην εργασία τους: «Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances» [30]. Στη μελέτη αυτή υπολογίστηκε και το ενεργειακό κέρδος στο στάδιο χρήσης και επιπλέον έγινε πιο λεπτομερής ανάλυση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του ηλιακού συστήματος. Άλλη μελέτη AKZ σε επίπεδους συλλέκτες με ολοκληρωμένες συσκευές αποθήκευσης του ζεστού νερού (μεγάλους σε διατομή σωλήνες που ενεργούν ως μικρές δεξαμενές νερού χρήσης και είναι τοποθετημένοι πάνω στην επιφάνεια απορρόφησης) για αύξηση της δυνατότητας αποθήκευσης της παραγόμενης θερμότητας, έχει γίνει από τους *R. Battisti* και *A. Corrado* στην εργασία τους: «Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage» [31]. Στη μελέτη αυτή γίνεται υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στο στάδιο κατασκευής και εγκατάστασης και στο τέλος γίνεται σύγκριση τους με το περιβαλλοντικό κέρδος από τη χρήση τους. Με το περιβαλλοντικό και ενεργειακό ισοζύγιο σε όλον το κύκλο ζωής ηλιακών θερμικών συστημάτων ασχολήθηκε ο *S. Kalogirou* σε δύο εργασίες: «Performance and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters» [32] και «Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters» [33]. Και στις δύο μελέτες αυτές γίνεται σύγκριση με το περιβαλλοντικό κέρδος από τη χρήση των συγκεκριμένων συστημάτων σε σχέση με τις επιβαρύνσεις στο στάδιο κατασκευής και εγκατάστασης. Μία άλλη μελέτη AKZ ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού έχει γίνει από τους *A. Laborderie et al.* στην εργασία τους: «Environmental Impacts of Solar Thermal Systems with Life Cycle Assessment» [34] ενώ οι *FJ Rey et al.* ασχολήθηκαν με την AKZ ενός ηλιακού θερμικού συστήματος εγκατεστημένου σε μια απομακρυσμένη αγροτική περιοχή στην Ισπανία, στην εργασία: «Life cycle analysis of a thermal solar installation at a rural house in Valladolid (Spain)» [35]. Στην πρώτη εργασία έγινε σύγκριση του περιβαλλοντικού φορτίου στο στάδιο κατασκευής και εγκατάστασης δύο τύπων επίπεδων ηλιακών συστημάτων, το ένα με εφεδρική πηγή ενέργειας και το άλλο χωρίς. Στη δεύτερη εργασία έγινε σύγκριση του υπό μελέτη ηλιακού θερμικού συστήματος με ένα συμβατικό θερμικό σύστημα που λειτουργεί με φυσικό αέριο. Επίσης οι *NA Masruroh*, *B Li* και *J Klemes* εφάρμοσαν την AKZ

σε ηλιακό θερμικό σύστημα με θερμοχημική διαδικασία αποθήκευσης, στην εργασία τους: «Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process» [36]. Και σε αυτήν την περίπτωση γίνεται σύγκριση με συμβατικό θερμικό σύστημα για να διαπιστωθεί ότι το προτεινόμενο ηλιακό θερμικό σύστημα έχει πολύ μικρότερο ποσοστό περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε σχέση με το συμβατικό. Την AKZ ηλιακών θερμικών συστημάτων με χρήση θερμικών πάνελ από γυαλί ή χωρίς αυτά μελέτησαν οι *G. Comodi et al.* στην εργασία τους: «LCA Analysis of Renewable Domestic Hot Water Systems with Unglazed and Glazed Solar Thermal Panels» [37], ενώ οι *Chr Lamnatou et al* ασχολήθηκαν με την περιβαλλοντική συμπεριφορά ενός οικιακού ηλιακού συλλέκτη στην εργασία τους: « Life cycle analysis of a building-integrated solar thermal collector, based on embodied energy and embodied carbon methodologies» [38]. Στην πρώτη μελέτη γίνεται σύγκριση των δύο διαφορετικών τύπων ηλιακών θερμικών συστημάτων (με υαλοπίνακες από γυαλί ή χωρίς) και υπολογίζεται το περιβαλλοντικό κέρδος από τη χρήση τους, ενώ στη δεύτερη υπολογίζεται ο περιβαλλοντικό κέρδος ενός πρωτότυπου ηλιακού θερμικού συστήματος για χρήση σε συγκρότημα κατοικιών στο οποίο εξετάζονται τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις του συλλέκτη. Οι ίδιοι συγγραφείς ασχολήθηκαν με την AKZ σε οικιακούς ηλιακούς συλλέκτες σε τρεις ακόμα εργασίες: «Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems» [39], «Concentrating solar systems: Life Cycle Assessment (LCA) and environmental issues» [40] and «Building-integrated solar thermal systems based on vacuum-tube technology: Critical factors focusing on life-cycle environmental profile» [41]. Και στις τρεις εργασίες γίνεται ανασκόπηση της εφαρμογής της AKZ σε τεχνολογίες ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού δίνοντας έμφαση σε συστήματα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλα συγκροτήματα κατοικιών καθώς και σε συστήματα ειδικής τεχνολογίας του συλλέκτη (σωλήνες κενού). Οι *S. Eicher et al.* ασχολήθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου της AKZ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού καθώς επίσης και οι *E. Carnevale et al.*, στις εργασίες τους: «Life Cycle Impact Assessment of a Solar Assisted Heat Pump for Domestic Hot Water Production and Space Heating» [42], «Life Cycle Assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale» [43] ενώ οι *C. J. Koroneos* και *E. A. Nanaki* παρουσίασαν την AKZ ενός ηλιακού οικιακού θερμοσίφωνα στη μελέτη: «Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater» [44]. Στις δύο πρώτες εργασίες έγινε σύγκριση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων με ηλιακά θερμικά συστήματα που χρησιμοποιούν ως εναλλακτική πηγή ενέργειας την ηλεκτρική και πως αυτές μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες περιοχών που βρίσκονται σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Στην τρίτη εργασία γίνεται υπολογισμός των επιβαρύνσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός ηλιακού θερμικού συστήματος με επίπεδο συλλέκτη καθώς και ο υπολογισμός και η σύγκριση του περιβαλλοντικού αλλά και του οικονομικού κέρδους από τη χρήση του. Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν δύο εργασίες για την εφαρμογή της AKZ σε ηλιακά θερμικά συστήματα, η μία είναι η συγκριτική πειραματική και περιβαλλοντική μελέτη των *N. Arnaoutakis et al.* πάνω σε FPTU και ICS συστήματα (με συγκεντρωτικό συλλέκτη και δύο δοχεία αποθήκευσης νερού χρήσης): «Comparative experinmental study and Life Cycle Assessment (LCA) analysis of two industrial type solar water heaters for domestic applications»

[45] ενώ η δεύτερη είναι η μελέτη ΑΚΖ των *E. Pihl et al.* για υλικά που χρησιμοποιούνται σε ηλιακά θερμικά συστήματα με παραβολικό συλλέκτη για παραγωγή θερμικής ενέργειας: «Material constraints for concentrating solar thermal power» [46]. Στην πρώτη μελέτη χρησιμοποιούνται δύο συστήματα με διαφορετικό συλλέκτη (επίπεδο και συγκεντρωτικό) αλλά και διαφορετικό αριθμό δεξαμενών αποθήκευσης (μία δεξαμενή αποθήκευσης νερού χρήσης το σύστημα με τον επίπεδο συλλέκτη και δύο δεξαμενές το σύστημα με τον συγκεντρωτικό συλλέκτη). Στην δεύτερη εργασία χρησιμοποιούνται παραβολικά κάτοπτρα μεγάλης ισχύος για παραγωγή θερμότητας για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, μέσω της μεθόδου ΑΚΖ, για τα υλικά κατασκευής τους.

1.3.2 Μελέτη των αερίων εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού.

Χαρακτηριστική μελέτη αποτελεί η εργασία του *S. Kalogirou*: «Environmental benefits of domestic solar energy systems» [26] στην οποία γίνεται ο υπολογισμός των αερίων εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής του συγκεκριμένου συστήματος αλλά και το οικονομικό όφελος από την κατασκευή μέχρι τη χρήση του. Οι *R.H. Crawford, G.J. Treloar, B.D. Llozor* και *P.E.D. Love* ανάλυσαν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού στην εργασία: «Comparative greenhouse gas emissions analysis of domestic solar hot water systems» [47]. Σε αυτήν εξετάζονται οι εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος καθώς και το οικονομικό όφελος στο τέλος του κύκλου ζωής. Τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης (συστήματα με επίπεδους συλλέκτες και συστήματα με σωλήνες κενού) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση νερού σε κατοικίες στην Αγγλία μελέτησαν οι *B. Greening* και *A. Azapagic* στην εργασία τους: «Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK?» [48] ενώ οι *G. Tsiligridis, G. Martinopoulos* και *N. Kyriakis* ανάλυσαν την περιβαλλοντική συμπεριφορά κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες, ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού που βρίσκονται εγκατεστημένα στον Ελλαδικό χώρο, στην εργασία τους: «Environmental performance of thermosiphonic domestic solar hot water system under different climatic conditions: a case study for Greece» [49]. Στην πρώτη εργασία έγινε μελέτη των αερίων εκπομπών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ηλιακών θερμικών συστημάτων που τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές στη Μεγάλη Βρετανία, ενώ στην δεύτερη μελέτη έγινε η αντίστοιχη μελέτη για διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές του Ελλαδικού χώρου. Οι ίδιοι συγγραφείς μελέτησαν σε επόμενες εργασίες τους την περιβαλλοντική συμπεριφορά επίπεδων ηλιακών συλλεκτών θέρμανσης νερού κάνοντας χρήση διαφορετικών υλικών σε κάθε τμήμα των συσκευών: «Three eco-tool comparison with the example of the environmental performance of domestic solar flat plate hot water systems» [50], «Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems» [51]. Στις εργασίες αυτές διαπιστώθηκε ότι η χρήση

διαφορετικών υλικών κατασκευής συμβάλλει εκτός από την μεταβολή της απόδοσης των ηλιακών θερμικών συστημάτων και στη διαφοροποίηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά υλικό. Μελέτη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης με συλλέκτη με σωλήνες κενού έχει γίνει επίσης από τους *M S Uddin et al.* στην εργασία τους: «Energy and emission analysis of evacuated tube solar water heating system and options study for the potential improvement» [52] στην οποία έγινε πάλι η χρήση διαφορετικών υλικών κατασκευής και στην συνέχεια ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων αλλά για συλλέκτες σωλήνων κενού. Υπάρχει επίσης η γενική μελέτη για τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις κατά τη χρήση ηλιακών συστημάτων που έχει γίνει από τους *T. Tsoutsos et al.* με τίτλο «Environmental impacts from the solar energy technologies» [53] όπου γίνεται ουσιαστικά μία ανασκόπηση αλλά και κατηγοριοποίηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που παρουσιάζονται σε όλο τον κύκλο ζωής ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού. Οι *GP Hammond* και *CI Jones* ασχολήθηκαν με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στα υλικά κατασκευής ενός ηλιακού συστήματος: «Embodied energy and carbon in construction materials» [54] καθώς και οι *A.Genkinger et al.* και *GF Menzies* and *Y. Roderick* οι οποίοι παρουσίασαν την μελέτη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ηλιακών συστημάτων για οικιακή χρήση στις εργασίες τους: «Combining Heat Pumps with Solar Energy for Domestic Hot Water Production» [55] και «Energy and carbon impact analysis of a solar thermal collector system» [56]. Στην πρώτη εργασία αναλύονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε ηλιακά θερμικά συστήματα για διαφορετικούς τύπους υλικών κατασκευής μέσα από μία βάση δεδομένων που φέρει πολλούς τύπους υλικών ενώ στις άλλες δύο μελέτες γίνεται υπολογισμός των αέριων εκπομπών και της ενέργειας που δαπανάται αλλά και παράγεται από τη χρήση τέτοιων συστημάτων με ή χωρίς αντλία νερού για την κυκλοφορία του θερμού ρευστού από το συλλέκτη στην δεξαμενή και αντίστροφα. Σημαντική είναι επίσης η εργασία των *O. Imprahim et al.* οι οποίοι ασχολήθηκαν γενικά με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ηλιακών θερμικών συστημάτων στην εργασία τους: «Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects» [57] που αποτελεί μια επισκόπηση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού δίνοντας έμφαση στις αέριες εκπομπές στο στάδιο χρήσης των συστημάτων αυτών. Τέλος οι *Chr Lamnatou et al* ασχολήθηκαν με την περιβαλλοντική συμπεριφορά οικιακού ηλιακού θερμικού συστήματος στην εργασία τους: «Cumulative energy demand and global warming potential of a building-integrated solar thermal system with/without phase change material» [58] δηλαδή με την περιβαλλοντική ανάλυση ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού σε συγκρότημα κατοικιών με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Material: PCM [59] στη δεξαμενή.

1.3.3 Μελέτη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και του οικονομικού οφέλους στο στάδιο χρήσης.

Σημαντική μελέτη στην κατηγορία αυτή είναι η εργασία των *H. Yin, Q. Ming,* και *Z. Fu* : «Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United

States» [60]. Σε αυτήν έγινε μελέτη για διαφορετικές πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών κάνοντας χρήση δύο διαφορετικών εναλλακτικών πηγών ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια και φυσικό αέριο) για κάθε ηλιακό σύστημα. Οι *R. Hoffmann et al* ασχολήθηκαν με περιβαλλοντική και οικονομική μελέτη δύο ηλιακών συστημάτων θέρμανσης του νερού (επίπεδο συλλέκτη και συλλέκτη με σωλήνες κενού): «Economic-Environmental comparison between flat plate and evacuated tube solar collectors» [61] ενώ οι *G. Comodi et al.* μελέτησαν τις αέριες εκπομπές και το οικονομικό όφελος από τη χρήση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού στην εργασία τους: «Life cycle assessment and energy-CO₂-economic payback analyses of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels» [62]. Στην πρώτη εργασία γίνεται σύγκριση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων αλλά και του οικονομικού οφέλους από τη χρήση μεταξύ δύο ηλιακών θερμικών συστημάτων με διαφορετικό συλλέκτη (επίπεδο συλλέκτη και συλλέκτη με σωλήνες κενού). Στη δεύτερη μελέτη γίνεται σύγκριση των ίδιων χαρακτηριστικών για συστήματα που φέρουν δύο διαφορετικού τύπου επίπεδους συλλέκτες (με διάφανο κάλυμμα στο συλλέκτη ή χωρίς). Επίσης οι *SR Allen et al.* μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και την οικονομική απόδοση ενός ηλιακού θερμικού συστήματος στο Ηνωμένο Βασίλειο στην εργασία τους: «Integrated appraisal of a Solar Hot Water system» [63] ενώ οι *TH Burch και J. Salasovich* ασχολήθηκαν με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού στη μελέτη: «Cold-climate solar domestic water heating systems: life-cycle analyses and opportunities for cost reduction» [64]. Στην πρώτη εργασία γίνεται κατασκευή ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού για μονοκατοικία που βρίσκεται σε απομονωμένη περιοχή στο Ηνωμένο Βασίλειο. Επιπλέον υπολογίζεται η παραγόμενη θερμική ενέργεια από το συλλέκτη και από τη βοηθητική πηγή στην οποία μάλιστα γίνεται χρήση δύο τύπων (ηλεκτρική και πηγή με φυσικό αέριο). Επίσης υπολογίζεται το περιβαλλοντικό φορτίο σε ολόκληρο το κύκλο ζωής του συστήματος καθώς και το οικονομικό κέρδος από τη χρήση του. Η δεύτερη μελέτη ασχολείται με ηλιακά θερμικά συστήματα σε λιγότερες θερμές περιοχές στις οποίες υπολογίζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις για διαφορετικούς τύπους υλικών κατασκευής (χαμηλού κόστους). Για υλικά κατασκευής προτιμώνται τα πολυμερή σε αντικατάσταση των μεταλλικών εξαρτημάτων των υπό μελέτη συστημάτων. Στην συνέχεια γίνεται οικονομική μελέτη η οποία παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη μείωση του συνολικού κόστους των συστημάτων αυτών. Εξίσου σημαντική είναι και η εργασία των *D. Laing et al.* οι οποίοι ασχολήθηκαν με εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και το κέρδος από τη χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για ηλιακούς συλλέκτες παραβολικού τύπου στη μελέτη: «Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants» [65]. Στην εργασία αυτή γίνεται υπολογισμός περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στο στάδιο χρήσης αυτών των ηλιακών θερμικών συστημάτων καθώς και οικονομοτεχνική μελέτη για τον υπολογισμό του οικονομικού οφέλους της επένδυσης. Στο σύστημα αποθήκευσης του συγκεκριμένου συστήματος επιτυγχάνεται αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας μεγαλύτερης του 100%.

1.3.4 Ενέργεια που παράγεται κατά τη χρήση τους και του οικονομικού κέρδους στο στάδιο χρήσης σε σχέση με το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης.

Ο *R H Crawford*, μελέτησε την παραγόμενη θερμική ενέργεια σε ηλιακά θερμικά συστήματα στην Μελβούρνη της Αυστραλίας στην εργασία του: «Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia» [66] ενώ οι *M. Leckner* και *R. Zmeureanu* ασχολήθηκαν με την παραγόμενη ενέργεια και το οικονομικό κόστος ενός ηλιακού θερμικού συστήματος εγκατεστημένου σε μια μονοκατοικία: «Life cycle cost and energy analysis of a net zero energy house with solar combisystem» [67]. Στην πρώτη εργασία έγινε υπολογισμός και σύγκριση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας από ηλιακά θερμικά συστήματα με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια από συμβατικά θερμικά συστήματα ενώ στη δεύτερη μελέτη γίνεται αρχικά προσομοίωση του ηλιακού θερμικού συστήματος με λογισμικό προσομοίωσης και στη συνέχεια εφαρμογή του παραγόμενου μοντέλου για τη θέρμανση ζεστού νερού μονοκατοικίας τεσσάρων ατόμων. Οι *P. Hernandez* και *P. Kenny* ανέλυσαν την παραγόμενη θερμική ενέργεια σε ηλιακά θερμικά συστήματα στην εργασία τους: «Net energy analysis of domestic solar water heating installations in operation» [68] ενώ ο *M. Kaplan*, ασχολήθηκε με την τεchnοοικονομική ανάλυση ενός συστήματος θέρμανσης νερού με παραβολικό συλλέκτη το οποίο είναι εγκατεστημένο στην Ιορδανία: «Techno-economic analysis of the Jordanian solar water heating system» [69]. Στην πρώτη μελέτη γίνεται αρχικά υπολογισμός (πριν την εγκατάσταση) της παραγόμενης θερμικής ενέργειας ηλιακών θερμικών συστημάτων για χρήση σε μονοκατοικίες καθώς και σύγκριση των υπολογισμών με το πραγματικό ενεργειακό κέρδος από την εγκατάσταση. Στη δεύτερη εργασία γίνεται αναλυτική τεχνική και οικονομική μελέτη ενός ηλιακού θερμικού συστήματος που χρησιμοποιεί φυσικό αέριο (ως εναλλακτική πηγή ενέργειας) και το οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί σε μονοκατοικία στην Ιορδανία. Οι *S. Colle*, *S L Abreu* και *R. Ruther* ασχολήθηκαν με την οικονομική μελέτη πάνω σε συστήματα θέρμανσης με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες: «Uncertainty in economic analysis of solar water heating and photovoltaic systems» [70] ενώ την ενεργειακή οικονομική ανάλυση οικιακών ηλιακών θερμικών συστημάτων με χρήση θερμικών πάνελ από γυαλί ή χωρίς αυτά μελέτησαν επίσης οι *T P Otanicar* και *J S Golden* στην εργασία τους: «Comparative Environmental and Economic Analysis of Conventional and Nanofluid Solar Hot Water Technologies» [71]. Η πρώτη μελέτη εστιάζεται στο σφάλμα που προκύπτει κατά την οικονομική ανάλυση (πριν την εγκατάσταση τους) ηλιακών συστημάτων, βασιζόμενοι στην μεθοδολογία *f-chart*. Μάλιστα γίνεται και εφαρμογή σε συστήματα θέρμανσης νερού καθώς και σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Η δεύτερη εργασία εξετάζει τη χρήση θερμορευστού (σε ηλιακά θερμικά συστήματα) που βασίζεται στη νανοτεχνολογία καθώς και τη σύγκριση του οικονομικού οφέλους που θα έχει η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στα συγκεκριμένα συστήματα σε σχέση με τα συμβατικά ηλιακά θερμικά συστήματα. Επίσης άλλη σημαντική μελέτη είναι η εργασία των *AV Arasu* & *T. Sornakumar* οι οποίοι ασχολήθηκαν με την οικονομική ανάλυση ηλιακών θερμικών συστημάτων με παραβολικό συλλέκτη στην εργασία τους: «Life cycle cost analysis of new FRP based solar parabolic trough collector hot water generation system» [72]. Στην εργασία αυτή οι συγγραφείς ασχολήθηκαν με το οικονομικό

όφελος στο στάδιο χρήσης ηλιακών θερμικών συστημάτων με παραβολικού τύπου κάτοπτρα οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε εστιατόριο στην Ινδία και χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών του σε ζεστό νερό χρήσης.

Όλες οι προηγούμενες πληροφορίες συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Λέξεις κλειδιά πίνακα: *i.* Ανάλυση Κύκλου Ζωής: LCA, *ii.* Μελέτη αερίων εκπομπών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής, Environmental Analysis: EA, *iii.* Μελέτη περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και οικονομικού οφέλους στο στάδιο χρήσης, Economic and Environmental Analysis: EEA, *iv.* Ενέργεια που παράγεται κατά τη χρήση τους και του οικονομικού κέρδους στο στάδιο χρήσης σε σχέση με το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης, Energy and Cost Analysis: ECA.

1.3.5 Βέλτιστη σχεδίαση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής τους απόδοσης.

Σε αυτή την ενότητα έχουν δημιουργηθεί δύο υποκατηγορίες με διαφορετικά αντικείμενα μελέτης: α) στη πρώτη υποκατηγορία ανήκουν οι εργασίες πάνω στην: *βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού κατοικιών με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της ημερήσιας τους απόδοσης καθώς και την ελάττωση των θερμικών απωλειών της δεξαμενής του νερού*. Σύμφωνα με τα παραπάνω σημαντικοί ερευνητές είναι οι Kulkarni et al. καθώς επίσης και οι U. Frei και P. Vogelsanger οι οποίοι σχεδίασαν και μελέτησαν ηλιακά θερμικά συστήματα στις εργασίες τους: «Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications» [73], «Solar thermal systems for domestic hot water and space heating» [74]. Στη πρώτη μελέτη έγινε σχεδίαση νέων τύπων συστημάτων με χρήση νερού υπό πίεση στην δεξαμενή αποθήκευσης νερού χρήσης. Αυτή η μεθοδολογία είναι περισσότερο χρήσιμη σε βιομηχανικές και όχι σε οικιακές εφαρμογές. Η δεύτερη εργασία είναι μια επισκόπηση πάνω στην σχεδίαση καινοτόμων επίπεδων ηλιακών θερμικών συστημάτων και η σύγκριση τους με τα συμβατικά ηλιακά θερμικά συστήματα σε σχέση με την θερμική τους απόδοση. Άλλη σχετική μελέτη πάνω στην σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι η εργασία «Optimal sizing of a solar water heating system based on a genetic algorithm for an aquaculture system» των Doaa M. Atia et al. [75] καθώς επίσης και η εργασία του S. A. Kalogirou ο οποίος χρησιμοποίησε νευρωνικά δίκτυα και γενετικούς αλγορίθμους για να σχεδιάσει και να βελτιστοποιήσει το μοντέλο του υπό μελέτη ηλιακού θερμικού συστήματος: «Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms» [76]. Στην πρώτη εργασία έγινε χρήση γενετικών αλγορίθμων για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους ηλιακού θερμικού συστήματος για χρήση σε υδατοκαλλιέργεια. Στο συγκεκριμένο σύστημα τα κυριότερα μέρη που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία βέλτιστης σχεδίασης είναι ο επίπεδος συλλέκτης, η δεξαμενή νερού χρήσης και η εναλλακτική πηγή ενέργειας του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου. Στη δεύτερη μελέτη γίνεται χρήση του λογισμικού προγράμματος TRNSYS για την μοντελοποίηση του υπό εξέταση ηλιακού θερμικού συστήματος καθώς επίσης και τα κλιματολογικά δεδομένα της Κύπρου. Με την σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων ασχολήθηκαν επίσης οι Abdel-Male Layek καθώς επίσης και οι I. M. Michaelides και D. R. Wilson

στις εργασίες τους: «Optimum Design of Solar Water Heating Systems» [77], «Optimum Design Criteria for Solar Hot Water Systems» [78]. Στη πρώτη μελέτη γίνεται βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων μελετώντας τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και τη ζήτηση σε ζεστό νερό χρήσης για διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Στόχος της μελέτης είναι ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και του οικονομικού κέρδους βελτιστοποιώντας την κατανομή ζεστού νερού στην δεξαμενή του νερού. Στη δεύτερη μελέτη γίνεται αρχικά καθορισμός των βέλτιστων οριακών συνθηκών για τη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων σε κατοικίες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης του ηλιακού θερμικού συστήματος κατασκευασμένου στο λογισμικό πρόγραμμα TRNSYS με στόχο την προσομοίωση της ενεργειακής απόδοσης του υπό μελέτη συστήματος το οποίο περιλαμβάνει κριτήρια όπως την κατανάλωση του νερού χρήσης καθώς και το θερμικό φορτίο που παράγει το σύστημα. Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στην κατασκευή ενός οικιακού ηλιακού θερμικού συστήματος και επιπλέον σύγκριση με την παραγόμενη θερμική ενέργεια που παρήχθη από αυτό στο στάδιο λειτουργίας του. Ο *Francis de Winter* μελέτησε και αυτός τη βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων στην εργασία του «Optimum Designs for Solar Water Heating Equipment for the Single Family Home» [79] ενώ μια άλλη μελέτη πάνω στο ίδιο θέμα είναι η εργασία «Optimal Operation and Design of Solar-Thermal Energy Storage Systems» του *Enrique Lizarraga-Garcia* [80]. Στη πρώτη εργασία έγινε ανάπτυξη ενός ηλιακού θερμικού συστήματος με χρήση δύο δεξαμενών νερού χρήσης στο οποίο η εφεδρική δεξαμενή (μικρότερη) τοποθετήθηκε κάτω από την κύρια δεξαμενή και οι οποίες συνδέθηκαν με μία θερμική δίοδο. Στη δεύτερη εργασία έγινε σχεδίαση ενεργειακών – θερμικών συστημάτων. Αρχικά έγινε βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από τη χρήση του συστήματος με σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ανάλογα με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας το σύστημα μπορεί να πουλάει ή να αγοράζει από το δίκτυο. Επίσης έγινε διερεύνηση της δυνατότητας αποθήκευσης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας. Οι *D. Weinstock* και *J. Appelbaum* ασχολήθηκαν με τη βέλτιστη σχεδίαση μίας ομάδας από σταθερά τοποθετημένους ηλιακούς συλλέκτες (σε σχέση με τροχιά του ήλιου) [81] στην εργασία τους «Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors» και οι *C. Yan et al.* βελτιστοποίησαν ηλιακά θερμικά συστήματα βασιζόμενοι στην ενεργειακή ανάλυση του κύκλου ζωής τους: «A simplified method for optimal design of solar water heating systems based on life-cycle energy analysis» [82]. Στη πρώτη μελέτη έγινε σχεδίαση φωτοβολταϊκών και ηλιακών θερμικών συλλεκτών λαμβάνοντας υπόψιν φαινόμενα σκίασης των συλλεκτών αυτών. Τα βασικά κριτήρια σχεδίασης ήταν η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια από τους συλλέκτες και ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής αυτής της ενέργειας. Η δεύτερη μελέτη παρουσιάζει μια απλουστευμένη μεθοδολογία για βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδίασης ηλιακών θερμικών συστημάτων με χρήση της παραγόμενης ενέργειας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των συστημάτων αυτών. Με τη βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων με χρήση πολυκριτήριων μεθόδων ασχολήθηκαν οι *Hang et al.* [83] στην μελέτη «Multi-objective optimization of integrated solar absorption cooling and heating systems for medium-sized office building» και οι *Helal et al.* [84] ανάλυσαν και σχεδίασαν ICS ηλιακά θερμικά συστήματα στην εργασία τους «Design and

thermal performance of an ICS solar water heater based on three parabolic sections». Στη πρώτη εργασία χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος βελτιστοποίησης πολυκριτήριας ανάλυσης για ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης – ψύξης με χρήση της τεχνικής: κεντρικής σύνθετης σχεδίασης (central composite design) και του λογισμικού πακέτου TRNSYS. Στη δεύτερη εργασία έγινε η σχεδίαση ενός ICS συστήματος με χρήση της τεχνικής των τριών παραβολικών τομών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανακλαστήρα: γεωμετρία, επιφάνεια ανοίγματος, μήκος συλλέκτη και διερεύνηση δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του ανακλαστήρα (συμμετρικός, μη συμμετρικός). Με την πολυκριτήρια ανάλυση και βελτιστοποίηση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού με επίπεδο συλλέκτη ασχολήθηκαν επίσης οι *Mitsopoulos et al.* [85] στη μελέτη τους «Parametric analysis and multi-objective optimization of a solar heating system for various building envelopes». Στην εργασία αυτή έγινε χρήση πολυκριτήριας μεθόδου βελτιστοποίησης για ηλιακό θερμικό σύστημα με επίπεδο συλλέκτη σε συγκρότημα κατοικιών. Εκτός από την παραγόμενη θερμική ενέργεια έγινε βελτιστοποίηση και στο οικονομικό όφελος από τη χρήση του συστήματος. Μία άλλη μελέτη πάνω στη βέλτιστη σχεδίαση ηλιακών θερμικών συστημάτων έγινε από τους *Bellos et al.* [86] οι οποίοι ασχολήθηκαν με την βελτιστοποίηση των πτερυγίων σε συστήματα με παραβολικό συλλέκτη για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές στην εργασία τους «Optimum number of internal fins in parabolic trough collectors». Ο ίδιος συγγραφέας μαζί με τον *Chr. Tzivanidi* ανέπτυξαν τρεις άλλες εργασίες, [87], [88], [89] πάνω στην βελτιστοποίηση και προσομοίωση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού για βιομηχανικές εφαρμογές στις μελέτες « Development of an analytical model for the daily performance of solarthermal systems with experimental validation», « Investigation of a star flow insert in a parabolic trough solar collector» και « Parametric analysis and optimization of a cooling system with ejector-absorption chiller powered by solar parabolic trough collectors». Στις παραπάνω εργασίες οι συγγραφείς ασχολήθηκαν για μια ακόμη φορά με συστήματα με μεγάλα παραβολικά κάτοπτρα (parabolic trough collectors) τα οποία τοποθετήθηκαν σε μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις και των οποίων η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιήθηκε κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές και όχι για οικιακές. Διερευνήθηκαν παράγοντες σχεδίασης των συστημάτων αυτών όπως τα εσωτερικά πτερύγια του παραβολικού κατόπτρου ή γενικότερα το μέγεθος του κατόπτρου καθώς και η πειραματική μελέτη των συστημάτων αυτών κάτω από πραγματικές κλιματολογικές συνθήκες.

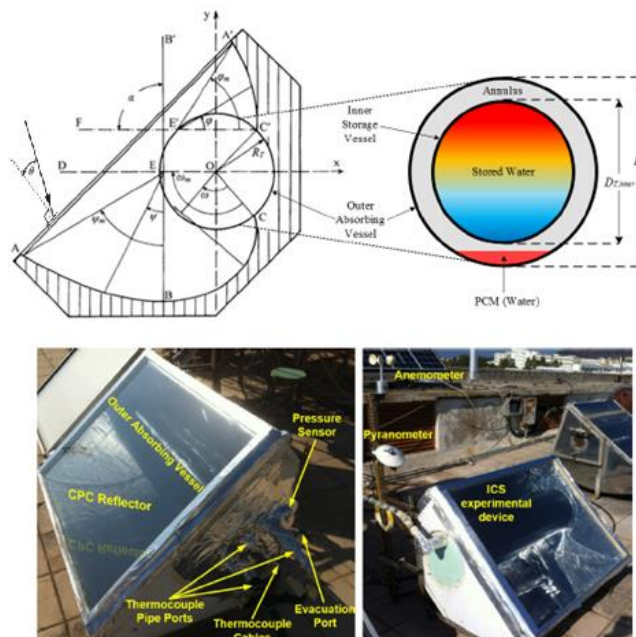
(β) Η δεύτερη υποκατηγορία περιλαμβάνει τη: *σχεδίαση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού στην οποία εξετάζεται και αναλύεται το οικονομικό όφελος καθώς και η μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε όλο το κύκλο ζωής των συστημάτων αυτών*. Σημαντικές εργασίες στη κατηγορία αυτή είναι η μελέτη «Analysis and Optimization Design of a Solar Water Heating System Based on Life Cycle Cost Using a Genetic Algorithm» του *Myeong Jin Ko* [90] καθώς και η μελέτη του *S. A. Kalogirou* ο οποίος ασχολήθηκε με τη σχεδίαση, κατασκευή και οικονομική ανάλυση ενός συστήματος με συγκεντρωτικό συλλέκτη στην μελέτη «Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system» [91]. Στη πρώτη εργασία έγινε η βελτιστοποίηση ενός ηλιακού συστήματος ψύξης, για χρήση σε οικίες στην Μαλαισία, μεγιστοποιώντας την παραγόμενη του ενέργεια και ελαχιστοποιώντας το κόστος του κύκλου επιχειρησιακής ζωής του και τις παραγόμενες αέριες

εκπομπές. Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε αρχικά χρήση του λογισμικού πακέτου TRNSYS για προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος πριν την κατασκευή του. Στη δεύτερη εργασία έγινε σχεδίαση και κατασκευή ενός συστήματος ICS στην Κύπρο. Αρχικά έγινε η μοντελοποίηση και σχεδίαση του συστήματος με χρήση ενός προγράμματος προσομοίωσης που κατασκευάστηκε στην γλώσσα προγραμματισμού BASIC και στην συνέχεια (μετά την κατασκευή και εγκατάσταση του) έγινε η οικονομική ανάλυση του συστήματος με χρήση του προγράμματος F-Chart για σύγκριση του με ένα σύνηθες ηλιακό θερμικό σύστημα.

1.4 Αντικείμενο της παρούσας μελέτης

Συνήθως οι καμπύλες κατοπτρικές διατάξεις, των συστημάτων ICS είναι συμμετρικές (Εικόνα 1.2 (β)), αλλά σε κάποιες περιπτώσεις είναι και ασύμμετρες με στόχο τον περιορισμό των θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής, πράγμα που οδηγεί στην πληρέστερη θερμική προστασία της δεξαμενής αποθήκευσης [92].

Μία σύνθετη διάταξη αυτού του τύπου αποτυπώνεται στην εικόνα 1.3 [59], όπου το παραβολικό κάτοπτρο είναι ασύμμετρο και εκτός της σύνθετης γεωμετρικής διάταξης δοχείου – κατόπτρου, το δοχείο αποθήκευσης έχει ένα επιπλέον λειτουργικό χαρακτηριστικό (για ακόμα μεγαλύτερη μείωση των θερμικών απωλειών του συστήματος), διαθέτει διπλό τοίχωμα (ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία) [93], [59]. Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των δύο κυλινδρικών δοχείων βρίσκεται υπό μερικό κενό, ενώ την όλη διάταξη συμπληρώνει η ύπαρξη μια μικρής ποσότητας νερού, το οποίο λειτουργεί ως υλικό αλλαγής φάσης (**Phase Change Material, PCM**) [94], [95], [96], [97], [98], [99] και τελικά ως το μέσο θέρμανσης του νερού χρήσης, μέσω του μηχανισμού της εξάτμισης – συμπύκνωσης.



Εικόνα 1.3: ICS σύστημα με ασύμμετρο παραβολικό κάτοπτρο που φέρει δεξαμενή με διπλό τοίχωμα και μερικό κενό στο μεταξύ των τοιχωμάτων της διάκενο [59].

Το σύστημα αυτό, που η γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του περιγράφονται μέσα στο κείμενο (κεφάλαιο 3.2) και πιο αναλυτικά (ειδικά η τεχνική του διπλού δοχείου για μεγαλύτερη μείωση των θερμικών απωλειών της δεξαμενής) στη διεθνή βιβλιογραφία [93], [59], πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως αρχικό πρότυπο στη παρούσα μελέτη για τη σχεδίαση βελτιστοποιημένων συστημάτων ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και δεξαμενή νερού με διπλό τοίχωμα.

Μία άλλη περίπτωση ICS συσκευής, που θα χρησιμοποιηθεί επίσης ως πρότυπο στη συγκεκριμένη εργασία για τη βέλτιστη σχεδίαση νέων συστημάτων ICS, είναι σύστημα που φέρει συμμετρικό παραβολικό ανακλαστήρα και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά [45]. Ένα τέτοιο σύστημα του οποίου οι βασικές σχεδιαστικές λεπτομέρειες αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.3 απεικονίζεται στην εικόνα 1.4:



Εικόνα 1.4: ICS σύστημα με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά [45].

Πρώτο θέμα διερεύνησης θα είναι η επανασχεδίαση των παραβολικών τμημάτων των καμπύλων κατόπτρων και για τους δύο τύπους συσκευών, που επιτρέπει τη κατασκευή νέων συστημάτων μέγιστης ενεργειακής - περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσης, καθώς και ο προσδιορισμός του μεγίστου αριθμού μονάδων για τοποθέτηση σε κατοικία. Παράλληλα θα εξεταστεί και η μείωση του περιβαλλοντικού ίχνους των συστημάτων αυτών στα στάδια κατασκευής – εγκατάστασης [9]. Είναι δεδομένο από τα προαναφερόμενα, ότι στόχος είναι συστήματα με βέλτιστες (optimum) επιδόσεις σε όλους τους «τομείς», γεγονός που συνδέεται; όχι μόνο με τη κλιματολογική «ανωτερότητα» των νοτιώτερων περιοχών η οποία δημιουργεί «φθηνότερες» ενεργειακά αποδοτικές συσκευές αλλά και με την ικανότητα ανάκλασης της πολύπλοκης γεωμετρικά επιφάνειας του κατόπτρου (σύνθετη γεωμετρία ανακλαστήρα: *παραβολικό τμήμα + σπειροειδές ή κυκλικό τμήμα* → *εξισώσεις με μη γραμμικές μεταβλητές*) [100], [101], [102], συνεπώς στη τελική διαμόρφωση κάθε προβλήματος μελέτης θα εμπλέκονται περισσότερες από μία μη γραμμικές

ΑΣ: Αντικειμενικές Συναρτήσεις (πρόκειται δηλαδή για προβλήματα μη γραμμικής πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης: Nonlinear Multi-Objective Optimization [103], [104], [105], [106], [107]). Για πιο ασφαλή συμπεράσματα, η μελέτη θα εξετάσει διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας με σκοπό την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων.

Η επίλυση των μαθηματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης θα υλοποιηθεί με ένα υπολογιστικό αλγόριθμο που στο τέλος συνδυάζει γραφική σχεδίαση σε υπολογιστή (**CAD: Computer Aided Design**) για την απεικόνιση της προτεινόμενης γεωμετρίας των νέων συστημάτων.

Δεύτερο σημαντικό αντικείμενο έρευνας εμβαθύνει στη τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση (εκπομπές αερίων θερμοκηπίου) των σχεδιαζόμενων ICS συστημάτων στο στάδιο χρήσης καθώς και στη σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα της αγοράς. Όλες οι παραπάνω διαδικασίες θα πραγματοποιηθούν μέσω κατάλληλων ρουτινών του αλγόριθμου που αναφέρθηκε παραπάνω, στις οποίες θα γίνει προσομοίωση της λειτουργίας των ηλιακών θερμικών συσκευών σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες.

Τα τελικά αποτελέσματα σίγουρα θα ευνοούν τη σχεδίαση βελτιωμένων ICS συστημάτων περισσότερο αποδοτικών και οικονομικότερων, τα οποία θα επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον σε όλο το κύκλο ζωής τους.

1.5 Καινοτομίες διατριβής

Στο κεφάλαιο 1.3 αναφέρθηκαν όλες οι προηγούμενες εργασίες πάνω σε περιβαλλοντική, ενεργειακή και οικονομική ανάλυση ηλιακών θερμικών συστημάτων όπως επίσης και εργασίες πάνω στη βέλτιστη σχεδίαση συμβατικών συστημάτων κυρίως τέτοιου τύπου. Στη διατριβή που ακολουθεί υπάρχουν οι εξής καινοτομίες σε σχέση με τις προηγούμενες εργασίες:

- Στη συγκεκριμένη εργασία, όλες οι μέθοδοι περιβαλλοντικής, ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης που αναφέρθηκαν στη βιβλιογραφία, εφαρμόζονται σε εξειδικευμένα ηλιακά θερμικά συστήματα (ICS με CPC ανακλαστήρα).
- Ο υπολογισμός των καμπύλων απόδοσης των νέων συστημάτων γίνεται με μαθηματικό τρόπο βελτιστοποιώντας τη συνολική απόδοση των συσκευών. Τα αποτελέσματα των παλαιότερων πειραματικών μελετών χρησιμοποιούνται σαν οδηγός, δηλαδή γίνεται «βελτιωμένη» προσέγγιση των καμπύλων απόδοσης που έχουν προκύψει από υπάρχοντα συστήματα τα οποία αποτελούν πρότυπα αναφοράς για τη σχεδίαση κάθε νέου τύπου ICS.
- Στο μαθηματικό αυτό πρόβλημα γίνεται ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής των υπό σχεδίαση συσκευών ICS μαζί με τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης τους. Με βάση αυτό και εξαιτίας των συντελεστών απόδοσης δημιουργείται μία πρωτότυπη τεχνική σε υπολογιστή (αλγόριθμος) για τη βελτιστοποίηση πολλών ΑΣ.

- Η μέθοδος της βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση της παραβολικής επιφάνειας του ανακλαστήρα, υπολογίζοντας τις διαστάσεις της, μορφοποιώντας με αυτό το τρόπο το σχήμα του καμπύλου κατόπτρου.
- Επιπλέον αναπτύσσεται ένας πρωτότυπος απλουστευμένος τρόπος δημιουργίας του κατόπτρου, για βιομηχανική σχεδίαση, βάσει της αλλαγής κλίμακας σε περιβάλλον CAD των παραβολικών τμημάτων της καμπύλης του ανακλαστήρα.
- Η σχεδίαση του συνολικού συστήματος, κάθε τύπου συσκευής, προκύπτει από τη βέλτιστη σχεδίαση του κατόπτρου ξεκινώντας από τις αρχικές διαστάσεις των προτύπων ICS. Για το σκοπό αυτό δημιουργείται μία πρωτότυπη μαθηματική μεθοδολογία υπολογισμού των διαστάσεων των επί μέρους τμημάτων των σχεδιαζόμενων ηλιακών θερμικών συσκευών η οποία συνεισφέρει στη μεταβολή της παραγωγής ζεστού νερού λόγω αλλαγής της γεωμετρίας των επιφανειών ανοίγματος και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα [93].
- Η AKZ χρησιμοποιείται ως μεθοδολογικό εργαλείο για την βελτιστοποίηση των ICS συστημάτων. Αυτό γίνεται μέσω της ολιστικής προσέγγισης καθώς και της μεταβολής του περιβαλλοντικού φορτίου των παραγόμενων συσκευών. Δηλαδή από τη μία υπολογίζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε ολόκληρο το κύκλο ζωής των ICS συστημάτων και από την άλλη επειδή επιτυγχάνεται αλλαγή της γεωμετρίας των μοντέλων (αλλαγή των διαστάσεων κάθε τμήματος των ICS διαφορετική σε κάθε διεύθυνση άξονα, συνεπώς μεταβολή σχήματος - αλλαγή του όγκου άρα και της μάζας) σε συνδυασμό με μείωση των αερίων εκπομπών στο στάδιο χρήσης (λόγω βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των νέων συστημάτων) προκαλείται συνολική μεταβολή του περιβαλλοντικού φορτίου σε όλο το κύκλο ζωής των συστημάτων αυτών.

1.6 Δομή διδακτορικού

Στο κεφάλαιο 1 περιγράφεται η μεθοδολογία της AKZ που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία και γίνεται ιστορική αναδρομή στις εφαρμογές της θεωρίας της AKZ σε ηλιακά θερμικά συστήματα. Στη συνέχεια γίνεται μία αναφορά στη τεχνική σχεδίαση τέτοιων συστημάτων. Έπειτα αναφέρονται τα είδη των συμβατικών ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά θερμικά συστήματα όπως επίσης και των πιο εξειδικευμένων συλλεκτών (CPC) που τοποθετούνται στα συστήματα ICS. Στο επόμενο στάδιο παρατίθενται οι πιο σημαντικές εργασίες που έχουν γίνει μέχρι τώρα και αφορούν την εφαρμογή της θεωρίας της AKZ και της ενεργειακής, περιβαλλοντικής και οικονομικής ανάλυσης στο στάδιο χρήσης ηλιακών θερμικών συστημάτων καθώς επίσης και εργασίες πάνω στην βέλτιστη σχεδίαση των συστημάτων αυτών. Ορίζεται το αντικείμενο της συγκεκριμένης διατριβής (με βάση δύο πρότυπα συστήματα ICS: α) σύστημα με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού και β) σύστημα με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά) και οι καινοτομίες σε σχέση με τις προηγούμενες εργασίες πάνω στην ίδια θεματολογία.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η AKZ ενός ICS συστήματος το οποίο κατασκευάζεται από εταιρεία που εδρεύει στον Ελλαδικό χώρο και διαθέτει συμμετρικό κάτοπτρο και μία δεξαμενή νερού χρήσης. Έπειτα γίνεται ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στα στάδια κατασκευής-εγκατάστασης για το σύστημα με συμμετρικό ανακλαστήρα και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά το οποίο έχει μεγάλες ομοιότητες με το προηγούμενο. Στη συνέχεια δίνονται οι ενεργειακοί, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί συντελεστές για τη μελέτη στο στάδιο χρήσης όλων των υπό σχεδίαση ICS συστημάτων.

Στο κεφάλαιο 3, αρχικά υπολογίζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στα στάδια κατασκευής-εγκατάστασης του ICS συστήματος (α) οι οποίες συγκρίνονται με αυτές του (β) καθώς επίσης και με τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ενός FPTU συστήματος όμοιας κλίμακας. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν το υπό μελέτη μοντέλο (α), με συνδυασμό παλαιότερης βιβλιογραφίας και μαθηματικών πράξεων, αλλά και οι εξισώσεις του προβλήματος μη γραμμικής πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση νέων τέτοιου τύπου συστημάτων. Έπειτα παρατίθεται ο αλγόριθμος επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος μαζί με τους αντίστοιχους μαθηματικούς τύπους που είναι πρωτότυπος (δεν υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία) ο οποίος δίνει τη βέλτιστη γεωμετρία των κατόπτρων των συστημάτων αυτών και επιπλέον τον ελάχιστο αριθμό μονάδων που θα τοποθετηθούν στην εκάστοτε οικία που μελετάται ανά περιοχή εγκατάστασης. Επιπροσθέτως (με βάση τη βέλτιστη γεωμετρία των κατόπτρων) περιγράφεται ένας πρωτότυπος τρόπος δημιουργίας της παραβολικής επιφάνειας, σε περιβάλλον CAD για χρήση σε εξειδικευμένες εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (**CNC: Computerized Numerical Control**) κατασκευής παραβολικών ανακλαστήρων. Στο ίδιο κεφάλαιο δίνεται η τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική μελέτη στο στάδιο χρήσης των ICS συστημάτων (α) με χρήση υπολογιστικών τεχνικών. Εξετάζεται ακόμα η σχεδίαση του συνολικού συστήματος (α) καθώς και η αυξομείωση του περιβαλλοντικού φορτίου στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης των συστημάτων που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση με τη δημιουργία μιας πρωτότυπης μαθηματικής τεχνικής υπολογισμού των διαστάσεων των επί μέρους τμημάτων των σχεδιαζόμενων μοντέλων που επιπλέον επηρεάζει και τη μέγιστη παραγόμενη θερμική ενέργεια κάθε συστήματος. Στο τέλος του κεφαλαίου εφαρμόζεται η ίδια τεχνική βέλτιστης σχεδίασης και ενεργειακής-περιβαλλοντικής-οικονομικής μελέτης στο ICS σύστημα (β).

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η τεχνοοικονομική ανάλυση στο στάδιο χρήσης των σχεδιαζόμενων από τον αλγόριθμο συστημάτων, δηλαδή προσομοιώνονται με χρήση ρουτίνων του αλγόριθμου: η παραγόμενη θερμική ενέργεια, οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (εκπομπές αερίων θερμοκηπίου) και η οικονομική απόδοση των νέων ICS συστημάτων. Όλα αυτά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη των πρότυπων συστημάτων καθώς και του ίδιου FPTU συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης, μεταξύ ICS και FPTU συσκευών, στην αρχή του κεφαλαίου 3.

Στο τελικό κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.Ενεργειακή, περιβαλλοντική και οικονομική ανάλυση ηλιακών θερμικών συστημάτων ICS

2.1 Εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε ένα ηλιακό θερμικό σύστημα ICS με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο (CPC) και μία δεξαμενή νερού χρήσης

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εφαρμογή της μεθόδου της AKZ σε ένα ηλιακό θερμικό σύστημα ICS (μοντέλο: *alpha III*, Εικόνα 2.1) με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο που κατασκευάζεται στην Ελλάδα από την εταιρεία SOLE AE [23] που βρίσκεται στην Αττική. Η συλλεκτική επιφάνεια του υπό μελέτη συστήματος είναι 206 x 106 cm και η δεξαμενή νερού χρήσης έχει χωρητικότητα 200 λίτρα.



Εικόνα 2.1: Ηλιακό θερμικό σύστημα *alpha III* [23].

Αρχικά θα γίνει ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας (Functional Unit: FU) [9].

Η FU για το ηλιακό θερμικό σύστημα *alpha III* αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- Το συλλέκτη απορρόφησης (ο οποίος περιλαμβάνει το συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο Αλουμινίου, την επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι η δεξαμενή του νερού χρήσης, τη μόνωση, το προφίλ Αλουμινίου με τη διάφανη εξωτερική επιφάνεια και το εξωτερικό κέλυφος.

- Το σύστημα στήριξης (που επιτρέπει τη τοποθέτηση του συστήματος στην οροφή των κτιρίων).

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή του υπό μελέτη συστήματος ICS (μαζί με τις αντίστοιχες ποσότητες των υλικών αυτών) [108] παρουσιάζονται στο πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Υλικά κατασκευής ηλιακού θερμικού συστήματος *alphaIII*.

| Συλλέκτης απορρόφησης | | Δεξαμενή νερού 200 λίτρων | | Σύστημα στήριξης | | Άλλα μέρη του συλλέκτη | |
|-----------------------|---------------|---------------------------|---------------|------------------|---------------|------------------------|---------------|
| Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) |
| HIPS Plastic | 10.47 | Steel | 33.96 | Alumimium | 12 | Plastic tube | 2 |
| Aluminium | 14.53 | Glass | 2.04 | Steel | 2 | Glass fibre | 2 |
| Solar Glass | 22 | Magnesium | 0.20 | | | | |
| PUR | 23 | | | | | | |
| Σύνολο | 70 | | 36.20 | | 14 | | 4 |

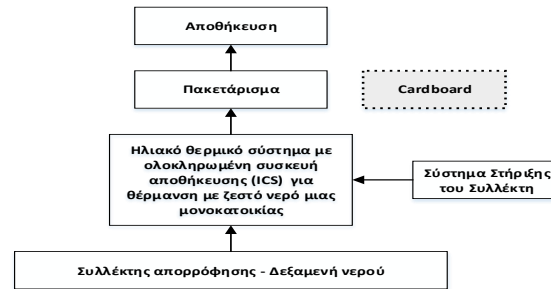
Τα κύρια μέρη του ηλιακού θερμικού συστήματος *alpha III* (συλλέκτης απορρόφησης - δεξαμενή νερού και σύστημα στήριξης) κατασκευάζονται την ίδια χρονική περίοδο και στη συνέχεια πακετάρονται σε μία ενιαία μονάδα η οποία αποθηκεύεται στις αποθήκες της κατασκευάστριας εταιρείας (Σχήμα 2.1(α)).

Η διαδικασία κατασκευής του συστήματος *alpha3* χωρίζεται σε πέντε στάδια [109]:

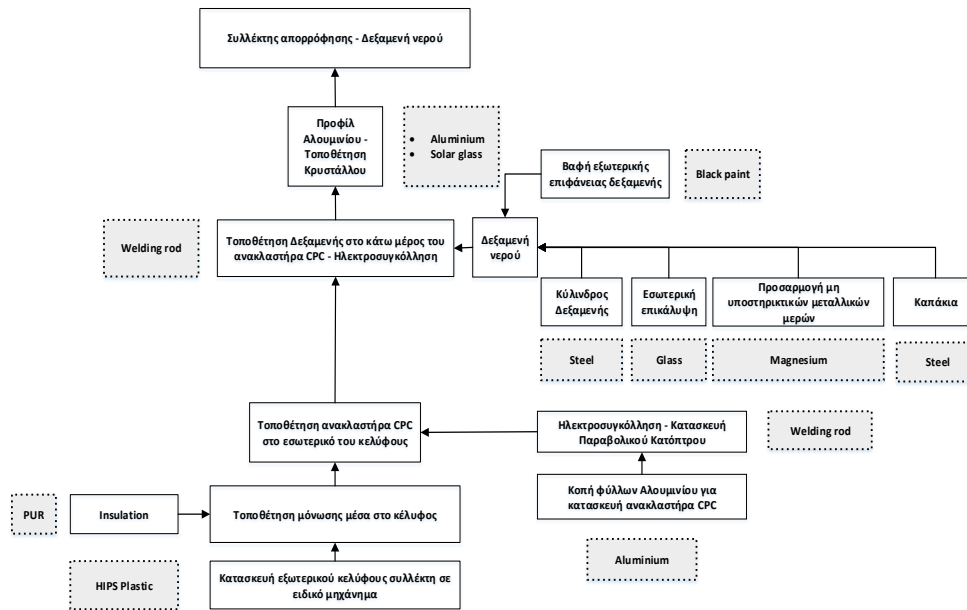
1. Αρχικά γίνεται η κατασκευή του συλλέκτη απορρόφησης. Η διαδικασία της κατασκευής του *συλλέκτη απορρόφησης* παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1(β). Πρώτα κατασκευάζεται το εξωτερικό κέλυφος του συλλέκτη απορρόφησης από πλαστικό **HIPS** (High Impact PolyStyrene plastic) με πάχος 3 mm. Το πλαστικό HIPS είναι ένα πολύ ανθεκτικό πλαστικό πολλών χρήσεων το οποίο είναι εύκολο να κατασκευαστεί και να επεξεργαστεί. Το υλικό παρασκευής του είναι το Πολυστυρόλιο [110]. Το πλαστικό αυτό μπαίνει σε ειδική μηχανή vacuum, στην οποία διαμορφώνεται σε συγκεκριμένο καλούπι η επιθυμητή μορφή του κελύφους (κάσα) [23]. Στη συνέχεια η κάσα οδηγείται στο καλούπι έγχυσης πολυουρεθάνης, όπου ενσωματώνεται η μόνωση στην κάσα. Η Πολυουρεθάνη είναι 2 συστατικών, διογκώνεται μέσα στο καλούπι και σταθεροποιείται. Έπειτα τοποθετείται ειδικό ανακλαστικό φύλλο αλουμινίου, παραβολικής μορφής (κάτοπτρο) στην εσωτερική επιφάνεια της κάσας. Στη συνέχεια η κάσα οδηγείται στη γραμμή παραγωγής για να γίνει η τοποθέτηση της δεξαμενής του νερού μέσα στη μονωμένη κάσα. Η δεξαμενή νερού, χωρητικότητας 200 λίτρων, κατασκευάζεται από ένα φύλλο Χάλυβα στο οποίο «δίνεται» κυλινδρικό σχήμα. Το επόμενο βήμα είναι η εσωτερική επίστρωση της δεξαμενής με εμαγιέ γυαλί ψημένο στους 860 Co για προστασία της δεξαμενής από ρωγμές λόγω συστολών και διαστολών κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Έπειτα, στο εσωτερικό της δεξαμενής, γίνεται η προσαρμογή της ηλεκτρικής αντίστασης και της ανόδου από Μαγνήσιο. Ειδικά η ηλεκτρική αντίσταση έχει μεγάλη χρησιμότητα γιατί επιτρέπει στο ICS σύστημα να

λειτουργεί χωρίς να εξαρτάται απαραίτητα από την ηλιακή ακτινοβολία πλην όμως γίνεται αιτία δημιουργίας αερίων εκπομπών στην ατμόσφαιρα (από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στους υποσταθμούς της ΔΕΗ). Στο επόμενο βήμα τοποθετούνται τα «καπάκια» της δεξαμενής τα οποία κατασκευάζονται και αυτά από Χάλυβα. Η εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής βάφεται με μαύρη μπογιά με στόχο την αύξηση της απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτήν. Στο τέλος η δεξαμενή τοποθετείται στο κάτω μέρος του κατόπτρου όπου και ηλεκτροσυγκολλείται (Σχήμα 2.1(β)). Η κατασκευή του συλλέκτη απορρόφησης τελειώνει με το προφίλ Αλουμινίου που στερεώνεται περιμετρικά της κάσας και πάνω σ αυτό τοποθετείται το ειδικό τζάμι (solar glass), υψηλής διαπερατότητας, το οποίο και στεγανοποιείται.

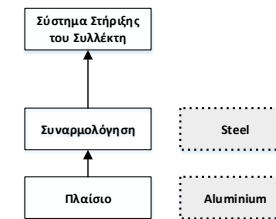
2. Στη συνέχεια γίνεται η κατασκευή του συστήματος στήριξης του ηλιακού θερμικού συστήματος *alpha III*. Το σύστημα στήριξης [109] αποτελείται από ράβδους Αλουμινίου οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με μπουλόνια (Σχήμα 2.1(γ)). Το σύστημα στήριξης δίνει στο ηλιακό θερμικό σύστημα κλίση 30° σε σχέση με το επίπεδο για βέλτιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 2.1(α): Διάγραμμα ροής εργασιών κατασκευής για το συνολικό σύστημα ICS.



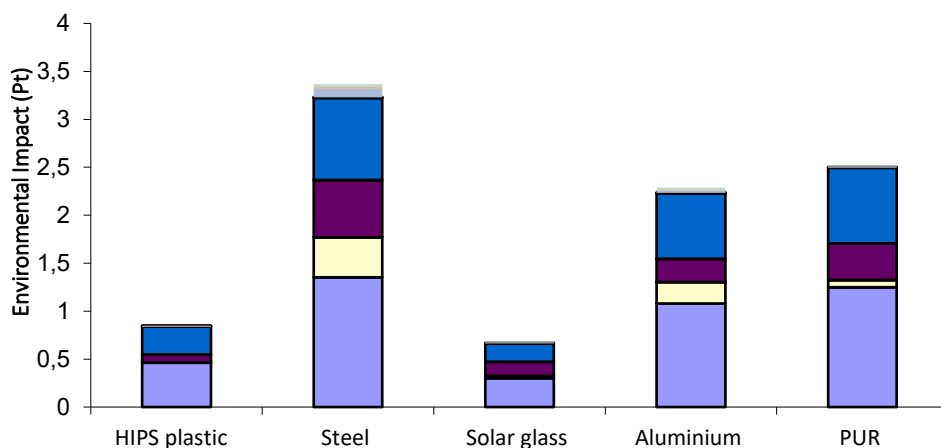
Σχήμα 2.1(β): Συλλέκτης απορρόφησης – Δεξαμενή νερού.



Σχήμα 2.1(γ): Σύστημα στήριξης του Συλλέκτη.

3. Στα υλικά του Ηλιακού θερμικού συστήματος *alpha III* πρέπει να προστεθούν η πλαστική σωλήνα (Plastic tube) (που χρησιμοποιείται για την μεταφορά του θερμικού υγρού από τη δεξαμενή στη κατοικία) και η μόνωση της που είναι Υαλοβάμβακας 4 m.
4. Στο τέλος της κατασκευής γίνεται η συσκευασία του ηλιακού θερμικού συστήματος και η αποθήκευση του στο χώρο αποθήκευσης έτοιμων προϊόντων της εταιρείας (Σχήμα 2.1(α)).
5. Το επόμενο βήμα είναι η μεταφορά του συστήματος από την εταιρεία προς τις κατοικίες, με φορτηγό (μικρότερο των 3 τόνων). Η μέση απόσταση που διανύεται είναι περίπου 20 km. Για το τέλος της «ζωής» των ηλιακών θερμικών συστημάτων *alpha III* δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες γιατί είναι ένα σχετικά καινούριο σύστημα οπότε γίνεται η υπόθεση ότι συλλέγονται και απορρίπτονται στην πλησιέστερη χωματερή.

Σύμφωνα με το λογισμικό πακέτο SimaPro 9.5 και τη μέθοδο Recipe Endpoint [4] οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (Environmental Impact) (στάδια κατασκευής και εγκατάστασης) για την περίπτωση του ηλιακού θερμικού συστήματος *alpha III* παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.1.

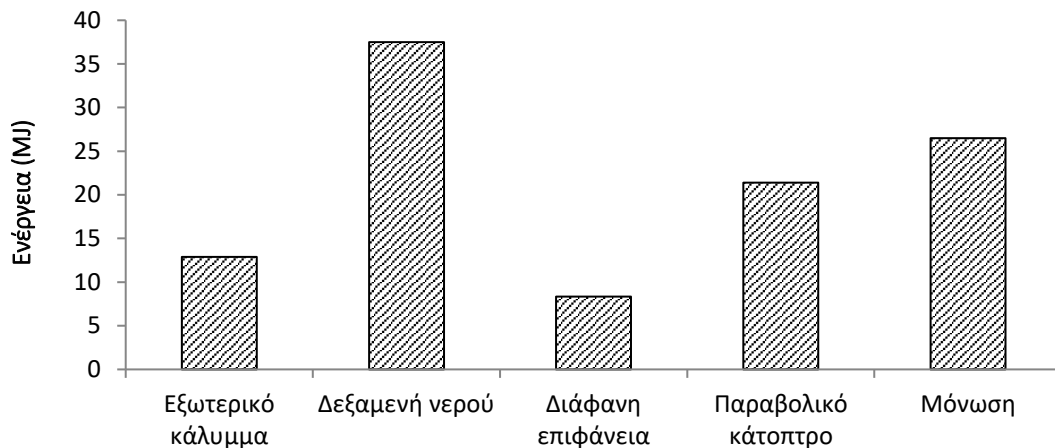


Διάγραμμα 2.1: Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κατηγορία ευρείας επίδρασης και υλικό για το ηλιακό θερμικό σύστημα *alpha III*

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα η μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση προκαλείται από το Χάλυβα που χρησιμοποιείται στη κατασκευή της δεξαμενής του νερού. Μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση προκαλείται από την στερεή πολυουρεθάνη που χρησιμοποιείται για τη μόνωση του συλλέκτη απορρόφησης και αμέσως μετά ακολουθεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση του Αλουμινίου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του συμμετρικού παραβολικού κατόπτρου (CPC). Αρκετά μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις προκαλούνται από το πλαστικό HIPS που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του εξωτερικού καλύμματος και από το γυαλί της επιφάνειας απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2 Υπολογισμός Ενέργειας στο στάδιο κατασκευής του ICS συστήματος με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο (CPC) και μία δεξαμενή νερού χρήσης

Στο διάγραμμα 2.2 δίνεται η ενέργεια που δαπανάται στη κατασκευή κάθε τμήματος του συστήματος *alpha III* [108]:

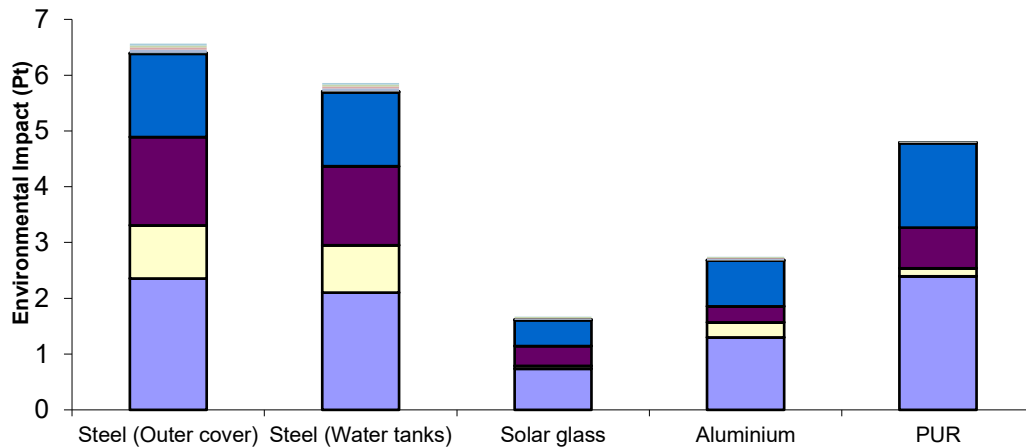


Διάγραμμα 2.2: Ενέργεια ανά τμήμα του ηλιακού θερμικού συστήματος *alpha III* στη διαδικασία κατασκευής.

Παρατηρείται ότι η ενέργεια κατασκευής, για κάθε τμήμα του ICS, ακολουθεί μια παρόμοια κατανομή με το διάγραμμα 2.1 (περιβαλλοντικό φορτίο στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης, για κάθε τμήμα του ICS): δηλαδή το περιβαλλοντικό φορτίο στα στάδια αυτά είναι αποτέλεσμα της ενέργειας που δαπανάται για τη κατασκευή κάθε τμήματος του συστήματος. Επιπροσθέτως, με βάση τη μέθοδο της ΑΚΖ και το πίνακα 2.1, το περιβαλλοντικό φορτίο σχετίζεται και με τις ποσότητες (οι μεγάλες μάζες απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για την επεξεργασία τους, συνεπώς οδηγούν σε περισσότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, ενώ αντίθετα οι μικρότερες μάζες απαιτούν μικρότερα ποσά ενέργειας, άρα έχουν λιγότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις) αλλά και το τύπο των υλικών του ICS [9].

2.3 Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στο στάδιο κατασκευής και εγκατάστασης συστήματος ICS με συμμετρικό κάτοπτρο (CPC) και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά

Για το σύστημα της εικόνας 1.4 (Κεφάλαιο 1.4) τα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης είναι όμοια με τα αντίστοιχα στάδια του συστήματος *alpha III*. Σε αυτή τη περίπτωση το περιβαλλοντικό φορτίο παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.3:



Διάγραμμα 2.3: Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κατηγορία ευρείας επίδρασης και υλικό για το ηλιακό θερμικό σύστημα με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά.

Η κατανομή του περιβαλλοντικού φορτίου είναι όμοια με αυτή του διαγράμματος 2.1 με κύριες διαφορές στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις του εξωτερικού καλύμματος (στη περίπτωση αυτή το κάλυμμα είναι μεταλλικό και όχι από πλαστικό HIPS, συνεπώς έχει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο λόγω μεγαλύτερης μάζας) και στη γενικότερη ποσότητα των υλικών. Το υλικό με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο στο σύστημα του διαγράμματος 2.3 είναι ο Χάλυβας υλικό που υπάρχει και στο εξωτερικό κάλυμμα και στις δεξαμενές νερού.

2.4 Ενεργειακοί, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί συντελεστές στο στάδιο χρήσης των συστημάτων ICS

Το ωφέλιμο ετήσιο ενεργειακό κέρδος από τη λειτουργία των ηλιακών θερμικών συστημάτων ICS γενικά είναι η ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ανοίγματος των συστημάτων αυτών η οποία γίνεται θερμότητα μείον την ενέργεια που χάνεται λόγω των θερμικών απωλειών της δεξαμενής (ή δεξαμενών) νερού χρήσης κάθε συστήματος η οποία προκύπτει με βάση την αντίστοιχη εξίσωση του επίπεδου συλλέκτη [111], [112] καθώς επίσης και τις εξισώσεις υπολογισμού του ενεργειακού ισοζυγίου ανά επιφάνεια ανοίγματος για ICS [45] και υβριδικά PV/T (Hybrid Photovoltaic/Thermal: Υβριδικά Φωτοβολταϊκά/Θερμικά) [113] συστήματα:

$$Q_{TOTAL} = (\text{αριθμός συστημάτων ICS}) \cdot Q_{THE/Year} = (\text{αριθμός συστημάτων ICS}) \cdot \sum_{k=1}^{k=12} \{D_k \cdot [G_m \cdot A_\alpha \cdot t_{day} \cdot n_d - A_r \cdot U_s \cdot t_{night} \cdot (T_{i,m} - T_{\alpha,m})]\} \quad (2.1)$$

όπου $Q_{THE/Year}$: η ετήσια παραγόμενη θερμική ενέργεια από το ηλιακό θερμικό σύστημα (Wh/Year), G_m : μέση ημερήσια ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ανοίγματος του συστήματος (W/m^2), A_α : επιφάνεια ανοίγματος της ηλιακής συσκευής (m^2)

[45], [93], t_{day} : οι ώρες (h) ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος (για κάθε μήνα), n_d : μέση ημερήσια απόδοση του ηλιακού θερμικού συστήματος A_r : επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας (m^2) [45], [93], U_s : συντελεστής θερμικών απωλειών δεξαμενής νερού χρήσης κατά τη διάρκεια της νύχτας $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$), $t_{night} = 24 - t_{day}$: οι υπόλοιπες ώρες (h) του εικοσιτετραώρου στις οποίες το σύστημα δεν λειτουργεί (βραδινές ώρες) και είναι απαραίτητη η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας που παράγεται, $T_{i,m}, T_{a,m}$ ($^\circ C$): οι μέσες θερμοκρασίες εξόδου και περιβάλλοντος αντίστοιχα του νερού στη δεξαμενή, D_k αριθμός ημερών κάθε μήνα και k : δείκτης που αντιστοιχεί σε κάθε μήνα για χρονικό διάστημα ενός έτους λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος.

Επίσης για τη μέτρηση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς στο στάδιο χρήσης των συστημάτων ICS χρησιμοποιείται ο δείκτης συνολικής ετήσιας μείωσης αερίων εκπομπών **TER** (**TER**: **T**otal annual **E**mission **R**eduction σε τόνους, tn CO₂ / year):

$$TER = (\text{αριθμός συστημάτων ICS}) \cdot NAER_{tn\ CO_2/year} \quad (2.2)$$

Όπου **NAER** είναι ο δείκτης ετήσιας μείωσης αερίων εκπομπών (**NAER**: **N**ET **A**NNUAL **E**MISSION **R**EDUCTION) στο στάδιο χρήσης μίας ICS μονάδας που προκύπτει μέσω ενεργειακής μελέτης ICS συστημάτων [114].

Οι οικονομικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των ICS συστημάτων είναι: η καθαρή παρούσα αξία (**NPV**: **N**et **P**resent **V**alue) και ο χρόνος αποπληρωμής (Payback period) [115], [116].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Πολυκριτηριακή ανάλυση συστημάτων ICS

3.1 Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις συστημάτων ICS

Στο κεφάλαιο αυτό θα εφαρμοστεί η μέθοδος της AKZ στα πρότυπα συστήματα ICS που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 1.4 (Εικόνες 1.3 και 1.4). Τα βασικά τμήματα του ICS συστήματος με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού είναι: Το εξωτερικό κέλυφος, ο ασύμμετρος παραβολικός ανακλαστήρας και η δεξαμενή αποθήκευσης με το διπλό τοίχωμα και η οποία λειτουργεί και ως απορροφητής της ηλιακής ενέργειας. Ο πίνακας 3.1 [93] περιέχει όλες τις ποσότητες των υλικών (σε kg) που χρησιμοποιήθηκαν στη κατασκευή του συστήματος της εικόνας 1.3 (Κεφάλαιο 1.4):

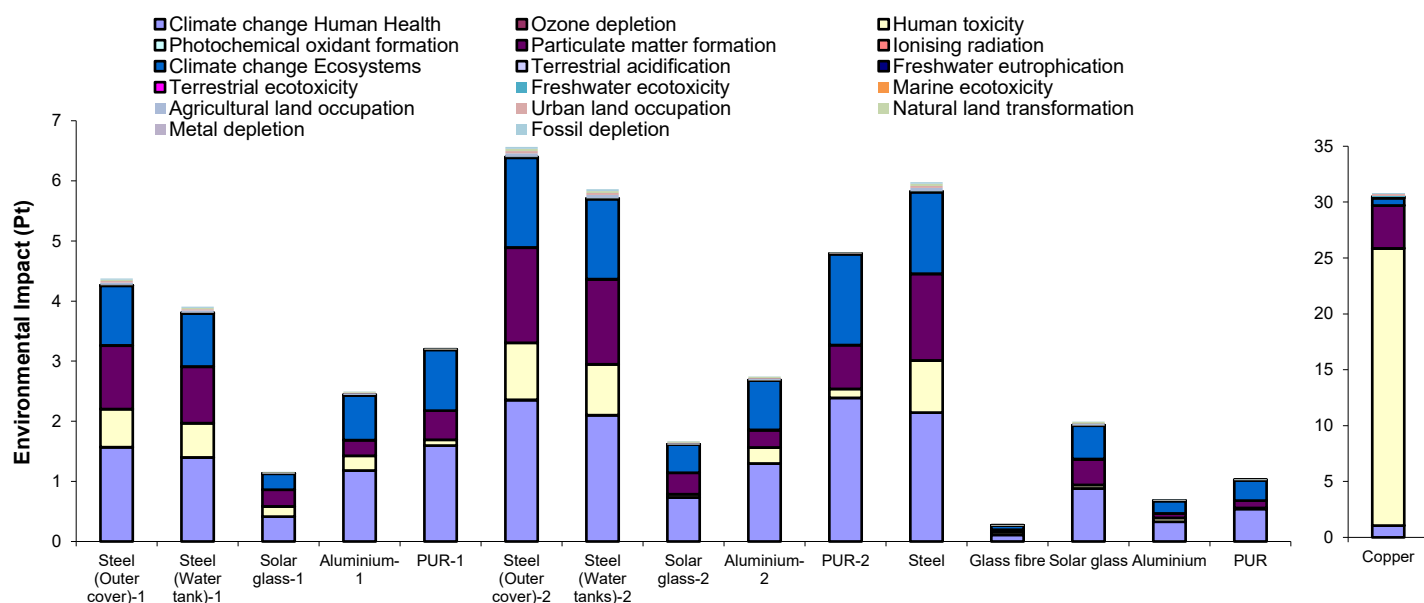
Πίνακας 3.1: Υλικά κατασκευής ηλιακού θερμικού συστήματος με ασύμμετρο παραβολικό ανακλαστήρα που φέρει δεξαμενή με διπλό τοίχωμα [93]

| Συλλέκτης απορρόφησης | | Δεξαμενή νερού | | Σύστημα στήριξης | | Άλλα μέρη του συλλέκτη | |
|-----------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|---------------|------------------------|---------------|
| Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) |
| Steel | 44.47 | Steel | 29.40 | Steel | 3 | Plastic tube | 2 |
| Aluminium | 6.49 | Magnesium | 0.10 | | | Glass fibre | 2 |
| Solar Glass | 8.74 | | | | | | |
| PUR | 12.02 | | | | | | |
| Σύνολο | 71.72 | | 29.50 | | 3 | | 4 |

Η συνολική μάζα *συλλέκτη απορρόφησης* και *δεξαμενής νερού* θα είναι: $71.72 + 29.50 = 101.22$ kg. Τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος έχουν πολύ μικρή μάζα συνεπώς συνεισφέρουν ελάχιστα στη μεταβολή του περιβαλλοντικού φορτίου στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης του πρότυπου συστήματος ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού.

Για την εύρεση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στα στάδια που αναφέρθηκαν χρησιμοποιείται πάλι το λογισμικό πρόγραμμα SimaPro 9.5 [4] και η βάση δεδομένων Ecoinvent 3.9.1 [3]. Με βάση τα παραπάνω, το περιβαλλοντικό φορτίο (Environmental Impact) των προτύπων ICS συστημάτων (οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις του συστήματος με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.3) αλλά και ενός συνήθους FPTU συστήματος (με συλλεκτική επιφάνεια 1.766 m^2 και χωρητικότητα δεξαμενής του νερού 96 λίτρα [93]), απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.1. Στο διάγραμμα αυτό δεν περιέχονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις του συστήματος που

αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.1 (*alpha III*) γιατί υπάρχουν διαφορές ως προς τα υλικά σε σχέση με τα δύο πρότυπα ICS συστήματα, τα οποία αποτελούνται από όμοια υλικά.



Διάγραμμα 3.1: Περιβαλλοντικό φορτίο στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης των συστημάτων ICS και FPTU.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου διαγράμματος διαπιστώνεται ότι το υλικό με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση είναι ο Χαλκός που χρησιμοποιείται στο συλλέκτη του FPTU συστήματος. Η κατανομή των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στο Χαλκό επηρεάζει την κατηγορία της τοξικότητας στον ανθρώπινο οργανισμό (Human toxicity) – μεγαλύτερο ποσοστό – και αυτό οφείλεται στην έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε τοξικές ενώσεις στο εργασιακό περιβάλλον (βιομηχανία Χαλκού). Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες ο Χαλκός σε πολύ υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης λειτουργεί σαν τοξικό υλικό [117]. Άλλη κατηγορία που επηρεάζεται είναι η μόλυνση από πολύ μικρά σωματίδια που βλάπτουν την καρδιά και τους πνεύμονες (Particulate matter formation) και σε πολύ μικρό ποσοστό η κλιματική αλλαγή (Climate change human health). Η έκθεση σε πολύ μικρά σωματίδια που βλάπτουν την καρδιά και τους πνεύμονες γίνεται στη βιομηχανία του Χαλκού ή επεξεργασίας μετάλλων και γίνεται είτε με την αναπνοή της σκόνης του Χαλκού ή από την επαφή δερμάτων [117]. Η κλιματική αλλαγή αφορά την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου που μπορούν να μεταβάλλουν το κλίμα μιας περιοχής (βιομηχανία Χαλκού) [117].

Σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση προκαλείται επίσης από το Χάλυβα υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα τόσο στο FPTU σύστημα όσο και στα συστήματα ICS. Οι κατηγορίες που επηρεάζονται περισσότερο λόγω του υλικού αυτού είναι της κλιματικής αλλαγής (Climate change human health, climate change Ecosystems) - μεγαλύτερο ποσοστό, της μόλυνσης από πολύ μικρά σωματίδια που βλάπτουν την καρδιά και τους πνεύμονες (Particulate matter formation) και σε μικρό ποσοστό της τοξικότητας στον ανθρώπινο οργανισμό (Human toxicity). Η επεξεργασία του Χάλυβα στην βιομηχανία με τοξικά υλικά οδηγεί σε έκλυση αερίων

θερμοκηπίου τα οποία είναι υπεύθυνα για την κλιματική αλλαγή ενός τόπου η οποία επιδρά εξίσου στον άνθρωπο και το περιβάλλον [117]. Στην βιομηχανία του Χάλυβα επίσης γίνεται έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε πολύ μικρά ανόργανα σωματίδια που μπορούν να βλάψουν την καρδιά και τους πνεύμονες (αναπνοής σκόνης κατά την κοπή του υλικού σε επί μέρους κομμάτια) [118]. Τέλος η κατηγορία της τοξικότητας στον άνθρωπο αφορά την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε τοξικούς παράγοντες στο εργασιακό περιβάλλον, κυρίως κατά την βαφή των υλικών παρασκευής [119].

Το σύστημα με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση και από τα τρία υπό μελέτη ηλιακά θερμικά συστήματα είναι το FPTU (με αρκετά μεγάλη διαφορά σε σχέση με τα άλλα δύο) ενώ το σύστημα με τη μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση είναι το ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και δεξαμενή νερού με διπλό τοίχωμα.

3.2 Βέλτιστη σχεδίαση συστήματος ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και δεξαμενή νερού χρήσης με διπλό τοίχωμα

Αντικειμενικός σκοπός της βέλτιστης σχεδίασης που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, είναι η κατασκευή νέων ICS συστημάτων με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης από τα υπάρχοντα συστήματα (Εικόνα 1.3 – Κεφάλαιο 1.4 [93], [59]), με μειωμένο κόστος παραγωγής και φιλικότερα στο περιβάλλον. Μέχρι τώρα οποιαδήποτε μελέτη αφορούσε τα FPTU, ETTU και ICS συστήματα [16] γινόταν μέσω Πειραμάτων Εξωτερικού Χώρου (ΠΕΧ) [24], [25], [45], [93], [59]. Στα ΠΕΧ οι διαστάσεις των κυρίων τμημάτων των υπό μελέτη ηλιακών συσκευών, που σχετίζονταν με την ενεργειακή τους απόδοση (συλλέκτης, δεξαμενή), ήταν προκαθορισμένες από τον ερευνητή – κατασκευαστή βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών κατασκευής καθώς και των ενεργειακών αναγκών των κατοίκων των περιοχών στις οποίες θα γινόταν η τοποθέτηση των ηλιακών θερμικών συστημάτων. Συνήθως η πειραματική μελέτη είχε διάρκεια από έξι μήνες έως ένα έτος και ήταν χωρισμένη σε δύο φάσεις για κάθε εικοσιτετράωρο μελέτης i) 6:30 το πρωί έως 6:30 το απόγευμα και ii) 6:30 το απόγευμα έως 6:30 το πρωί της επόμενης μέρας. Μετά το πέρας του συνολικού χρόνου εκτέλεσης κάθε πειράματος εξάγονταν οι καμπύλες απόδοσης του εκάστοτε συστήματος δηλαδή η Μέση Ημερήσια Απόδοση (ΜΗΑ) και ο Συντελεστής Θερμικών Απωλειών (ΣΘΑ) της δεξαμενής του νερού κατά τη διάρκεια της νυχτερινής λειτουργίας της συσκευής (Παραρτημα ΙΙΙ) όπως επίσης και οι καμπύλες που αφορούσαν τη μέση θερμοκρασία του νερού που ήταν αποθηκευμένο στην ίδια δεξαμενή νερού χρήσης (στη πειραματική μελέτη οι παράμετροι των καμπύλων απόδοσης και η μέση θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή υπολογίζονταν με χρήση κατάλληλων αισθητήρων που ήταν τοποθετημένοι πάνω στις ηλιακές συσκευές καθόλη τη διάρκεια του πειράματος).

3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, για όλα γενικά τα συστήματα ICS η MHA n_d , η οποία είναι αδιάστατος αριθμός, σχετίζεται με τον λόγο $\frac{\Delta T_{m,D}}{G_m}$ ($^{\circ}C \cdot W^{-1} \cdot m^2$) και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση δευτέρου βαθμού [24]:

$$n_d = A + B \cdot \frac{\Delta T_{m,D}}{G_m} + C \cdot \left(\frac{\Delta T_{m,D}}{G_m} \right)^2 \quad (3.1)$$

Η παράμετρος $\Delta T_{m,D}$ ($^{\circ}C$) συνδέεται με τη διαφορά θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος όπως προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση [24]:

$$\Delta T_{m,D} = \frac{T_{i,m} + T_{f,m}}{2} - T_{a,m} \quad (3.2)$$

Θα είναι $T_{i,m}$ ($^{\circ}C$) η μέση θερμοκρασία του νερού σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής, $T_{f,m}$ ($^{\circ}C$) θα είναι η τελική μέση θερμοκρασία του νερού, $T_{a,m}$ ($^{\circ}C$) θα είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στο διάστημα $\Delta t = t_f - t_i$ (t_i : 6:30 το πρωί, t_f : 6:30 το απόγευμα αντίστοιχα) και G_m (W/m^2) η μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην προσπίπτουσα επιφάνεια στο ίδιο χρονικό διάστημα, η οποία δίνεται από την εξίσωση (3.3) [24]:

$$G_m = \frac{\int_{t_i}^{t_f} G(t) dt}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Η παράμετρος $G(t)$ (W/m^2) στην παραπάνω εξίσωση αντιπροσωπεύει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας για μια συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία στο χρονικό διάστημα $\Delta t = t_f - t_i$.

Ο συντελεστής A της εξίσωσης (3.1) σχετίζεται με την **Οπτική Απόδοση (OA)** του συστήματος ICS η οποία θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [120], [93]:

$$n_o = \tau \cdot \alpha_r \cdot \rho_r^{(N)} \cdot \gamma \quad (3.4)$$

Όπου οι παράμετροι της παραπάνω εξίσωσης ορίζονται στις μελέτες των *Souliotis et al.* [120], [93].

Ο μέσος αριθμός αντανάκλασεων (**ANR: Average Number of Reflections**) $\langle N \rangle$ για σύστημα με συμμετρικό κάτοπτρο ορίζεται ως [100], [101], [121], [120]:

$$\langle N \rangle = \left\{ \frac{\pi}{12} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\sin \psi_m \cdot \left[\sqrt{2} - [1 - \cos \psi_m]^{\frac{1}{2}} \right]}{[1 + \cos \psi_m]^{\frac{3}{2}}} + \ln \frac{\sin \psi_m + \sqrt{2} \cdot [1 + \cos \psi_m]^{\frac{1}{2}}}{1 + \cos \psi_m} \right\} \quad (3.5)$$

Ο αντίστοιχος ANR $\langle N \rangle$ για σύστημα με ασύμμετρο κάτοπτρο ορίζεται ως [93], [122]:

$$\langle N \rangle = \frac{1}{4} \cdot \left[\left[\frac{3\pi}{8} + \frac{\sqrt{2} \cdot [1 - \cos \psi_m]^{\frac{1}{2}} - 1 + \cos \psi_m}{1 + \cos \psi_m} + \ln \frac{\sin \psi_m + \sqrt{2} \cdot [1 + \cos \psi_m]^{\frac{1}{2}}}{1 + \cos \psi_m} \right] + \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} \cdot \left[\frac{\sqrt{2} \cdot [1 - \cos \varphi_m]^{\frac{1}{2}} - 1 + \cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} + \ln \frac{\sin \varphi_m + \sqrt{2} \cdot [1 + \cos \varphi_m]^{\frac{1}{2}}}{1 + \cos \varphi_m} \right] \right] \quad (3.6)$$

Οι συντελεστές B και C της εξίσωσης (3.1) αναπαριστούν τις θερμικές απώλειες του συστήματος ICS κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής [24].

Ο ΣΘΑ U_s ($W \cdot ^\circ C^{-1}$) ορίζεται ως η θερμική συμπεριφορά του συστήματος από 6:30 το απόγευμα μέχρι 6:30 το επόμενο πρωί (όπου $T_{i,m}$ ($^\circ C$): η μέση θερμοκρασία του νερού που είναι αποθηκευμένο στην δεξαμενή στο αρχικό χρονικό σημείο, κατά τις 6:30 το απόγευμα και $T_{a,m}$ ($^\circ C$): η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στη διάρκεια της νυχτερινής λειτουργίας του συστήματος) [24]:

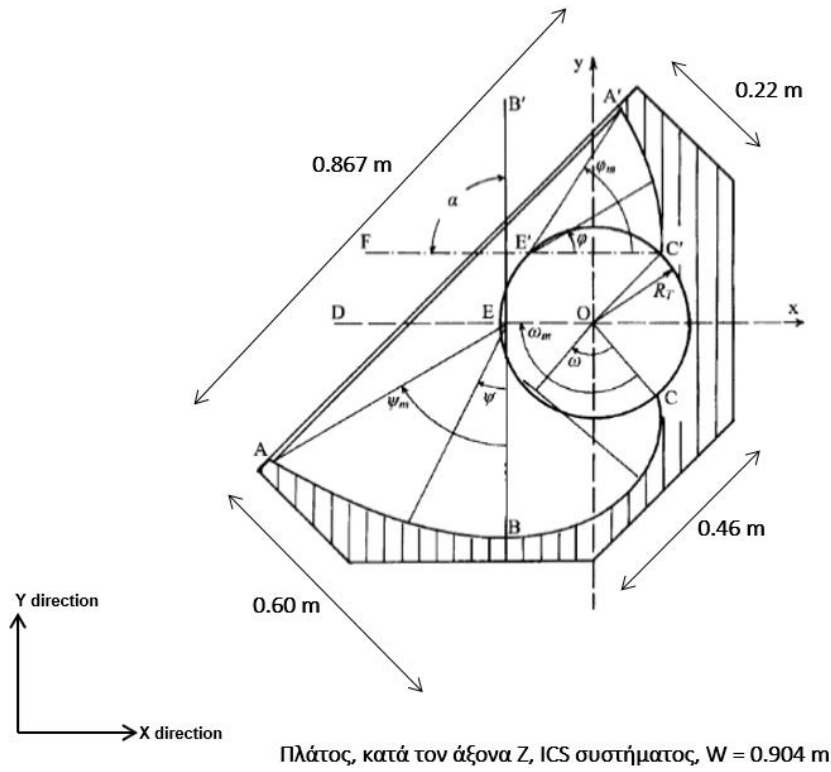
$$U_s = D + F \cdot \Delta T_{m,N} = D + F \cdot (T_{i,m} - T_{a,m}) \quad (3.7)$$

Οι παράμετροι D και F στην παραπάνω εξίσωση αναπαριστούν τις θερμικές απώλειες της δεξαμενής του νερού χρήσης για i) μηδενικό διάστημα μέσης διαφοράς θερμοκρασίας:

$\Delta T_{m,N} = T_{i,m} - T_{a,m} = 0 \Rightarrow D = U_s$ και ii) τη κλίση της εξίσωσης του συντελεστή θερμικών απωλειών (U_s): $F = -\frac{D}{T_{i,m} - T_{a,m}}$, κατά τη διάρκεια της νυχτερινής λειτουργίας της συσκευής αντίστοιχα και δίνονται και οι δύο σε ($^\circ C^{-2} \cdot W \cdot m^{-2}$) [24].

3.2.2 Μεθοδολογία επίλυσης.

Το πρότυπο σύστημα ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού, με βάση πάλι την υπάρχουσα βιβλιογραφία [93], παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1:



Εικόνα 3.1: Τομή πρότυπου ηλιακού θερμικού συστήματος (ICS) με μη συμμετρικούς ανακλαστήρες με καθορισμό παραμέτρων σχεδίασης και με εξωτερικές διαστάσεις συσκευής [92], [93].

Θα είναι [93]:

Παραβολικό τμήμα (AB)

$$0 \leq \psi \leq 58.24^\circ \begin{cases} x = -R_T \cdot \left[1 + \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\sin\psi}{1+\cos\psi} \right] \\ y = \frac{-R_T \cdot \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \cos\psi}{1+\cos\psi} \end{cases} \quad (3.8)$$

Σπειροειδές τμήμα (BC)

$$0 \leq \omega \leq 135^\circ \begin{cases} x = -R_T \cdot \left[\sin\left(\omega - \frac{\pi}{4}\right) - \omega \cos\left(\omega - \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ y = -R_T \cdot \left[\cos\left(\omega - \frac{\pi}{4}\right) + \omega \sin\left(\omega - \frac{\pi}{4}\right) \right] \end{cases} \quad (3.9)$$

Παραβολικό τμήμα (C'A')

$$0 \leq \varphi \leq 57.95^\circ \begin{cases} x = R_T \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{(2\sqrt{2}) \cdot \cos\varphi}{1+\cos\varphi} \right] \\ y = R_T \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin\varphi}{1+\cos\varphi} \right] \end{cases} \quad (3.10)$$

Όπου R_T είναι η ακτίνα της εξωτερικής βάσης της δεξαμενής του νερού.

Ο εξωτερικός όγκος του ICS συστήματος της εικόνας 3.1 (χρειάζεται για τη διαμόρφωση των εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν στη βέλτιστη σχεδίαση του συστήματος) θα είναι:

$$V_{outer} = \left(\frac{0.46+0.867}{2} \cdot 0.6 \right) \cdot W = 0.3981 \cdot 0.904 = 0.360 \text{ m}^3 \quad (3.11)$$

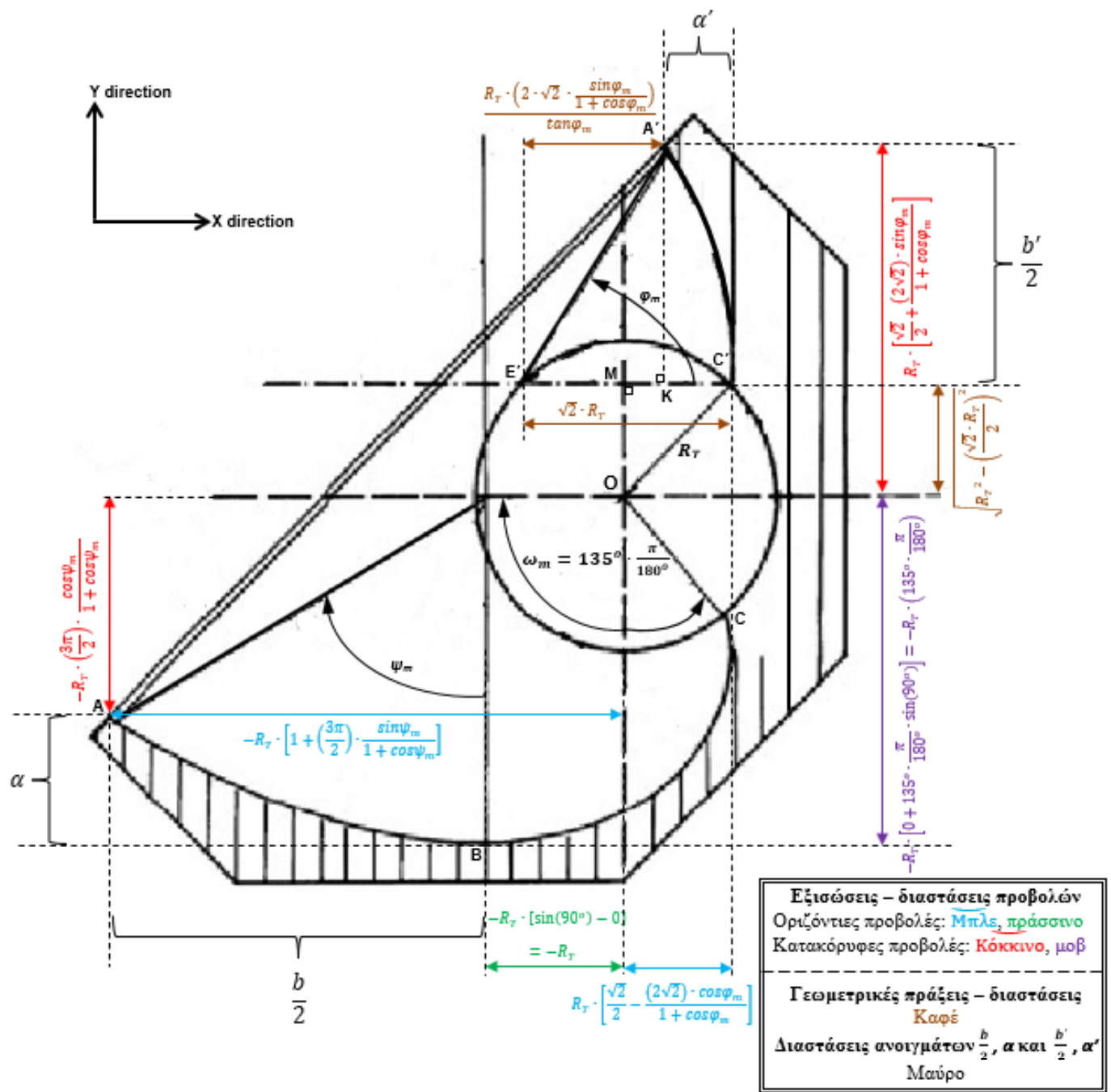
Έχοντας ως αρχή τις παραπάνω εξισώσεις η βέλτιστη σχεδίαση, στη παρούσα εργασία, θα γίνει με χρήση μαθηματικών, με τις παραμέτρους: θερμικές απώλειες, των νέων καμπύλων απόδοσης να «κινούνται» μέσα σε «βελτιωμένα» όρια (boundaries) των αντίστοιχων παραμέτρων του προτύπου συστήματος [59] καθώς επίσης και με τη μαθηματική μοντελοποίηση του συντελεστή οπτικής απόδοσης (εξισώσεις 3.4,3.6) μέσα στην εξίσωση ΜΗΑ (εξίσωση 3.1), βασιζόμενη στον ANR της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στη παραβολική επιφάνεια [93], [122]. Επιπλέον, παραμετροποιούνται τα παραβολικά τμήματα του κατόπτρου με δημιουργία εξειδικευμένων Εξισώσεων για Έλεγχο της Καμπυλότητας και Μήκους κάθε Τόξου Παραβολής (ΕΕΚΜΤΠ) σε συνάρτηση με τις μέγιστες γωνίες των τμημάτων αυτών (Εικόνα 3.1) [123], [124]. Άλλος παράγοντας που θα επηρεάσει τη διαδικασία σχεδίασης αφορά τη μείωση της οικονομικής δαπάνης κατασκευής (Κόστος Παραγωγής: ΚΠ) που αντιστοιχεί σε μείωση της μάζας του συνολικού συστήματος. Ξεκινώντας συνεπώς από τις ήδη υπολογισμένες καμπύλες απόδοσης από παλαιότερα ΠΕΧ και προσπαθώντας τη προσέγγιση καλύτερων αποτελεσμάτων των σημείων κάθε καμπύλης (boundaries) για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του προτύπου, ακολουθείται η αντίστροφη πορεία: η σχεδίαση δηλαδή βέλτιστης γεωμετρίας στον ανακλαστήρα μέσω των ΕΕΚΜΤΠ που ουσιαστικά γίνεται με ελάττωση των μεγίστων γωνιών των παραβολικών τμημάτων, γεγονός που συμβάλλει σε καλύτερη οπτική απόδοση της συσκευής με ταυτόχρονη μείωση κόστους. Το κομμάτι της απόδοσης του νέου συστήματος που περιλαμβάνει τις θερμικές απώλειες του διπλού δοχείου επηρεάζεται, εκτός από τη ποσότητα της μόνωσης και από τη θέση μέσα στη συσκευή (που μοντελοποιείται και αυτή μαθηματικά), της δεξαμενής του νερού, σε σχέση με το πρότυπο ICS – η γεωμετρία της δεξαμενής δε μεταβάλλεται όπως και η αντίστοιχη γεωμετρία του σπειροειδούς τμήματος του κατόπτρου [122]. Η σχεδίαση του νέου κατόπτρου επιτυγχάνεται με μεγιστοποίηση των συνολικών μη γραμμικών μαθηματικών μοντέλων που προκύπτουν (πρόβλημα μη γραμμικής πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης: Nonlinear Multi-Objective Optimization [103], [104], [105], [106], [107]) χρησιμοποιώντας ένα πρωτότυπο υπολογιστικό αλγόριθμο εύρεσης των κοινών βελτίστων τιμών μέσα σε ένα χώρο (σύνολο) που ορίζεται μεταξύ τριών ΑΣ (ΜΗΑ-ΣΘΑ-ΚΠ).

Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα ανωτέρω οι αυξήσεις στην ενεργειακή αλλά και στην οικονομική απόδοση των νέων ηλιακών συσκευών στηρίζονται στη δημιουργία συστημάτων με μικρότερα κάτοπτρα, που είναι «φθηνότερα» και έχουν καλύτερη οπτική απόδοση (επειδή στα κάτοπτρα μπορεί να «μειωθεί» μόνο το παραβολικό τμήμα [122] το οποίο «φέρνει» πιο κοντά στη επιφάνεια ανοίγματος το τόξο παραβολής του ανακλαστήρα) άρα και μεγαλύτερη ΜΗΑ (η τοποθέτηση των κατόπτρων ψηλότερα μπορεί να σημαίνει αύξηση των συντελεστών θερμικών

απωλειών στην εξίσωση MHA αλλά ταυτόχρονα υπάρχει και μείωση της επιφάνειας τους που αναιρεί αυτήν την αύξηση και δε μειώνεται τελικά η απόδοση - σε σχέση με τα αρχικά κάτοπτρα - επειδή οι μονάδες των συντελεστών αυτών είναι $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ και $^{\circ}\text{C}^{-2} \cdot \text{W}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ αντίστοιχα).

Η βελτίωση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των σχεδιαζόμενων συστημάτων οφείλεται κυρίως στην αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης (που συνεπάγεται μικρότερο δείκτη αερίων εκπομπών στο στάδιο χρήσης τους) αλλά και στη μείωση της συνολικής δαπάνης κατασκευής (η οποία οδηγεί σε μικρότερα σε διαστάσεις συστήματα που αυτό σημαίνει μικρότερο περιβαλλοντικό φορτίο στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης σύμφωνα με τη θεωρία της AKZ [9]).

Έχοντας λοιπόν ως αναφορά την εικόνα 3.1 δημιουργείται το διάγραμμα 3.2 που περιέχει τις διαστάσεις των ανοιγμάτων όπως φαίνονται στο διάγραμμα: $\frac{b}{2}$, α και $\frac{b'}{2}$, α' των παραβολικών τμημάτων \overline{AB} και $\overline{C'A'}$ αντίστοιχα του ανακλαστήρα (είναι απαραίτητες οι διαστάσεις αυτές των ανοιγμάτων για τον ορισμό των ΕΕΚΜΤΠ που χρησιμοποιούνται εξάλλου και στην οικονομική δαπάνη κατασκευής του συνολικού συστήματος), καθώς και τις εξισώσεις – διαστάσεις των προβολών ως προς σημείο αναφοράς O (κέντρο XY αξόνων σε ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων στο XY επίπεδο, το οποίο είναι το κέντρο της κυκλικής βάσης της δεξαμενής νερού χρήσης) γι' αυτά τα παραβολικά τμήματα (με χρήση των μεγίστων γωνιών ψ_m, φ_m κάθε τμήματος) και επιπλέον τις αντίστοιχες εξισώσεις – διαστάσεις για το σπειροειδές τμήμα BC του ανακλαστήρα (με χρήση της μεγίστης γωνίας ω_m στο XY επίπεδο – που είναι συγκεκριμένη σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες [93], [59]: $\omega_m = 135^{\circ} \cdot \frac{\pi}{180^{\circ}}$). Επισημαίνεται ότι οι εξισώσεις των προβολών στηρίζονται στην υπάρχουσα βιβλιογραφία (Εξισώσεις 3.8 – 3.10).



Διάγραμμα 3.2: Διαστάσεις ανοιγμάτων $\frac{b}{2}$, α και $\frac{b'}{2}$, α' των παραβολικών τμημάτων \overline{AB} και $\overline{C'A'}$ αντίστοιχα του κατόπτρου καθώς και απεικόνιση των εξισώσεων – διαστάσεων των προβολών και των γεωμετρικών πράξεων, ως προς κέντρο ΧΥ αξόνων O , για σύστημα με ασύμμετρο κάτοπτρο [93].

Οι υπολογισμοί των ανοιγμάτων $\frac{b}{2}$, α και $\frac{b'}{2}$, α' των παραβολικών τμημάτων \overline{AB} και $\overline{C'A'}$ αντίστοιχα με τη μορφή παραμετρικών εξισώσεων (σε συνάρτηση δηλαδή με τις γωνίες ψ_m, φ_m κάθε τμήματος), για σύστημα με ασύμμετρο κάτοπτρο, γίνονται αλγεβρικά (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα πρόσημα των τεταρτημορίων των αξόνων) σύμφωνα με τις παρακάτω μαθηματικές πράξεις:

$$\begin{aligned} \frac{b}{2}(m) &= R_T(m) \cdot \left[1 + \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\sin\psi_m}{1+\cos\psi_m} \right] - R_T(m) \cdot \left[\sin\left(\omega_m - \frac{\pi}{4}\right) - \omega_m \cdot \cos\left(\omega_m - \frac{\pi}{4}\right) \right] = R_T \cdot \\ &\left[1 + \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\sin\psi_m}{1+\cos\psi_m} \right] - R_T(m) \cdot \left[\sin\left(90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) - 135^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \cos\left(90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \right] = R_T(m) \cdot \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \\ &\frac{\sin\psi_m}{1+\cos\psi_m} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \alpha(m) &= R_T(m) \cdot \left[\cos\left(\omega_m - \frac{\pi}{4}\right) + \omega_m \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \sin\left(\omega_m - \frac{\pi}{4}\right) \right] - R_T(m) \cdot \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1+\cos\psi_m} = R_T(m) \cdot \\ &\left[\cos\left(90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) + 135^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \sin\left(90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \right] - R_T(m) \cdot \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1+\cos\psi_m} = R_T(m) \cdot \left[2.356 - \right. \\ &\left. \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1+\cos\psi_m} \right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{b'}{2}(m) &= R_T(m) \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin\varphi_m}{1+\cos\varphi_m} \right] - OM = R_T(m) \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin\varphi_m}{1+\cos\varphi_m} \right] - \\ &\sqrt{R_T(m)^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot R_T(m)}{2} \right)^2} = R_T(m) \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin\varphi_m}{1+\cos\varphi_m} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right] = R_T(m) \cdot \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin\varphi_m}{1+\cos\varphi_m} \right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \alpha'(m) &= E'C' - E'K = \sqrt{2} \cdot R_T(m) - \frac{R_T(m) \cdot \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin\varphi_m}{1+\cos\varphi_m} \right)}{\tan\varphi_m} = R_T(m) \cdot \\ &\left(\sqrt{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos\varphi_m}{1+\cos\varphi_m} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Θα είναι $R_T(m)$ η ακτίνα της βάσης του εξωτερικού δοχείου [93], [59] της δεξαμενής νερού χρήσης και $\pi = 3.14159$ [124].

Η μαθηματική διαδικασία υπολογισμού των ανοιγμάτων $\frac{b}{2}$, α και $\frac{b'}{2}$, α' χρησιμοποιεί γεωμετρικές και τριγωνομετρικές εξισώσεις (χρήση των ορθογωνίων τριγώνων ΟΜC' και Ε'ΚΑ' για τον υπολογισμό των $\frac{b'}{2}$ και α' αντίστοιχα [123], [124]) καθώς και τις εξισώσεις της υπάρχουσας βιβλιογραφίας (Εξισώσεις 3.8 – 3.10: χρήση των οριζόντιων και κάθετων προβολών του παραβολικού τόξου \widetilde{AB} και του σπειροειδούς τόξου BC αντίστοιχα για τον υπολογισμό των $\frac{b}{2}$ και α με αφαίρεση της μεγαλύτερης από τη μικρότερη αντίστοιχη προβολή κάθε τόξου) όπως απεικονίζονται στο διάγραμμα 3.2.

Στη συνέχεια δίνεται το πρόβλημα πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης (εξισώσεις (3.16)) που καθορίζει τη βέλτιστη σχεδίαση του συστήματος που απεικονίζεται στο διάγραμμα 3.2. Η τελική διαμόρφωση (χρήση δείκτη 86 → 990 μαζί με το καθορισμό των πάνω ορίων - boundaries) στις παραμέτρους: θερμικές απώλειες συστήματος κατά μέρα κ' νύχτα, των εξισώσεων (3.16) βασίζεται σε μια ιδιαίτερη τεχνική μείωσης των θερμικών απωλειών του διπλού δοχείου νερού, η οποία ερευνά διαφορετικές περιπτώσεις συνολικής πίεσης στο διάκενο μεταξύ των δύο δοχείων και έχει περιγραφεί αναλυτικά στο ΠΕΧ που αφορά το πρότυπο σύστημα [59]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν οι εξής πέντε περιπτώσεις: 86 ± 2 mbar (at 19.5 ± 1 °C), 245 ± 6 mbar (at 24.0 ± 1 °C), 490 ± 11 mbar (at 23.0 ± 1 °C), 670 ± 16 mbar (at 22.0 ± 1 °C), 790 ± 18 mbar (at 20.0 ± 1 °C) και 990 ± 23 mbar (at 24 ± 1 °C).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \max[n_d(\psi_m, \varphi_m, B_{86 \rightarrow 990}, C_{86 \rightarrow 990}, z)] \\
 \max[-(U_S(D_{86 \rightarrow 990}, F_{86 \rightarrow 990}, z))] \\
 \max[-(C_p(\psi_m, \varphi_m, z))] \\
 0^\circ \leq \psi_m \leq 90^\circ \\
 0^\circ \leq \varphi_m \leq 90^\circ \\
 0 \leq B_{86} \leq 1.843 \\
 0 \leq C_{86} \leq 2.496 \\
 0 \leq B_{245} \leq 1.719 \\
 0 \leq C_{245} \leq 2.392 \\
 0 \leq B_{490} \leq 1.88 \\
 0 \leq C_{490} \leq 0.09 \\
 0 \leq B_{670} \leq 1.52 \\
 0 \leq C_{670} \leq 3.781 \\
 0 \leq B_{990} \leq 1.81 \\
 0 \leq C_{990} \leq 0.6 \\
 0 \leq D_{86} \leq 1.128 \\
 0 \leq F_{86} \leq 0.0066 \\
 0 \leq D_{245} \leq 1.383 \\
 0 \leq F_{245} \leq 0.0025 \\
 0 \leq D_{490} \leq 1.463 \\
 0 \leq F_{490} \leq 0.0027 \\
 0 \leq D_{670} \leq 1.537 \\
 0 \leq F_{670} \leq 0.0016 \\
 0 \leq D_{990} \leq 1.628 \\
 0 \leq F_{990} \leq 0.0007 \\
 0.3 \leq 0.021 \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + 0.0071 \cdot m_t \leq 0.36 \\
 0 \leq \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \cdot \left(0.199 - 0.18 \cdot \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right) + \left[2.356 - \frac{\left(\frac{3\pi}{2} \right) \cos \psi_m}{1 + \cos \psi_m} \right] \cdot \left\{ 0.033 - 0.0225 \cdot \left[2.356 - \frac{\left(\frac{3\pi}{2} \right) \cos \psi_m}{1 + \cos \psi_m} \right] \right\} \leq 0.067 \\
 1 \leq z \leq e \\
 0.74 \leq \frac{Q_{THE}/Year(\psi_m, \varphi_m, B_{86 \rightarrow 990}, C_{86 \rightarrow 990}, D_{86 \rightarrow 990}, F_{86 \rightarrow 990}, z)}{10^6} \leq f
 \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι δύο πρώτες ΑΣ αποτελούν τη ΜΗΑ καθώς και το ΣΘΑ της δεξαμενής του νερού χρήσης κατά τη διάρκεια της νύχτας και η τρίτη ΑΣ ορίζει το ΚΠ για το σύστημα του διαγράμματος 3.2.

Οι βασικοί παράμετροι ($z, \psi_m, \varphi_m, B_{86 \rightarrow 990}, C_{86 \rightarrow 990}, D_{86 \rightarrow 990}, F_{86 \rightarrow 990}$) των εξισώσεων (3.16) όπως επίσης και οι ποσότητες $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m), m_t$ θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

Η εξίσωση της ΜΗΑ αναφέρεται, στη γενική της μορφή, στην εξίσωση (3.1) και επεξηγείται με περισσότερες λεπτομέρειες στη διεθνή βιβλιογραφία [24], [122], [45], [93], [59]. Ο υπολογισμός των παραμέτρων της, στη παρούσα εργασία, δεν θα γίνει μέσω πειραματικής μελέτης αλλά σύμφωνα με το πολυστοχαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (3.16). Οπότε, θεωρώντας ως (z) τον αριθμό των συστημάτων που μπορούν να εγκατασταθούν σε μία οικία και λαμβάνοντας υπόψη το ANR [100], [101], [121], [93], [122] για σύστημα με ασύμμετρο κάτοπτρο, η πρώτη ΑΣ του προβλήματος βελτιστοποίησης θα πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$n_d(\psi_m, \varphi_m, B_{86 \rightarrow 990}, C_{86 \rightarrow 990}, z) = z \cdot \left\{ A_{86 \rightarrow 990}(\psi_m, \varphi_m) + B_{86 \rightarrow 990} \cdot \frac{\Delta T_{m,D}}{G_m} + C_{86 \rightarrow 990} \cdot \left(\frac{\Delta T_{m,D}}{G_m} \right)^2 \right\} = z \cdot \left\{ \alpha'_{86 \rightarrow 990} \cdot \left(\underbrace{\tau \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot \left[\frac{1}{4} \left[\frac{3\pi}{8} + \frac{\sqrt{2} \cdot [1 - \cos \psi_m]^{\frac{1}{2}} - 1 + \cos \psi_m}{1 + \cos \psi_m} + \ln \frac{\sin \psi_m + \sqrt{2} \cdot [1 + \cos \psi_m]^{\frac{1}{2}}}{1 + \cos \psi_m} \right] + \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} \left[\frac{\sqrt{2} \cdot [1 - \cos \varphi_m]^{\frac{1}{2}} - 1 + \cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} + \ln \frac{\sin \varphi_m + \sqrt{2} \cdot [1 + \cos \varphi_m]^{\frac{1}{2}}}{1 + \cos \varphi_m} \right]} \right]}_{n_0(\psi_m, \varphi_m) : \text{Οπτική Απόδοση (OA) συστήματος ICS}} \cdot \gamma \right) + B_{86 \rightarrow 990} \cdot \frac{\Delta T_{m,D}}{G_m} + C_{86 \rightarrow 990} \cdot \left(\frac{\Delta T_{m,D}}{G_m} \right)^2 \right\} \quad (3.17)$$

Η παράμετρος (z) είναι μεταβλητή απόφασης του προβλήματος πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης, συνεπώς υπολογίζεται μέσω των εξισώσεων (3.16). Ο συντελεστής $\alpha'_{86 \rightarrow 990}$ συσχετίζει τη παράμετρο $A_{86 \rightarrow 990}(\psi_m, \varphi_m)$ με την ΟΑ: $n_0(\psi_m, \varphi_m)$ (με βάση την εξίσωση (3.4)) και προκύπτει από τα ΠΕΧ των εργασιών των Souliotis et al. [59], [93]. Επιπροσθέτως και οι συντελεστές $\tau, \alpha_r, \rho_r, \gamma$ στην εξίσωση ΟΑ του ICS συστήματος θα δίνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία [93], [122], [100], [101], [121]. Οι μέγιστες γωνίες ψ_m, φ_m των παραβολικών τμημάτων \overline{AB} και $\overline{C'A'}$ αντίστοιχα του ανακλαστήρα - καθορίζονται στο διάγραμμα 3.2 και απεικονίζονται στην εξίσωση (3.17) - αποτελούν και αυτές μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης, με $\varphi_m = 0.918 \cdot \psi_m$ [93], οι οποίες υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (3.16) σε ακτίνια. Αντίθετα, η μέγιστη γωνία ω_m του σπειροειδούς τμήματος BC (διάγραμμα 3.2) δεν είναι μεταβλητή απόφαση του προβλήματος των εξισώσεων (3.16) και παίρνει πάντα μία σταθερή τιμή ($\omega_m = 135^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}$: θα είναι $\pi = 3.14159$ έτσι ώστε και η γωνία ω_m να υπολογίζεται σε ακτίνια [93]). Οι παράμετροι της εξίσωσης (3.17) $B_{86 \rightarrow 990}$ και $C_{86 \rightarrow 990}$ αντίστοιχα (θερμικές απώλειες συστήματος κατά την ημερήσια λειτουργία) είναι επίσης μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι μονάδες τους είναι ($^\circ C^{-1} \cdot W \cdot m^{-2}$) και ($^\circ C^{-2} \cdot W^2 \cdot m^{-4}$) για κάθε παράμετρο [122] και τα άνω όρια τους στις εξισώσεις (3.16) προκύπτουν βάσει της ίδιας μελέτης των Souliotis et al.

που αναφέρθηκε πριν [59]. Στην ίδια ΑΣ ο συντελεστής $\frac{\Delta T_{m,D}}{G_m}$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$) μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής (Κεφάλαιο 3.2.1). Συνεπώς το αποτέλεσμα της πρώτης ΑΣ θα είναι ένας πίνακας (array) με στοιχεία τις βέλτιστες τιμές της ΜΗΑ για χρονικό διάστημα από 6:30 το πρωί μέχρι 6:30 το απόγευμα του υπό σχεδίαση ICS συστήματος.

Με όμοιο τρόπο η δεύτερη ΑΣ του προβλήματος βελτιστοποίησης (ΣΘΑ) αναφέρεται, στη γενική της μορφή, στο κεφάλαιο 3.2.1 και πιο αναλυτικά σε διάφορες εργασίες [24], [122], [25],[45], [93], [59]. Όπως και στη περίπτωση της εξίσωσης (3.17) θα υπολογιστεί μαθηματικά μέσω του προβλήματος βελτιστοποίησης (3.16). Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των υπό σχεδίαση συστημάτων (z), η συνάρτηση αυτή γίνεται:

$$U_S(D_{86 \rightarrow 990}, F_{86 \rightarrow 990}, z) = z \cdot [D_{86 \rightarrow 990} + F_{86 \rightarrow 990} \cdot (T_{i,m} - T_{a,m})] \quad (3.18)$$

Όπου πάλι η παράμετρος (z) είναι μεταβλητή απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης, όπως επίσης και οι παράμετροι $D_{86 \rightarrow 990}$ και $F_{86 \rightarrow 990}$ (θερμικές απώλειες δεξαμενής κατά τη νύχτα) των οποίων οι μονάδες είναι ($^{\circ}\text{C}^{-2} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) και για τις δύο μεταβλητές απόφασης αντίστοιχα (Κεφάλαιο 3.2.1) και τα άνω όρια τους στις εξισώσεις (3.16) προκύπτουν πάλι από τη μελέτη των Souliotis et al. [59]. Οι συντελεστές $T_{i,m}$ και $T_{a,m}$ ορίζονται στο κεφάλαιο 3.2.1 και στη διεθνή βιβλιογραφία [24], [122], [25],[45], [93]. Το αποτέλεσμα της συνάρτησης του ΣΘΑ θα είναι πάλι ένας πίνακας (array) με στοιχεία τις βέλτιστες τιμές (σε $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) του συντελεστή αυτού για χρονικό διάστημα από 6:30 το απόγευμα μέχρι 6:30 το πρωί της επόμενης ημέρας.

Η τρίτη ΑΣ (δηλαδή η συνάρτηση του ΚΠ) κατασκευάζεται από το μηδέν με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα υλικά (πυκνότητες), τα μοναδιαία κόστη (Ευρώ / kg ή Ευρώ / m^2) και τις αρχικές μάζες (προτύπου συστήματος - Πίνακας 3.1, κεφάλαιο 3.1) των υλικών της ICS συσκευής [108]. Η συνάρτηση ΚΠ (για μία λειτουργική μονάδα συστήματος ICS) θα περιέχει τις μεταβλητές απόφασης ψ_m, φ_m ($\varphi_m = 0.918 \cdot \psi_m$ [93]) δηλαδή τις μέγιστες γωνίες των παραβολικών τμημάτων $\overline{AB}, \overline{C'A'}$ και τη μέγιστη γωνία $\omega_m = 135^{\circ} \cdot \frac{\pi}{180^{\circ}}$ του σπειροειδούς τμήματος BC αντίστοιχα του κατόπτρου (διάγραμμα 3.2):

$$C_P(\psi_m, \varphi_m) = C_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + C_t + C_I(\psi_m, \varphi_m) + C_g(\psi_m, \varphi_m) + C_{OC}(\psi_m, \varphi_m) + C_{Tf}(\psi_m, \varphi_m) \quad (3.19)$$

Όπου $C_P(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το συνολικό ΚΠ του συστήματος ICS, $C_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος του υλικού του παραβολικού ανακλαστήρα, C_t είναι το κόστος του υλικού της δεξαμενής του νερού, $C_I(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος του υλικού της μόνωσης, $C_g(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος της διάφανης επιφάνειας απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, $C_{OC}(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος του εξωτερικού καλύμματος και $C_{Tf}(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος κατασκευής του συγκεκριμένου συστήματος (το κόστος κατασκευής σχετίζεται με την ενέργεια που δαπανάται για τη κατασκευή του στη βιομηχανία και επιπλέον σχετίζεται με τη μισθοδοσία του προσωπικού της εταιρείας που το παράγει [108], [122]). Το ΚΠ του συστήματος ICS εκφράζεται σε Ευρώ και

παίρνει μία τιμή για κάθε νέο σχεδιαζόμενο σύστημα (δεν είναι πίνακας δηλαδή όπως στην περίπτωση των δύο προηγούμενων ΑΣ). Η διαδικασία υπολογισμού της είναι:

Αρχικά το κόστος $C_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ θα δίνεται από την εξίσωση:

$$C_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) = C_{iCPC} \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) \quad (3.20)$$

Όπου C_{iCPC} το κόστος του υλικού του παραβολικού ανακλαστήρα (Ευρώ / kg) και $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ (σε kg) θα είναι η μάζα του παραβολικού ανακλαστήρα. Η μάζα του ανακλαστήρα δίνεται από την εξίσωση:

$$m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) = V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) \cdot d_{CPC} \quad (3.21)$$

Στη παραπάνω εξίσωση $V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ (σε m³) είναι ο όγκος του ανακλαστήρα και d_{CPC} (kg / m³) είναι η πυκνότητα του υλικού του ανακλαστήρα. Στη συνέχεια παρατίθεται ο τρόπος που προκύπτει ο όγκος $V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ σε συνάρτηση με τις γωνίες ψ_m και φ_m αντίστοιχα.

Πρώτα απ'όλα θα υπολογιστεί το συνολικό μήκος της καμπύλης του παραβολικού σχήματος του ανακλαστήρα. Τα παραβολικά τμήματα \overline{AB} και $\overline{C'A'}$ του ανακλαστήρα (διάγραμμα 3.2) θα δίνονται από τις παρακάτω ΕΕΚΜΤΠ (μήκη τόξων παραβολής σε συνάρτηση με τα ανοίγματα $\frac{b}{2}, \alpha$ και $\frac{b'}{2}, \alpha'$ αντίστοιχα) [123]:

$$\overline{AB} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{b^2 + 16a^2} + \frac{b^2}{8a} \cdot \ln \left(\frac{4a + \sqrt{b^2 + 16a^2}}{b} \right) \right] \quad (3.22)$$

$$\overline{C'A'} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{b'^2 + 16a'^2} + \frac{b'^2}{8a'} \cdot \ln \left(\frac{4a' + \sqrt{b'^2 + 16a'^2}}{b'} \right) \right] \quad (3.23)$$

Όπου τα $\frac{b}{2} \rightarrow b = 2 \cdot (3.12)$, $\alpha = (3.13)$ και $\frac{b'}{2} \rightarrow b' = 2 \cdot (3.14)$, $\alpha' = (3.15)$ έχουν ήδη υπολογιστεί στις εξισώσεις (3.12) – (3.15). Με αυτό τον τρόπο σχεδιάζεται η βέλτιστη γεωμετρία του κατόπτρου.

Οι βέλτιστες διαστάσεις του νέου κατόπτρου για τα παραβολικά τμήματα \overline{AB} και $\overline{C'A'}$ αντίστοιχα του διαγράμματος 3.2 προκύπτουν αντιστοιχώντας τις εξισώσεις (3.12) – (3.15) στις παραπάνω εξισώσεις μήκους τόξου παραβολής ως εξής:

$$\overline{AB} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(R_T \cdot \frac{3\pi \cdot \sin\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right)^2 + 16 \cdot \left(R_T \cdot \left[2.356 - \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right] \right)^2} + \frac{\left(R_T \cdot \frac{3\pi \cdot \sin\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right)^2}{8 \cdot R_T \cdot \left[2.356 - \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right]} \cdot \ln \left(\frac{\left\{ 4 \cdot R_T \cdot \left[2.356 - \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right] \right\} + \sqrt{\left(R_T \cdot \frac{3\pi \cdot \sin\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right)^2 + 16 \cdot \left(R_T \cdot \left[2.356 - \left(\frac{3\pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m} \right] \right)^2}}{R_T \cdot \frac{3\pi \cdot \sin\psi_m}{1 + \cos\psi_m}} \right) \right] \quad (3.24)$$

$$\overline{C'A'} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(R_T \cdot \left(4 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right)^2 + 16 \cdot \left(R_T \cdot \left(\sqrt{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right) \right)^2}{\left(R_T \cdot \left(4 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right) \right)^2} + \frac{\left(R_T \cdot \left(\sqrt{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right) \right)^2}{8 \cdot R_T \cdot \left(\sqrt{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right)} \cdot \ln \left(\frac{\left[4 \cdot R_T \cdot \left(\sqrt{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right) \right] + \sqrt{\left(R_T \cdot \left(4 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right)^2 + 16 \cdot \left(R_T \cdot \left(\sqrt{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right) \right)^2}}{R_T \cdot \left(4 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right)} \right)}{R_T \cdot \left(4 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m} \right)} \right] \quad (3.25)$$

Το σπειροειδές μήκος BC (διάγραμμα 3.2) θα δίνεται από την εξίσωση (μήκος σπειροειδούς καμπύλης) [124]:

$$BC = \frac{R_T(m)}{2} \cdot \omega_m^2 = 2.77 \cdot R_T(m) \quad (3.26)$$

Συνεπώς, οι δύο πρώτες εξισώσεις ((3.24) και (3.25)) θα αποτελούν τις ΕΕΚΜΤΠ των τμημάτων \overline{AB} , $\overline{C'A'}$ σε συνάρτηση με τις μέγιστες γωνίες ψ_m , φ_m αντίστοιχα των παραβολικών αυτών τμημάτων (διάγραμμα 3.2).

Το συνολικό μήκος της καμπύλης του παραβολικού ανακλαστήρα ABCC'A' (πλάτος κατόπτρου $W_{CPC}(m)$ στο XY επίπεδο) προκύπτει προσθέτωντας τις τρεις προηγούμενες εξισώσεις. Συνεπώς θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$W_{CPC}(m) = AA' = \overline{AB} + BC + \overline{C'A'} \quad (3.27)$$

Με βάση τα παραπάνω ο όγκος του παραβολικού ανακλαστήρα $V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ είναι:

$$V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) = W_{CPC}(m) \cdot l(m) \cdot 0.002 = (\overline{AB} + BC + \overline{C'A'}) \cdot l \cdot 0.002 \quad (3.28)$$

Ο συντελεστής $l(m)$ είναι το μήκος του κατόπτρου (αντιστοιχεί στο μήκος της δεξαμενής του νερού κατά τον άξονα Z – το XY επίπεδο καθορίζεται στο διάγραμμα 3.2) και 0.002 μέτρα είναι το πάχος της παραβολικής επιφάνειας [93].

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.24), (3.25) και (3.26) αρχικά στην εξίσωση (3.27) και έπειτα την (3.27) στην εξίσωση (3.28) προκύπτει ο όγκος $V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$ ο οποίος δίνει την ακόλουθη τελική μορφή στην εξίσωση (3.20):

$$C_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) = C_{iCPC} \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) = C_{iCPC} \cdot V_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) \cdot d_{CPC} = C_{iCPC} \cdot (\overline{AB} + BC + \overline{C'A'}) \cdot l \cdot 0.002 \cdot d_{CPC} \quad (3.29)$$

Το κόστος της δεξαμενής νερού C_t θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_t = C_{it} \cdot m_t \quad (3.30)$$

Θα είναι C_{it} το κόστος του υλικού της δεξαμενής του νερού (Ευρώ / kg) και m_t (kg) θα είναι η μάζα της δεξαμενής του νερού.

Η μάζα της δεξαμενής του νερού δίνεται από την εξίσωση:

$$m_t = V_t \cdot d_t \quad (3.31)$$

Όπου V_t (m^3) είναι ο όγκος της δεξαμενής του νερού και d_t (kg / m^3) είναι η πυκνότητα του υλικού της δεξαμενής του νερού.

Ο όγκος της δεξαμενής του νερού V_t θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_t = V_{base-t}(1) + V_{body-t}(1) + V_{base-t}(2) + V_{body-t}(2) \quad (3.32)$$

Όπου $V_{base-t}(1)$ και $V_{base-t}(2)$ είναι οι όγκοι των δύο ομόκεντρων κυκλικών βάσεων της εξωτερικής και εσωτερικής δεξαμενής του νερού αντίστοιχα [93] και $V_{body-t}(1)$ και $V_{body-t}(2)$ είναι οι όγκοι των κυρίων σωμάτων των δύο ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων της δεξαμενής νερού χρήσης [93].

Οι όγκοι $V_{base-t}(1)$ και $V_{base-t}(2)$ των δύο κυκλικών βάσεων της δεξαμενής του νερού προκύπτουν από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{base-t}(1) + V_{base-t}(2) = (\pi \cdot R_T^2(m) \cdot 0.002 \cdot 2) + (\pi \cdot R'_T{}^2(m) \cdot 0.002 \cdot 2) \quad (3.33)$$

Στην εξίσωση (3.33) $R_T(m)$ και $R'_T(m)$ είναι η ακτίνα των βάσεων των δύο ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων και 0.002 μέτρα είναι το αντίστοιχο πάχος της επιφάνειας κάθε δοχείου [93].

Αντίστοιχα οι όγκοι $V_{body-t}(1)$ και $V_{body-t}(2)$ των κυρίων σωμάτων των δύο ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων προκύπτουν από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{body-t}(1) + V_{body-t}(2) = (2 \cdot \pi \cdot R_T(m) \cdot l \cdot 0.002) + (2 \cdot \pi \cdot R'_T(m) \cdot l' \cdot 0.002) \quad (3.34)$$

Όπου πάλι $R_T(m)$ και $R'_T(m)$ είναι η ακτίνα των βάσεων των δύο ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων, l και l' είναι τα αντίστοιχα μήκη των δύο δοχείων (κατά τον άξονα Z) και 0.002 είναι το πάχος της επιφάνειας κάθε δοχείου [93]. Αντικαθιστώντας τις (3.33) και (3.34) στις (3.30) και (3.31) διαμορφώνεται το κόστος δεξαμενής νερού C_t ως:

$$C_t = C_{it} \cdot \overbrace{\left(V_{base-t}(1) + V_{body-t}(1) + V_{base-t}(2) + V_{body-t}(2) \right)}^{m_t} \cdot d_t \quad (3.35)$$

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 για τη κατασκευή του συστήματος του διαγράμματος 3.2 χρησιμοποιούνται 12.02 kg υλικού μόνωσης [93]. Συνεπώς προκύπτει:

$$C_I(\psi_m, \varphi_m) = C_{il} \cdot 0.3349 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) \quad (3.36)$$

Όπου C_{il} είναι το κόστος του υλικού της μόνωσης σε Ευρώ / kg και τα $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$, m_t καθορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Ο συντελεστής 0.3349 είναι αδιάστατος αριθμός.

Όμοια για τη κατασκευή του συστήματος του διαγράμματος 3.2 χρησιμοποιούνται 0.827 m^2 διάφανης επιφάνειας [93]. Άρα είναι:

$$C_g(\psi_m, \varphi_m) = C_{ig} \cdot 0.023 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) \quad (3.37)$$

Θα είναι C_{ig} το κόστος της διάφανης επιφάνειας σε Ευρώ / m^2 και οι μάζες $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$, m_t ορίστηκαν στις εξισώσεις (3.21), (3.31) αντίστοιχα. Ο συντελεστής 0.023 συσχετίζει τις διαστάσεις της επιφάνειας απορρόφησης με τη μάζα του συστήματος, συνεπώς έχει μονάδες. Είναι δηλαδή: 0.023 m^2 / kg .

Με όμοιο τρόπο για τη κατασκευή του συστήματος του διαγράμματος 3.2 χρησιμοποιούνται 44.47 kg υλικού εξωτερικού καλύμματος [93]. Οπότε το κόστος $C_{OC}(\psi_m, \varphi_m)$ θα είναι:

$$C_{OC}(\psi_m, \varphi_m) = C_{iOC} \cdot 1.239 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) \quad (3.38)$$

Όπου C_{iOC} είναι το κόστος του υλικού του εξωτερικού καλύμματος σε Ευρώ / kg και τα $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$, m_t είναι ίδια με πριν. Ο συντελεστής 1.239 είναι αδιάστατος αριθμός.

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το συνολικό κόστος κατασκευής $C_{Tf}(\psi_m, \varphi_m)$ του ICS. Το κόστος είναι:

$$C_{Tf}(\psi_m, \varphi_m) = C_f(\psi_m, \varphi_m) + C_s(\psi_m, \varphi_m) \quad (3.39)$$

Στη παραπάνω εξίσωση $C_f(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος που δαπανάται για την κατασκευή του συστήματος του διαγράμματος 3.2 και $C_s(\psi_m, \varphi_m)$ είναι το κόστος μισθοδοσίας για την κατασκευή του συγκεκριμένου συστήματος. Επειδή δεν υπάρχουν στοιχεία σχετικά με τα κόστη αυτά, θα προσεγγιστούν από τα αντίστοιχα κόστη του συστήματος *alpha III* (Κεφάλαιο 2.1) [108].

Αρχικά το κόστος $C_f(\psi_m, \varphi_m)$ προκύπτει [93], [122]:

$$C_f(\psi_m, \varphi_m) = 0.015 \cdot [(m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) + [0.3349 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [0.023 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [1.239 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)]] = 0.0389 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) \quad (3.40)$$

Όπου τα $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)$, m_t ορίστηκαν πριν.

Και το κόστος μισθοδοσίας $C_s(\psi_m, \varphi_m)$ είναι [108], [122]:

$$C_s = 1.284 \cdot [(m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) + [0.3349 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [0.023 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [1.239 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)]] = 3.3344 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) \quad (3.41)$$

Οπότε τελικά το συνολικό κόστος κατασκευής του συστήματος του διαγράμματος 3.2, $C_{Tf}(\psi_m, \varphi_m)$ θα δίνεται από την εξίσωση:

$$C_{Tf}(\psi_m, \varphi_m) = C_f(\psi_m, \varphi_m) + C_s(\psi_m, \varphi_m) = 3.3733 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t) \quad (3.42)$$

Ο συντελεστής 3.3733 συσχετίζει το κόστος του συστήματος ICS με τη μάζα του, άρα έχει και αυτός μονάδες. Είναι δηλαδή: 3.3733 Ευρώ / kg.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.29), (3.30), (3.36), (3.37), (3.38) και (3.42) στην (3.20) και λαβαίνοντας υπόψιν τον αριθμό των υπό σχεδίαση συστημάτων (z) η τελική εξίσωση ΚΠ είναι η ακόλουθη:

$$C_p(\psi_m, \varphi_m, z) = z \cdot \{C_{iCPC} \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + C_{it} \cdot m_t + [C_{il} \cdot 0.3349 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [C_{ig} \cdot 0.023 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [C_{iOC} \cdot 1.239 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)] + [3.3733 \cdot (m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + m_t)]\} = z \cdot \{m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) \cdot [C_{iCPC} + (C_{il} \cdot 0.3349) + (C_{ig} \cdot 0.023) + (C_{iOC} \cdot 1.239) + 3.3733] + m_t \cdot [C_{it} + (C_{il} \cdot 0.3349) + (C_{ig} \cdot 0.023) + (C_{iOC} \cdot 1.239) + 3.3733]\} \quad (3.43)$$

Ο εικοστός τρίτος περιορισμός των εξισώσεων (3.16) ($0.31 \leq 0.021 \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + 0.0071 \cdot m_t \leq 0.36$) είναι αποτέλεσμα της υπόθεσης ότι ο όγκος του συνδυασμού: μόνωση + αέρας μεταξύ κατόπτρου – δεξαμενής και διάφανης επιφάνειας του νέου συστήματος, πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο όγκο του πρότυπου συστήματος (έτσι καθορίζει έμμεσα τη θέση, μέσα στο σχεδιαζόμενο σύστημα, της δεξαμενής νερού χρήσης και περιορίζει τις ελάχιστες τιμές που μπορούν να λάβουν οι γωνίες ψ_m, φ_m). Δηλαδή:

$$\begin{aligned} V_{\mu-new} + V_{\alpha\epsilon\rho\alpha-new} &\geq V_{\mu-old} + V_{\alpha\epsilon\rho\alpha-old} \\ \Rightarrow \frac{58.45 \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)}{d_{CPC}} + \frac{58.45 \cdot m_t}{d_t} - \frac{0.023 \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)}{d_g} - \frac{0.023 \cdot m_t}{d_g} - \frac{m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)}{d_{CPC}} - \frac{m_t}{d_t} \\ - \frac{1.239 \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m)}{d_{OC}} - \frac{1.239 \cdot m_t}{d_{OC}} &\geq 0.36 - V_{\mu,g-old} - V_{\mu,CPC-old} - V_{\mu,t-old} - V_{\mu,OC-old} \Rightarrow \\ 0.021 \cdot m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m) + 0.0071 \cdot m_t &\geq 0.3 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Όπου $V_{\mu-new}, V_{\alpha\epsilon\rho\alpha-new}$ είναι οι όγκοι της μόνωσης και του αέρα μεταξύ κατόπτρου – δεξαμενής και διάφανης επιφάνειας αντίστοιχα του νέου συστήματος και $V_{\mu-old}, V_{\alpha\epsilon\rho\alpha-old}$ είναι οι αντίστοιχοι όγκοι του πρότυπου συστήματος (με $V_{\mu,g-old}, V_{\mu,CPC-old}, V_{\mu,t-old}$ και $V_{\mu,OC-old}$ για κάθε τμήμα του προτύπου) - όλοι οι όγκοι υπολογίζονται σε m^3 . Επίσης $d_{CPC}, d_t, d_g, d_{OC}$ (σε kg / m^3) είναι η πυκνότητες του κατόπτρου, της δεξαμενής, της διάφανης επιφάνειας και του εξωτερικού καλύμματος του ICS συστήματος και επιπροσθέτως οι μάζες $m_{CPC}(\psi_m, \varphi_m), m_t$ ορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 1.1 οι θερμικές απώλειες του ICS συστήματος εξαρτώνται από τη μόνωση καθώς και από το θερμό αέρα μεταξύ του συνδυασμού: κάτοπτρο – δεξαμενή και διάφανη επιφάνεια. Οι αριθμητικές ποσότητες στην εξίσωση (3.44) (που αναφέρονται στο πρότυπο σύστημα: $V_{\mu-old} + V_{\alpha\epsilon\rho\alpha-old} \rightarrow 0.36 - V_{\mu,g-old} - V_{\mu,CPC-old} - V_{\mu,t-old} - V_{\mu,OC-old}$) υπολογίζονται με τη βοήθεια του πίνακα 3.1 (Κεφάλαιο 3.1) καθώς και της εξίσωσης (3.11).

Ο εικοστός τέταρτος περιορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης θα αναλυθεί στις τελευταίες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου γιατί πρώτα πρέπει να αναφερθούν κάποιοι συντελεστές που εμπλέκονται στις διαστάσεις των επί μέρους τμημάτων του συστήματος ICS. Αυτό γίνεται για λόγους ευκολίας στις επεξηγήσεις των συντελεστών αυτών.

Οι δύο τελευταίοι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης των εξισώσεων (3.16) προκύπτουν με ενεργειακή μελέτη πάνω στο συγκεκριμένο ICS σύστημα [125].

Ειδικότερα ο τελευταίος περιορισμός εκφράζει τη μέγιστη παραγόμενη θερμική ενέργεια / Έτος (εξίσωση (3.16)):

$$0.74 \leq \frac{Q_{THE}/Year^{(\psi_m, \varphi_m, B_{86 \rightarrow 990}, C_{86 \rightarrow 990}, D_{86 \rightarrow 990}, F_{86 \rightarrow 990}, Z)}}{10^6} \leq f \quad (3.45)$$

Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ενέργεια (Wh/Year), στον παραπάνω περιορισμό, διαιρείται με τη τιμή 10^6 για να δίνεται το τελικό αποτέλεσμα σε (MWh/Year), (άνω και κάτω όριο του περιορισμού δίνονται στην ίδια μονάδα).

Οι συντελεστές e και f μεταβάλλονται ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων της οικίας και παίρνουν τιμές (για μέγιστο αριθμό συστημάτων και μέγιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια για αυτούς που τα χρησιμοποιούν) μέχρι αριθμό ενοίκων ίσο με 50 (μία μέση πολυκατοικία) [125]. Επίσης τα συγκεκριμένα όρια σχετίζονται και με τη χωρητικότητα της δεξαμενής του νερού αλλά και με τη κλιματική ζώνη στην οποία θα εγκατασταθεί το σύστημα (ή τα συστήματα) ICS. Συνεπώς το άνω όριο του μέγιστου αριθμού συστημάτων (προτελευταίος περιορισμός) είναι μικρότερο για μεγαλύτερες δεξαμενές (150 lt, 200 lt) και νοτιότερες περιοχές και μεγαλύτερο για μικρότερες δεξαμενές (48 lt, 96 lt, 100 lt) και βορειότερες περιοχές. Ενώ από την άλλη το άνω όριο της μέγιστης παραγόμενης ενέργειας (τελευταίος περιορισμός) είναι μεγαλύτερο για νοτιότερες περιοχές και μικρότερο για βορειότερες περιοχές.

Ο αλγόριθμος του προβλήματος εκτελείται μέσα σε ένα λογισμικό πρόγραμμα το οποίο υλοποιείται σε περιβάλλον *Visual Basic* και *Fortran* (Σχήματα 3.1, 3.2).

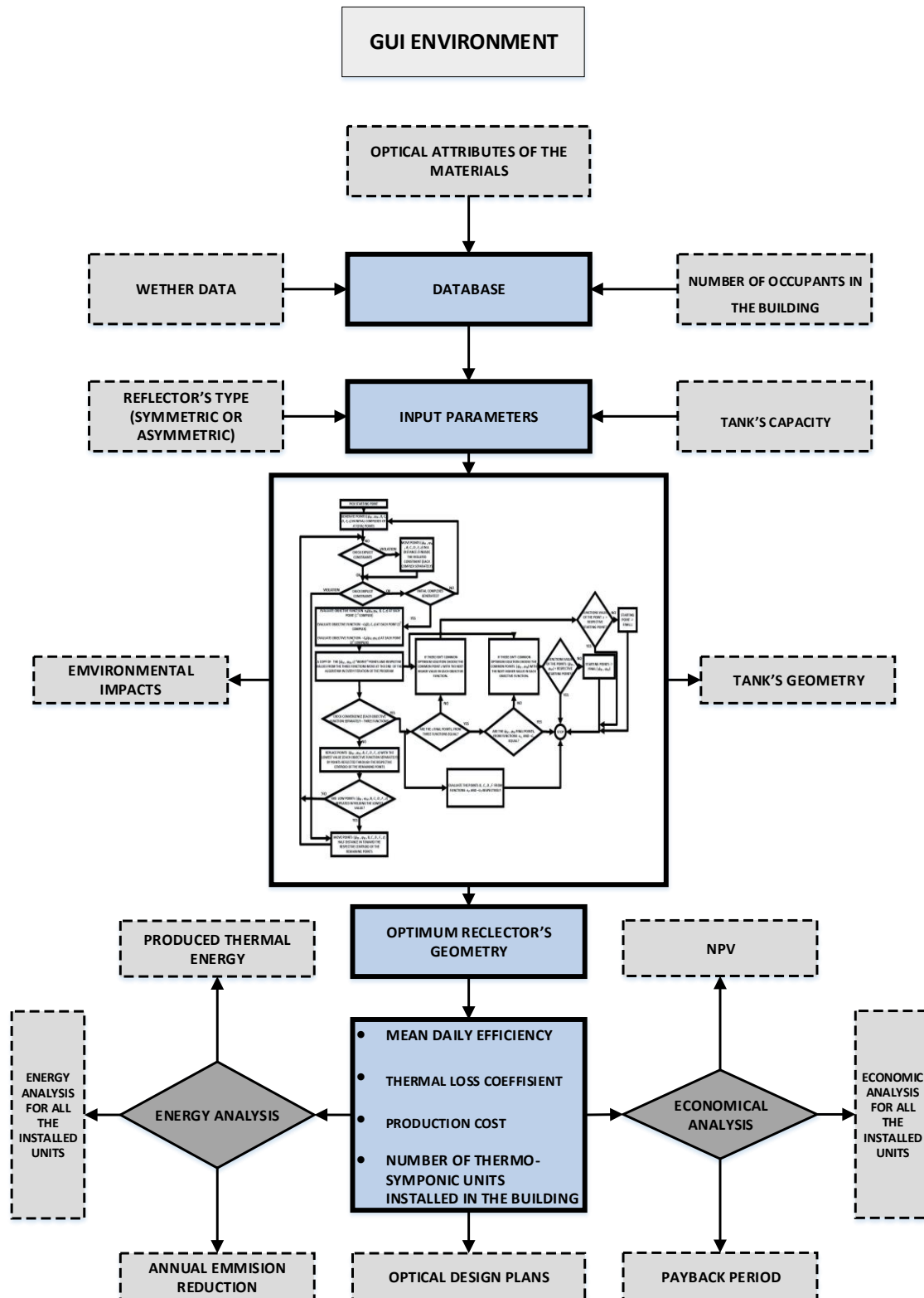
Το πρόγραμμα υποστηρίζει γραφικό περιβάλλον “windows” (Graphical User Interface: **GUI**) έτσι ώστε να είναι φιλικό στον χρήστη (Σχήμα 3.1). Στην είσοδο του GUI περιβάλλοντος υπάρχει μία βάση δεδομένων με διαφορετικά υλικά (πυκνότητες κάθε υλικού και μοναδιαία κόστη) για την επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, το παραβολικό ανακλαστήρα, τη δεξαμενή του νερού, τη μόνωση και το εξωτερικό κάλυμμα. Επίσης, στην ίδια βάση δεδομένων, περιέχονται κλιματολογικά δεδομένα διαφόρων περιοχών της Ελλάδας. Επιπλέον περιέχεται ο αριθμός ατόμων (ανά κατοικία) σε συσχέτιση με τις ανάγκες σε ζεστό νερό κάθε ατόμου [125]. Άλλα δεδομένα εισόδου είναι ο τύπος του ανακλαστήρα <συμμετρικός ή ασύμμετρος> καθώς και η χωρητικότητα της δεξαμενής του νερού.

Υπάρχουν έξι πίνακες: οι πέντε είναι για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στη κατασκευή του συστήματος και ο ένας για τις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ανά γεωγραφική περιοχή [126], [127], [128], [129], [130].

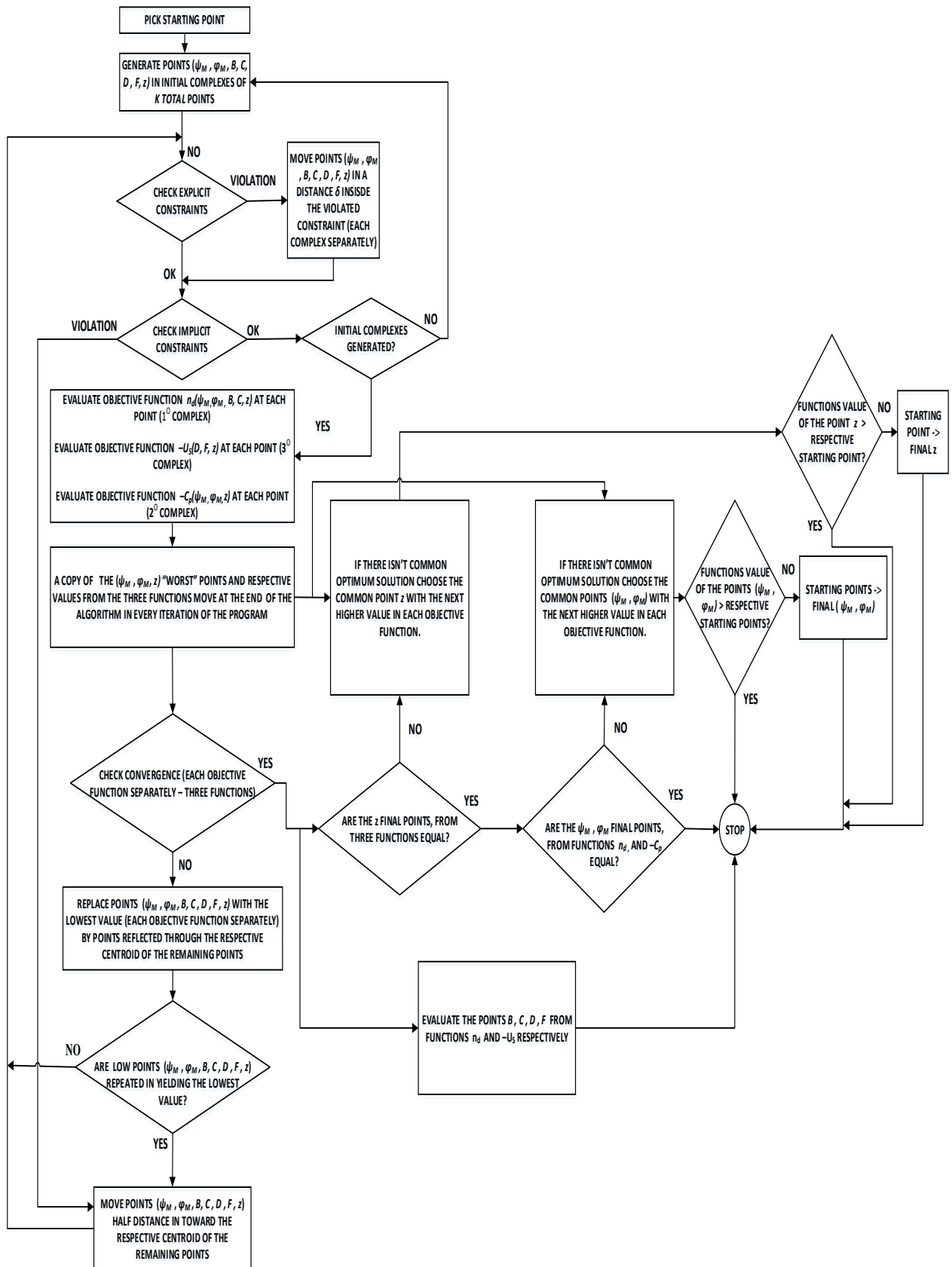
Μετά το πέρας του αλγόριθμου βελτιστοποίησης (Σχήμα 3.2) προκύπτουν οι βέλτιστες διαστάσεις του ανακλαστήρα καθώς και η ΜΗΑ, ο ΣΘΑ της δεξαμενής κατά τη νύχτα, το ΚΠ του συστήματος και ο ελάχιστος αριθμός μονάδων ICS για εγκατάσταση σε μία κατοικία.

Στη συνέχεια εκτελούνται η ενεργειακή και η οικονομική ανάλυση αντίστοιχα του συστήματος ή των συστημάτων που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση.

Στο τέλος το πρόγραμμα εξάγει γεωμετρικά σχέδια που δίνουν τη βέλτιστη γεωμετρία του συστήματος τα οποία είναι χρήσιμα για τη κατασκευή του συστήματος στη βιομηχανία.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής του GUI περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.2: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος του προβλήματος βελτιστοποίησης (Σχήμα 3.2) στηρίζεται σε μία παλαιότερη τεχνική βελτιστοποίησης [131],[132],[133],[134],[135] η οποία υπολόγιζε το μέγιστο μίας μη

γραμμικής συνάρτησης με διαδοχική αναζήτηση σημείων εντός του πεδίου ορισμού της (που οριοθετείται από τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης) (BOX – COMPLEX ALGORITHM) [131].

Στη παρούσα εργασία η αρχική τεχνική βελτιστοποίησης έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να μπορεί να επιλύσει προβλήματα τριών μη γραμμικών ΑΣ (πρόβλημα πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης των εξισώσεων (3.16)) [103], [104], [105], [106], [107] που υπόκεινται σε μη γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς [136]. Στη πραγματικότητα δημιουργείται μία καινούργια μεθοδολογία αντιμετώπισης προβλημάτων μη γραμμικής πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης (Nonlinear Multi-Objective Optimization), ικανή να εφαρμοστεί σε πολυπλοκότερα και πιο ουσιαστικά προβλήματα εύρεσης του κοινού μεγίστου τριών ΑΣ, με τεράστιο εύρος εφαρμογών σε τεχνοοικονομικές μελέτες [122], [136]. Ο αλγόριθμος λοιπόν βελτιστοποίησης θα αναζητήσει αυτό το κοινό μέγιστο λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η αρχική ομάδα σημείων του προβλήματος είναι τυχαία διασκορπισμένη μέσα στο χώρο (σύνολο) που ορίζουν αυτές οι ΑΣ.

Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

- 1) Στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης δημιουργούνται τρεις ομάδες σημείων από $K \geq N + 1$ σημεία η κάθε ομάδα (ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης είναι $N = 7$) οι οποίες αποτελούνται από ένα επιλεγμένο αρχικό σημείο και (Οι μεταβλητές ψ_m, φ_m είναι κοινές στις δύο από τις τρεις ομάδες – δηλαδή σε αυτές που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις $n_d(\psi_m, \varphi_m, B, C, z)$ και $-C_p(\psi_m, \varphi_m, z)$, ενώ η μεταβλητή z είναι κοινή και στις τρεις ομάδες σημείων) και $K - 1$ πρόσθετα σημεία τα οποία παράγονται από τυχαίους αριθμούς και περιορισμούς για κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης, σύμφωνα με τους τύπους:

$$\psi_{m,i,j} = g_1 + r_{ij} \cdot (h_1 - g_1) \quad (3.46)$$

$$\varphi_{m,i,j} = g_2 + r_{ij} \cdot (h_2 - g_2) \quad (3.47)$$

$$B_{i,j} = g_3 + r_{ij} \cdot (h_3 - g_3) \quad (3.48)$$

$$C_{i,j} = g_4 + r_{ij} \cdot (h_4 - g_4) \quad (3.49)$$

$$D_{i,j} = g_5 + r_{ij} \cdot (h_5 - g_5) \quad (3.50)$$

$$F_{i,j} = g_6 + r_{ij} \cdot (h_6 - g_6) \quad (3.51)$$

$$z_{i,j} = g_7 + \text{Int} \left(r_{ij} \cdot \frac{h_7 - g_7}{10} \right) \quad (3.52)$$

$i=1,2,\dots,N$

Και

$j=1,2,\dots, K-1$ για κάθε διαφορετική ομάδα σημείων.

Επίσης r_{ij} είναι τυχαίοι αριθμοί μεταξύ 0 - 0.4 για τους δύο πρώτους περιορισμούς, 0.9 - 1 για τους περιορισμούς (3.48) – (3.51) και 3 – 10 για τον τελευταίο. Οι τυχαίοι αριθμοί του τελευταίου περιορισμού πρέπει να είναι ακέραιοι αριθμοί όπως και το πηλίκο της πράξης: $r_{ij} \cdot \frac{h_7 - g_7}{10}$. Σε περίπτωση που το πηλίκο αυτό δεν είναι ακέραιος αριθμός επιλέγεται το ακέραιο μέρος του παραπάνω υπολογισμού. Επιπλέον $h_1 - h_7$ και $g_1 - g_7$ είναι τα πάνω και κάτω όρια των μη γραμμικών ανισοτικών περιορισμών του πολυστοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης, όπως απεικονίζονται στις εξισώσεις (3.16).

- 2) Τα επιλεγμένα σημεία πρέπει να ικανοποιούν και τους άμεσους και τους έμμεσους περιορισμούς του προβλήματος. Αν κάποιος από τους άμεσους περιορισμούς παραβιάζεται το σημείο αυτό μετακινείται μια μικρή απόσταση $\delta = 0.0001 \text{ m}$ (και για τις τρεις ομάδες σημείων) μέσα στο όριο της περιοχής που παραβιάζεται. Αν ένας έμμεσος περιορισμός παραβιάζεται, το σημείο μετακινείται στο μισό της απόστασης από τον κέντρο των εναπομεινάντων σημείων (ένα κέντρο για κάθε ομάδα σημείων) σύμφωνα με τους τύπους:

$$\psi_{m_{i,j}(\text{new})} = \frac{1}{2} \cdot \left(\psi_{m_{i,j}(\text{old})} + \overline{\psi_{m_{i,c}}} \right) \quad (3.53)$$

$$\varphi_{m_{i,j}(\text{new})} = \frac{1}{2} \cdot \left(\varphi_{m_{i,j}(\text{old})} + \overline{\varphi_{m_{i,c}}} \right) \quad (3.54)$$

$$B_{(\text{new})} = \frac{1}{2} \cdot \left(B_{(\text{old})} + \bar{B} \right) \quad (3.55)$$

$$C_{(\text{new})} = \frac{1}{2} \cdot \left(C_{(\text{old})} + \bar{C} \right) \quad (3.56)$$

$$D_{(\text{new})} = \frac{1}{2} \cdot \left(D_{(\text{old})} + \bar{D} \right) \quad (3.57)$$

$$F_{(new)} = \frac{1}{2} \cdot (F_{(old)} + \bar{F}) \quad (3.58)$$

$$z_{(new)} = \frac{1}{2} \cdot (z_{(old)} + \bar{z}) \quad (3.59)$$

$$i=1,2,\dots,N$$

όπου οι συντεταγμένες του κέντρου από τα εναπομείναντα σημεία $\overline{\psi}_{m_{i,c}}, \overline{\varphi}_{m_{i,c}}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{F}, \bar{z}$ καθορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις (για κάθε ομάδα σημείων):

$$\overline{\psi}_{m_{i,c}} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K \psi_{m_{i,j}} - \psi_{m_{i,j}(old)} \right] \quad (3.60)$$

$$\overline{\varphi}_{m_{i,c}} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K \varphi_{m_{i,j}} - \varphi_{m_{i,j}(old)} \right] \quad (3.61)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K B_j - B_{(old)} \right] \quad (3.62)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K C_j - C_{(old)} \right] \quad (3.63)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K D_j - D_{(old)} \right] \quad (3.64)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K F_j - F_{(old)} \right] \quad (3.65)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{K-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^K z_j - z \right] \quad (3.66)$$

$$i=1,2,\dots,N$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν όλοι οι έμμεσοι περιορισμοί.

- 3) Υπολογίζεται η ΑΣ για κάθε σημείο. Με βάση την υπάρχουσα μεθοδολογία υπολογίζονται οι μικρότερες τιμές από κάθε ΑΣ. Αυτές οι τιμές μαζί με τα αντίστοιχα

σημεία (μόνο από τις συναρτήσεις $n_a(\psi_m, \varphi_m, B, C, z)$ και $-C_p(\psi_m, \varphi_m, z)$ αντιγράφονται και μεταφέρονται στο τέλος του αλγόριθμου ως τα «χειρότερα» σημεία των δύο ομάδων που αφορούν τις συναρτήσεις αυτές (τιμές και σημεία που αφορούν μόνο τις μεταβλητές απόφασης (ψ_m, φ_m, z) όπου και αποθηκεύονται σε δύο διαφορετικούς πίνακες (έναν πίνακα για κάθε συνάρτηση). Από τα υπόλοιπα σημεία, εκείνα στα οποία η ΑΣ κάθε ομάδας εμφανίζει την μικρότερη τιμή αντικαθίστανται από σημεία τα οποία είναι τοποθετημένα σε μια απόσταση α από το κέντρο των εναπομεινάντων σημείων σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους (για κάθε ομάδα σημείων):

$$\psi_{m,i,j(new)} = \alpha \cdot (\overline{\psi_{m,i,c}} - \psi_{m,i,j(old)}) + \overline{\psi_{m,i,c}} \quad (3.67)$$

$$\varphi_{m,i,j(new)} = \alpha \cdot (\overline{\varphi_{m,i,c}} - \varphi_{m,i,j(old)}) + \overline{\varphi_{m,i,c}} \quad (3.68)$$

$$B_{(new)} = \alpha \cdot (\bar{B} - B_{(old)}) + \bar{B} \quad (3.69)$$

$$C_{(new)} = \alpha \cdot (\bar{C} - C_{(old)}) + \bar{C} \quad (3.70)$$

$$D_{(new)} = \alpha \cdot (\bar{D} - D_{(old)}) + \bar{D} \quad (3.71)$$

$$F_{(new)} = \alpha \cdot (\bar{F} - F_{(old)}) + \bar{F} \quad (3.72)$$

$$z_{(new)} = \alpha \cdot (\bar{z} - z_{(old)}) + \bar{z} \quad (3.73)$$

$$i=1,2,\dots,N$$

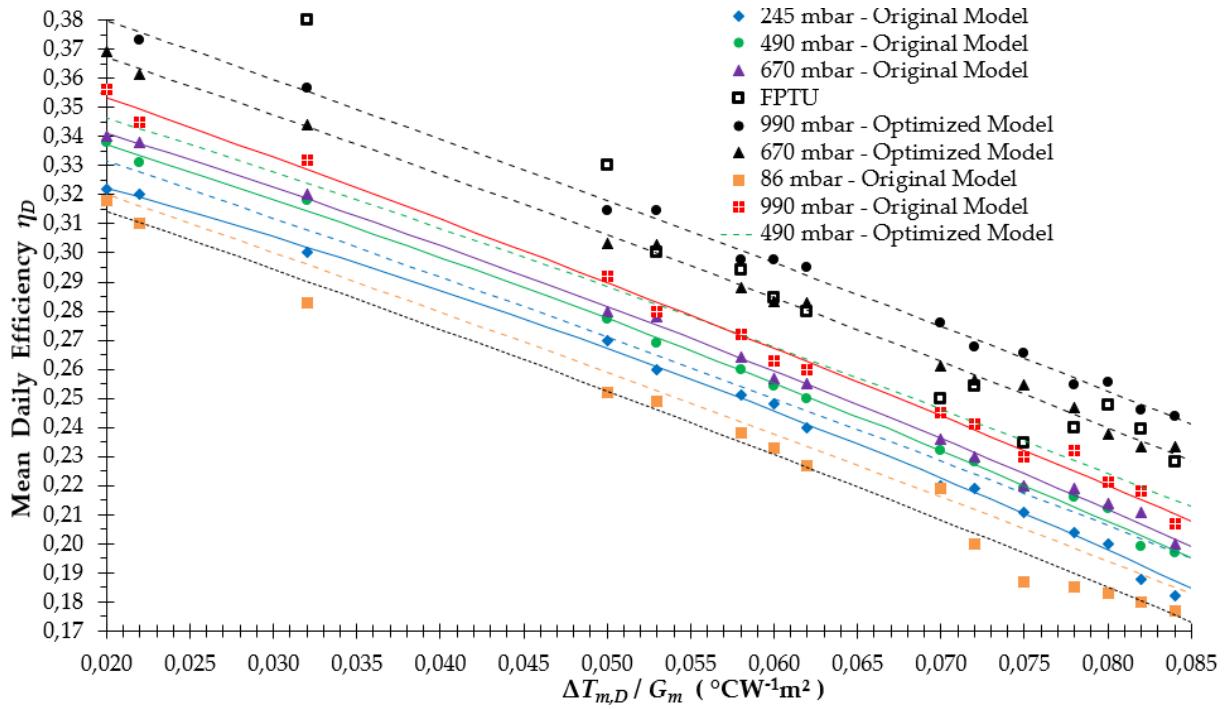
Βασιζόμενοι στον αρχικό αλγόριθμο μια συνιστώμενη τιμή για το α είναι η 1.3 [131].

- 4) Αν η ΑΣ κάθε ομάδας σημείων εμφανίσει την μικρότερη τιμή σε ένα επόμενο σημείο, το σημείο αυτό μετακινείται στο μέσο της απόστασης από το κέντρο των εναπομεινάντων σημείων.
- 5) Τα νέα σημεία ελέγχονται πάλι σύμφωνα με τους περιορισμούς και εφόσον τους παραβιάζουν μετακινούνται σε μια νέα θέση σύμφωνα με το βήμα 4.

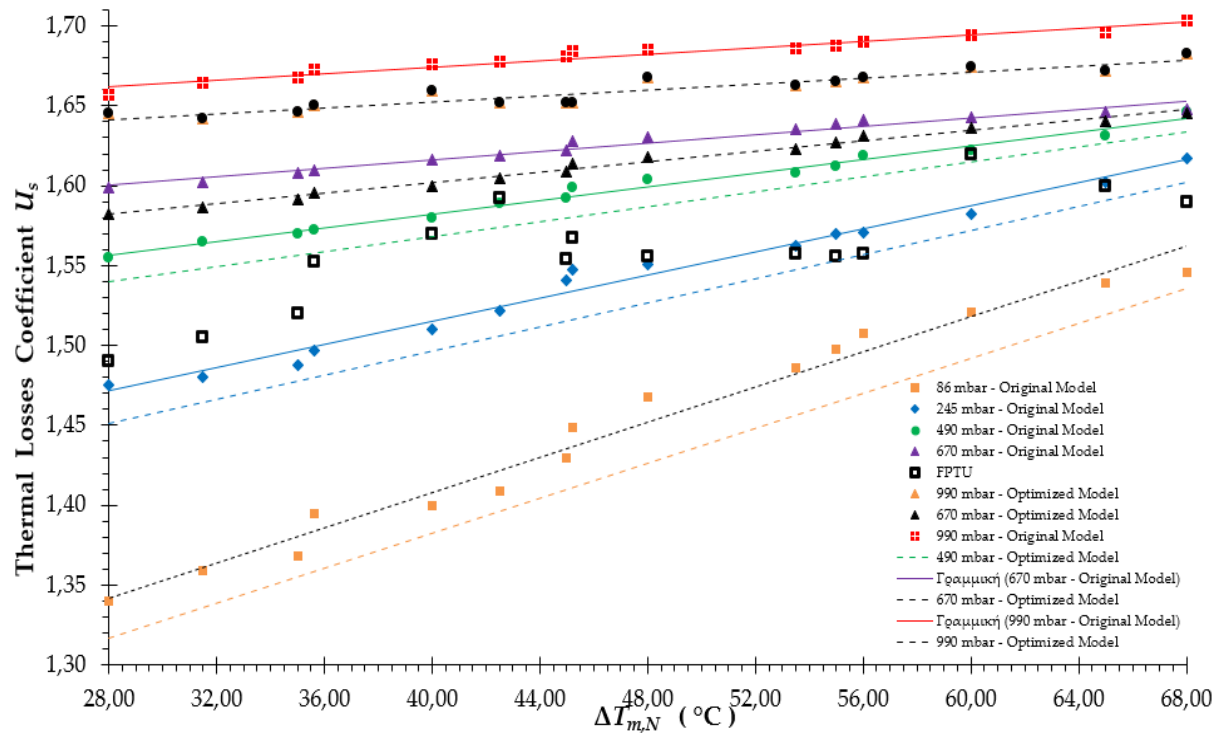
- 6) Η σύγκλιση του αλγόριθμου επιτυγχάνεται όταν οι τιμές της κάθε ΑΣ είναι μεταξύ $\beta = 0.1$ μονάδων για 5 διαδοχικές επαναλήψεις του αλγόριθμου. Μία επανάληψη του αλγόριθμου καθορίζεται ως οι υπολογισμοί που απαιτούνται έτσι ώστε να γίνει επιλογή ενός νέου σημείου το οποίο να ικανοποιεί τους περιορισμούς και να μην αποδίδει την ίδια μικρότερη τιμή για την ΑΣ κάθε ομάδας σημείων.
- 7) Όταν βρεθούν οι βέλτιστες λύσεις $(\psi_m, \varphi_m, B, C, z)$ από όλες τις ΑΣ του προβλήματος ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- 8) Αν τα τελικά σημεία (ψ_m, φ_m, z) που βελτιστοποιούν τις συναρτήσεις $n_d(\psi_m, \varphi_m, B, C, z)$ και $-C_p(\psi_m, z)$ είναι ίσα ο αλγόριθμος έχει βρει το συνολικό «κοινό» βέλτιστο αυτών των δύο συναρτήσεων. Διαφορετικά (με σύγκριση των τιμών των συναρτήσεων που βρίσκονται στους δύο πίνακες στο τέλος του αλγόριθμου) επιλέγεται το κοινό σημείο (ψ_m, φ_m) των δύο συναρτήσεων το οποίο δίνει την αμέσως μεγαλύτερη τιμή (και από τις δύο συναρτήσεις), ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος και οδηγεί σε σύγκλιση του αλγόριθμου οπότε και το πρόγραμμα τερματίζεται.
- 9) Σε περίπτωση που δεν μπορεί να βρεθεί το κοινό σημείο (ψ_m, φ_m, z) που δίνει τη μεγαλύτερη τιμή και από τις δύο συναρτήσεις επιλέγεται το κοινό σημείο των δύο αρχικών ομάδων σημείων που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις αυτές (επιλεγμένο αρχικό σημείο) ως καλύτερη λύση για τις τιμές (ψ_m, φ_m, z) και ο αλγόριθμος σταματάει.
- 10) Στο τέλος της διαδικασίας ο αλγόριθμος υπολογίζει εκτός από τις μεταβλητές (ψ_m, φ_m, z) και τις παραμέτρους B, C, D και F οι οποίοι απαιτούνται στη μέση ημερήσια απόδοση αλλά και στο συντελεστή θερμικών απωλειών της δεξαμενής του νερού χρήσης, για το ICS σύστημα που μελετάται.

Ο αλγόριθμος εξετάζει τις πέντε περιπτώσεις αρχικής συνολικής πίεσης στο εσωτερικό της δεξαμενής του νερού, όπως υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (3.16) και κατατάσσει τα αποτελέσματα με φθίνουσα σειρά (από τις καλύτερες στις χειρότερες περιπτώσεις).

Με βάση τα ανωτέρω δημιουργούνται, από το περιβάλλον GUI, τα διαγράμματα της ΜΗΑ και του ΣΘΑ της δεξαμενής του νερού κατά τη νύχτα. Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται τα διαγράμματα αυτά (Διαγράμματα 3.3 και 3.4) για τα βελτιστοποιημένα μοντέλα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις αρχικής συνολικής πίεσης για το πρότυπο σύστημα ICS [59]. Επιπλέον, στα ίδια διαγράμματα γίνεται σύγκριση και με τη ΜΗΑ και το ΣΘΑ του FPTU συστήματος που αναφέρθηκε στο διάγραμμα 3.1 (Κεφάλαιο 3.1) [93]:



Διάγραμμα 3.3: ΜΗΑ βελτιστοποιημένων μοντέλων και σύγκριση με αρχικά μοντέλα και FPTU.



Διάγραμμα 3.4: ΣΘΑ βελτιστοποιημένων μοντέλων και σύγκριση με αρχικά μοντέλα και FPTU.

Από το διάγραμμα 3.3 συμπεραίνεται ότι οι καλύτερες περιπτώσεις για τη ΜΗΑ είναι για αρχική συνολική πίεση 670 ± 16 mbar (at 22.0 ± 1 °C) και 990 ± 23 mbar (at 24 ± 1 °C). Αυτές οι περιπτώσεις προσεγγίζουν περισσότερο τη ΜΗΑ του FPTU συστήματος. Επιπλέον από το διάγραμμα 3.4 αποδεικνύεται ότι οι τιμές του ΣΘΑ που πλησιάζουν περισσότερο τις αντίστοιχες τιμές του FPTU συστήματος είναι πάλι για αρχική συνολική πίεση 670 ± 16 mbar (at 22.0 ± 1 °C) και 990 ± 23 mbar (at 24 ± 1 °C) (για την επιλογή του «καλύτερου» ΣΘΑ

συνδυάζεται και η προσέγγιση του διαγράμματος 3.3 για τη ΜΗΑ). Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι αλλάζει η γεωμετρία του κατόπτρου για κάθε περίπτωση αρχικής συνολικής πίεσης (είναι μεγαλύτερο το κάτοπτρο για τις μεγαλύτερες πιέσεις και μικρότερο για τις μικρότερες πιέσεις) συνεπώς αλλάζει και η διάσταση της επιφάνειας ανοίγματος (αντίστοιχα η επιφάνεια ανοίγματος είναι μεγαλύτερη για τις μεγαλύτερες πιέσεις και μικρότερη για τις μικρότερες πιέσεις). Επίσης από το διάγραμμα 3.4 παρατηρείται ότι οι θερμικές απώλειες στη δεξαμενή του νερού χρήσης είναι μεγαλύτερες για τις μεγαλύτερες πιέσεις και μικρότερες για τις μικρότερες πιέσεις.

Η τελική επιλογή (670 ± 16 mbar και 990 ± 23 mbar) για τα σχεδιαζόμενα συστήματα ICS (μαζί με την ενεργειακή και περιβαλλοντική ανάλυση για το στάδιο χρήσης), με βάση τον αλγόριθμο του Σχήματος 3.2 και τα διαγράμματα 3.3, 3.4 παρουσιάζεται στο πίνακα 3.2 για τρεις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Για λόγους απλούστευσης ακολουθείται η ακόλουθη κωδικοποίηση: **Κ**: Κρήτη, **Α**: Αθήνα και **Θ**: Θεσσαλονίκη. Επίσης όσον αφορά τον ελάχιστο αριθμό συστημάτων ICS για μία συνήθη οικία 4 ατόμων ο αλγόριθμός προτείνει τρία ή τέσσερα συστήματα (ανάλογα με τη κλιματική ζώνη στην οποία γίνεται η εγκατάσταση):

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για τρεις κλιματικές ζώνες (Κρήτη, Αθήνα και Θεσσαλονίκη).

| Αρχική συνολική πίεση (mbar) | Αριθμός ICS – οικία 4 ατόμων | | | Μία λειτουργική μονάδα ICS | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|----------|----------|--------------------------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|--------------------------|---------------|---------------|---|--------------|--------------|
| | | | | Παραγόμενη ενέργεια (MWh/Year) | | | Μείωση εκπομπών αερίων (tn CO ₂ /Year) | | | Κόστος Παραγωγής (Euros) | | | Συνολικό πλάτος κατόπτρου $W_{CPC}(m)$ – μήκος καμπύλης | | |
| | Κ | Α | Θ | Κ | Α | Θ | Κ | Α | Θ | Κ | Α | Θ | Κ | Α | Θ |
| 670±16 | 3 | 4 | 4 | 1.38 | 1.24 | 1.22 | 0.28 | 0.25 | 0.24 | 189.55 | 200.02 | 229.12 | 0.981 | 1.047 | 1.409 |
| 990±23 | 3 | 4 | 4 | 1.42 | 1.28 | 1.26 | 0.30 | 0.26 | 0.25 | 195.05 | 206.03 | 234.32 | 0.999 | 1.065 | 1.427 |

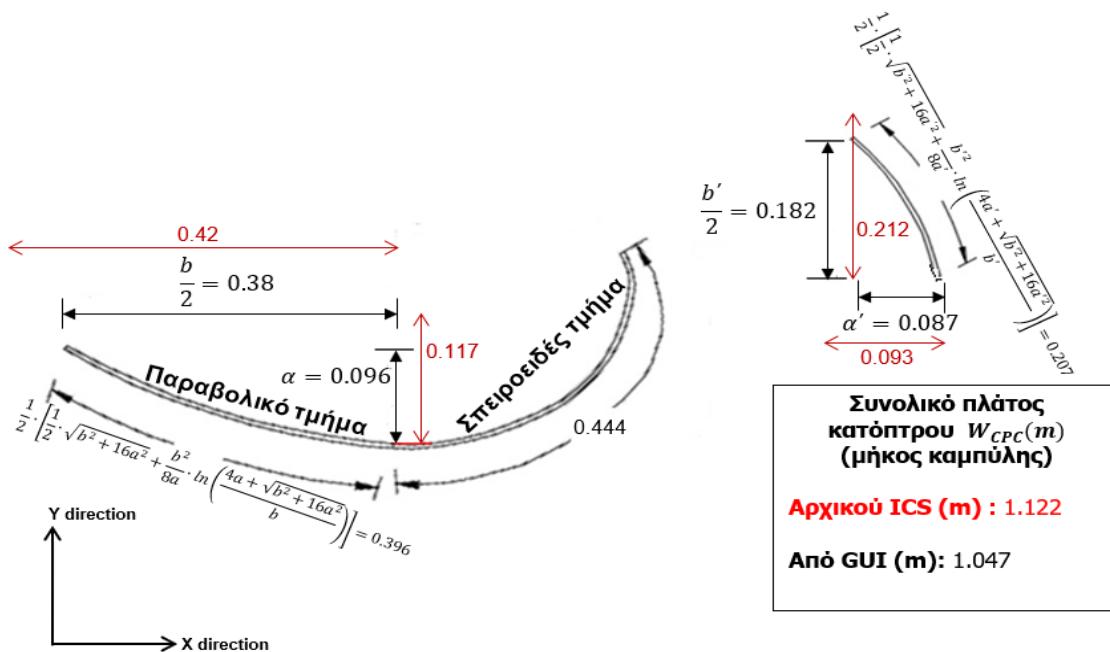
Στο πίνακα 3.2 σημειώνεται (με έντονα πλάγια γράμματα) η βέλτιστη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης βάσει του μικρότερου κόστους παραγωγής. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του περιβάλλοντος GUI, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του για οικονομική ανάλυση, γίνεται υπολογισμός των οικονομικών συντελεστών για την κλιματική ζώνη της Κρήτης (καλύτερη περίπτωση πίνακα 3.1), για τα προτεινόμενα από τον αλγόριθμο ICS συστήματα. Τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3:

Πίνακας 3.3: Χρόνος Αποπληρωμής και Καθαρή Παρούσα Αξία, για τη καλύτερη περίπτωση σχεδιαζόμενων συστημάτων ICS με ασύμμετρο κατόπτρο και διπλό δοχείο, που προκύπτουν από τον αλγόριθμο (Κλιματική ζώνη Κρήτης)

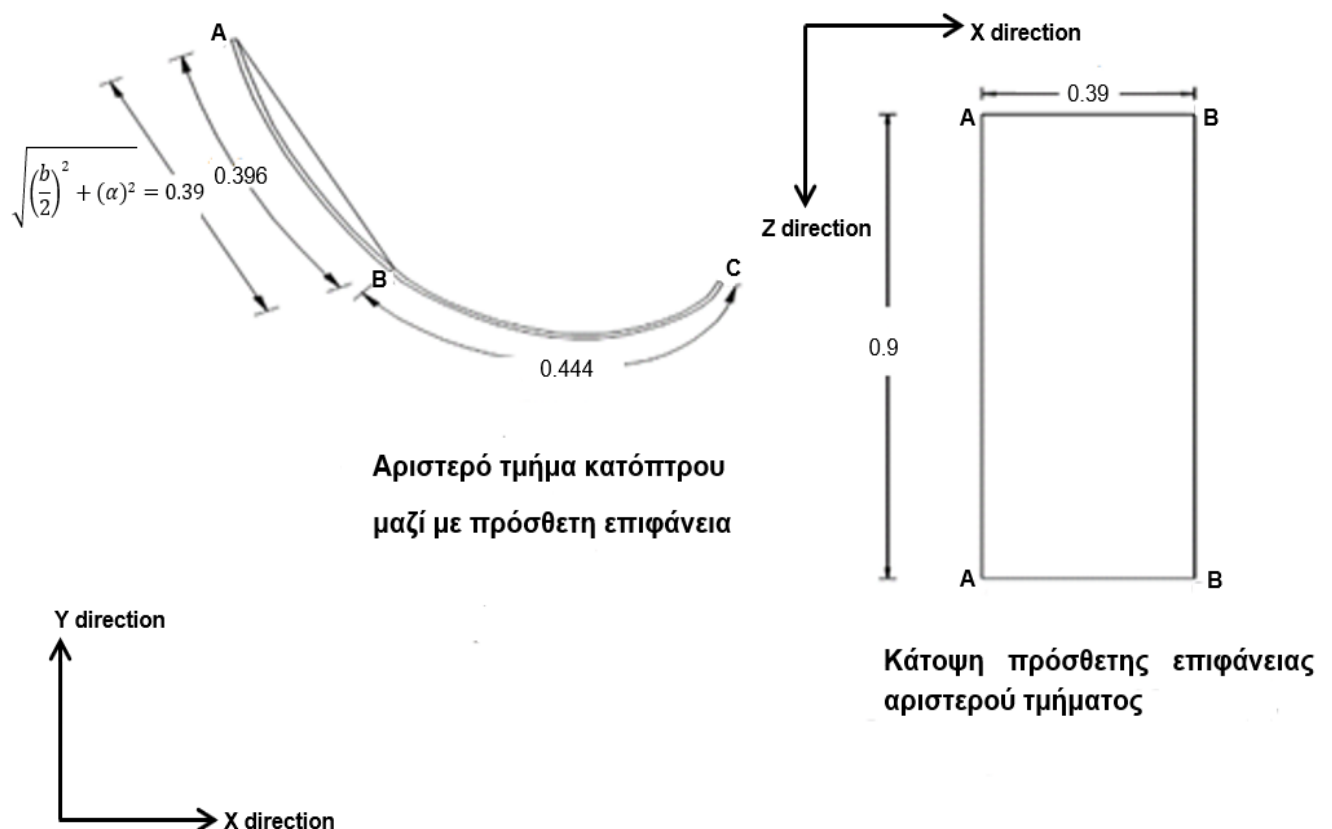
| Μία λειτουργική μονάδα ICS | | |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Αρχική συνολική πίεση (mbar) | Χρόνος αποπληρωμής (Years) | Καθαρή Παρούσα Αξία (Euros) |
| 670±16 | 4.3 | 152.22 |
| 990±23 | 4.2 | 166.06 |

Οι βέλτιστες διαστάσεις των συνολικών τμημάτων του ανακλαστήρα (στο ΧΥ επίπεδο) παρουσιάζονται στα σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5. Η γεωμετρία αυτή αναφέρεται σε πίεση 670 ± 16 mbar και ισχύει για τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής της Αθήνας. Η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας του κατόπτρου γίνεται για τη κλιματική ζώνη της Αθήνας γιατί η πειραματική μελέτη του προτύπου ICS έγινε στη περιοχή της Αχαΐας (Πάτρα) που ανήκει στη συγκεκριμένη κλιματική ζώνη [93], [59]. Επιπλέον στο σχήμα 3.3 γίνεται και η σύγκριση της βέλτιστης γεωμετρίας που προτείνει ο αλγόριθμος με την αρχική γεωμετρία του προτύπου συστήματος (κόκκινο χρώμα). Δηλαδή γίνεται σύγκριση των βελτίστων διαστάσεων του νέου κατόπτρου με τις αντίστοιχες διαστάσεις όταν έγιναν τα ΠΕΧ για το πρότυπο σύστημα υποθέτοντας πάντα ότι ισχύουν οι ίδιες εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες [93], [59].

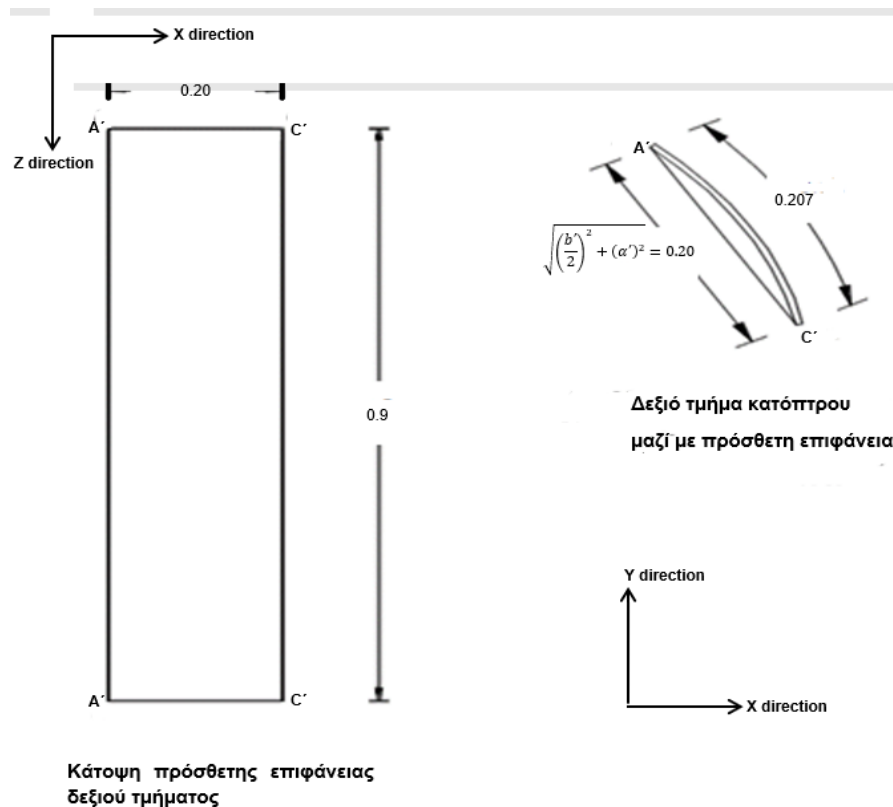
Με τη βοήθεια λογισμικού πακέτου CAD και λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της γεωμετρίας σχεδίασης, προκύπτουν για το μη συμμετρικό ανακλαστήρα (στο ΧΥ επίπεδο), οι διαστάσεις δύο πρόσθετων επιφανειών (με χρήση πυθαγόρειου θεωρήματος [124]: Σχήματα 3.4 και 3.5) που τοποθετούνται (υποθετικά) σε κάθε παραβολικό τμήμα του ανακλαστήρα για τη διαμόρφωση της κλίμακας του στο περιβάλλον CAD. Στη συνέχεια τα τελικά σχέδια που προκύπτουν (αφού αφαιρεθούν οι υποθετικές πρόσθετες επιφάνειες στο περιβάλλον CAD) τοποθετούνται σε μία εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου CNC που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση και κοπή των παραβολικών φύλλων του μη συμμετρικού ανακλαστήρα.



Σχήμα 3.3: Βέλτιστες διαστάσεις στο XY επίπεδο (σε μέτρα) παραβολικών τμημάτων σε σύγκριση με αρχικές διαστάσεις κατόπτρου, συστήματος ICS με μη συμμετρικό ανακλαστήρα.

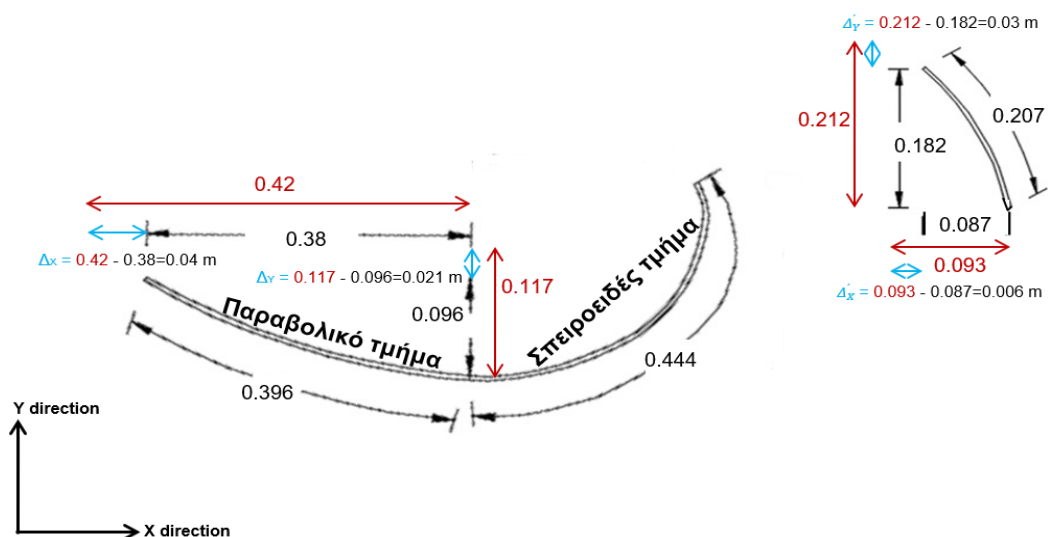


Σχήμα 3.4: Πρόσθετη επιφάνεια (γεωμετρικές λεπτομέρειες σε μέτρα) για το αριστερό τμήμα του κατόπτρου.



Σχήμα 3.5: Πρόσθετη επιφάνεια (γεωμετρικές λεπτομέρειες σε μέτρα) για το δεξιό τμήμα του κατόπτρου.

Στο σχήμα 3.6 απεικονίζονται (στο XY επίπεδο) οι διαφορές στις διαστάσεις του νέου με το αρχικό κάτοπτρο (οι διαφορές αυτές σημειώνονται με μπλε χρώμα). Σύμφωνα και με το σχήμα 3.3 παρατηρείται ότι το νέο κάτοπτρο είναι μικρότερο σε διαστάσεις από το αρχικό συνεπώς έχει μικρότερη μάζα.



Σχήμα 3.6: Διαφορές των διαστάσεων (σε μέτρα) του νέου με το αρχικό κάτοπτρο, από κάθε παραβολικό τμήμα κατά X και Y άξονα αντίστοιχα.

Οι διαφορές που αναφέρθηκαν προηγουμένως παρουσιάζονται στις εξισώσεις (3.74) – (3.77):

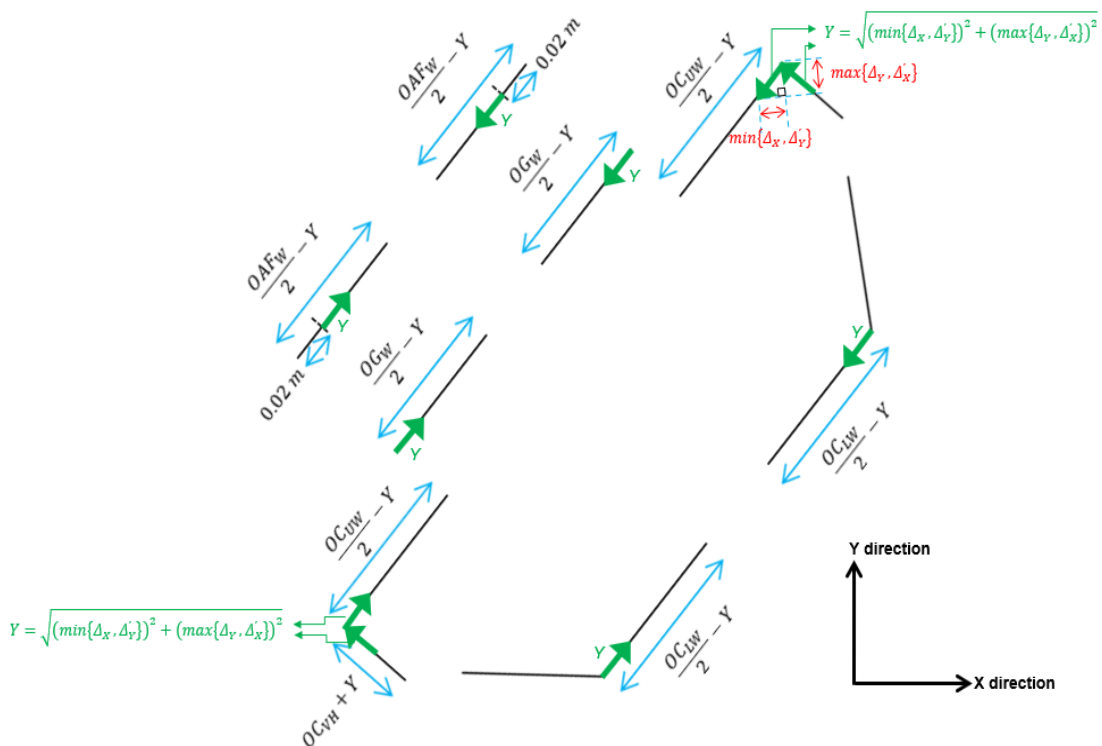
$$\Delta x = 0.42 - 0.38 = 0.04 \text{ m} \quad (3.74)$$

$$\Delta_Y = 0.117 - 0.096 = 0.021 \text{ m} \quad (3.75)$$

$$\Delta_X' = 0.093 - 0.087 = 0.006 \text{ m} \quad (3.76)$$

$$\Delta_Y' = 0.212 - 0.182 = 0.03 \text{ m} \quad (3.77)$$

Οι διαστάσεις των υπολοίπων τμημάτων του νέου συστήματος, κατά την οριζόντια και κατακόρυφη αντίστοιχα διεύθυνση της ηλιακής συσκευής (σχήματα 3.7, 3.8), προκύπτουν αφαιρώντας το μήκος $Y(\text{m})$ από τις αρχικές οριζόντιες και κάθετες (κατά τις διεθύνσεις της συσκευής) διαστάσεις της πρόσοψης του πρότυπου συστήματος του διαγράμματος 3.2. Το μήκος αυτό θα είναι η υποτείνουσα του νοητού ορθογωνίου τριγώνου (σχήμα 3.7) που σχηματίζεται από τις διαφορές των διαστάσεων του αρχικού από το νέο κάτοπτρο κατά την κατεύθυνση $X (\Delta_X, \Delta_Y')$ και κατά την κατεύθυνση $Y (\Delta_Y, \Delta_X')$ αντίστοιχα του συστήματος ICS, σύμφωνα με την εξίσωση (3.78) [124]. Λόγω των πολύ μικρών τιμών των $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_X', \Delta_Y'$ θεωρείται ότι το μήκος $Y(\text{m})$ ουσιαστικά προσεγγίζει (σαν διεύθυνση) τις οριζόντιες και κάθετες (για απλούστευση των πράξεων) «μετατοπίσεις» της πρόσοψης του πρότυπου συστήματος που οδηγούν σε νέο σύστημα:



OAF_w: Πλάτος πλαισίου Αλουμινίου (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (**O**riginal **I**CS **A**luminim **F**rame, **W**idth)

OG_w: Πλάτος διάφανης επιφάνειας (σε μέτρα αρχικού συστήματος (**O**riginal **I**CS **G**lass, **W**idth)

OC_{uw}: Πάνω πλάτος εξωτερικούκαλύμματος (σε μέτρα αρχικού συστήματος (**O**riginal **I**CS **C**asing, **U**pper **W**idth)

OC_{vh}: Κατακόρυφη διάσταση εξωτερικούκαλύμματος (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (**O**riginal **I**CS **C**asing, **V**ertical **H**eight)

OC_{lw}: Κάτω πλάτος εξωτερικούκαλύμματος (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (**O**riginal **I**CS **C**asing, **L**ower **W**idth)

$$Y = \text{Μετατόπιση (σε μέτρα) νέων διαστάσεων που προκύπτουν για το σχεδιαζόμενο σύστημα} = \sqrt{(\min\{\Delta_X, \Delta_Y'\})^2 + (\max\{\Delta_Y, \Delta_X'\})^2}$$

Σχήμα 3.7: Προσθαφαίρεση στη πρόσοψη (στο XY επίπεδο), του εξωτερικού καλύμματος, της διάφανης επιφάνειας και του πλαισίου αλουμινίου, του μήκους $Y(\text{m})$ που προκύπτει μέσω των διαφορών των διαστάσεων του νέου με το αρχικό κάτοπτρο.

$$Y(m) = \sqrt{(\min\{\Delta_X, \Delta'_Y\})^2 + (\max\{\Delta_Y, \Delta'_X\})^2} = 0.037 \text{ m} \quad (3.78)$$

Στην εξίσωση (3.78) χρησιμοποιείται καταρχάς η μικρότερη (min) από τις μεγαλύτερες διαφορές (Δ_X, Δ'_Y) έτσι ώστε το συνολικό μήκος $Y(m)$ να μην είναι πολύ μεγάλο (γεγονός που σημαίνει μεγαλύτερη μείωση ανοίγματος A_α), συνεπώς θα είναι ευκολότερη η τοποθέτηση του νέου κατόπτρου στο εσωτερικό του συστήματος ICS (από τη στιγμή που οι διαστάσεις της δεξαμενής νερού δε μεταβάλλονται η μεγάλη μείωση των διαστάσεων του εξωτερικού κελύφους και της επιφάνειας ανοίγματος μειώνει τον εσωτερικό χώρο μέσα στο σύστημα ICS, πράγμα που δυσκολεύει τη σωστή τοποθέτηση του κατόπτρου ακόμα και αν αυτό είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κάτοπτρο του προτύπου συστήματος – σχήματα 3.3, 3.6).

Αντίθετα, όσον αφορά τις μικρότερες διαφορές (Δ_Y, Δ'_X) στην εξίσωση (3.78), επιλέγεται η μεγαλύτερη (max) από αυτές για τον υπολογισμό του μήκους $Y(m)$ αφού το ίδιο μήκος θα προστεθεί και στο αρχικό ύψος του εξωτερικού καλύμματος του προτύπου συστήματος (Σχήμα 3.7) – ώστε να προκύψει δηλαδή, με αυτόν τον τρόπο, μια σχετικά μεγάλη αύξηση στο συνολικό μήκος $Y(m)$ – για να οδηγήσει έτσι σε υψηλότερο σύστημα (και το νέο κάτοπτρο θα τοποθετηθεί σε υψηλότερη θέση μέσα στο ICS) το οποίο θα συμβάλει σε λιγότερες θερμικές απώλειες στη δεξαμενή νερού χρήσης [120], [24], [25], [93], [59], [45]. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο το ύψος $Y(m)$ πρέπει να προστεθεί στο αρχικό ύψος του πρότυπου συστήματος σχετίζεται με αυτό που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή από τη στιγμή που το μέγεθος της δεξαμενής νερού δε μικραίνει σε αναλογία με το μέγεθος του νέου κατόπτρου αλλά παραμένει σταθερό ο χώρος που περιέχει το θερμό αέρα μεταξύ κατόπτρου – δεξαμενής και διάφανης επιφάνειας καθώς επίσης και η ποσότητα της μόνωσης θα μειωθούν αν μειωθεί το ύψος του συστήματος με άμεση συνέπεια την αύξηση των θερμικών απωλειών της δεξαμενής νερού [120], [24], [25], [93], [59], [45]. Θεωρητικά η τοποθέτηση του νέου κατόπτρου υψηλότερα θα σήμαινε και αύξηση των θερμικών απωλειών στην εξίσωση ΜΗΑ αλλά αυτό αντισταθμίζεται από τη μείωση της επιφάνειας του επειδή οι συντελεστές θερμικών απωλειών $B_{86 \rightarrow 990}$ και $C_{86 \rightarrow 990}$ υπολογίζονται σε ($^{\circ}C^{-1} \cdot W \cdot m^{-2}$) και ($^{\circ}C^{-2} \cdot W^2 \cdot m^{-4}$) αντίστοιχα από το πρόβλημα βελτιστοποίησης (3.16) δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογοι με το εμβαδό της επιφάνειας του κατόπτρου [122].

Τα τελικά αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας (με τη βοήθεια της εικόνας 3.1 που απεικονίζει τις αρχικές διαστάσεις του πρότυπου ICS συστήματος) συνοψίζονται στις εξισώσεις (3.79) – (3.83):

$$OAF_W - (2 \cdot Y) = 0.793 \text{ m} \quad (3.79)$$

$$OG_W - (2 \cdot Y) = 0.753 \text{ m} \quad (3.80)$$

$$OC_{UW} - (2 \cdot Y) = 0.793 \text{ m} \quad (3.81)$$

$$OC_{VH} + Y = 0.637 \text{ m} \quad (3.82)$$

$$OC_{LW} - (2 \cdot Y) = 0.386 \text{ m} \quad (3.83)$$

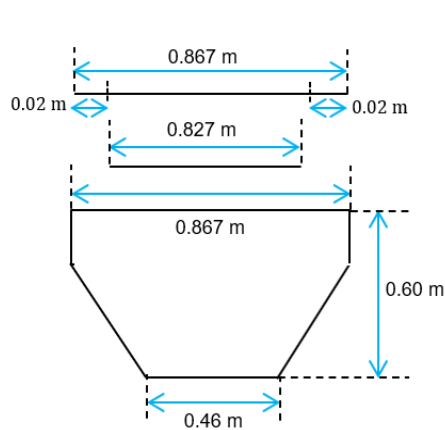
Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα αυτά και με χρήση των πυκνοτήτων των υλικών του συστήματος που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.2 προκύπτει ο πίνακας 3.4 που περιέχει όλες τις ποσότητες των υλικών (σε kg) για το νέο σύστημα ICS (αποτελέσματα περιβάλλοντος GUI για πίεση 670 ± 16 mbar και κλιματική ζώνη Αθήνας):

Πίνακας 3.4: Υλικά κατασκευής ηλιακού θερμικού συστήματος που προκύπτει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

| Συλλέκτης απορρόφησης | | Δεξαμενή νερού | | Σύστημα στήριξης | | Άλλα μέρη του συλλέκτη | |
|-----------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|---------------|------------------------|---------------|
| Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) | Υλικό | Ποσότητα (Kg) |
| Steel | 39.00 | Steel | 29.40 | Steel | 3 | Plastic tube | 2 |
| Aluminium | 5.2 | Magnesium | 0.10 | | | Glass fibre | 2 |
| Solar Glass | 7.34 | | | | | | |
| PUR | 13.30 | | | | | | |
| Σύνολο | 64.84 | | 29.50 | | 3 | | 4 |

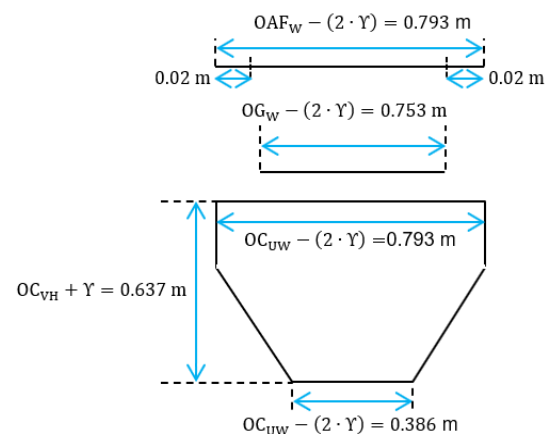
Στο πίνακα 3.4 σημειώνονται με πλάγια γράμματα οι αλλαγές στις μάζες σε σχέση με το αρχικό σύστημα (Πίνακας 3.1). Από αυτό το πίνακα υπολογίζεται η συνολική μάζα (συλλέκτη απορρόφησης και δεξαμενής νερού) για το νέο σύστημα η οποία θα είναι: $64.84 + 29.50 = 94.34$ kg.

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των προσόψεων (για το εξωτερικό κάλυμμα, το πλαίσιο αλουμινίου και τη διάφανη επιφάνεια) του αρχικού - με βάση την εικόνα 3.1 - και του νέου συστήματος αντίστοιχα μαζί με τις συνολικές μάζες για τα δύο συστήματα:



Αρχικό σύστημα ICS

Total mass: 101.22 kgr



Νέο σύστημα ICS

Total mass: 94.34 kgr

OAF_W: Πλάτος πλαισίου Αλουμινίου (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (Original ICS **A**luminim **F**rame, **W**idth)

OG_W: Πλάτος διάφανης επιφάνειας (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (Original ICS **G**lass, **W**idth)

OC_{UW}: Πάνω πλάτος εξωτερικού καλύμματος (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (Original ICS **C**asing, **U**pper **W**idth)

OC_{VH}: Κατακόρυφη διάσταση εξωτερικού καλύμματος (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (Original ICS **C**asing, **V**ertical **H**eight)

OC_{LW}: Κάτω πλάτος εξωτερικού καλύμματος (σε μέτρα) αρχικού συστήματος (Original ICS **C**asing, **L**ower **W**idth)

$Y = \text{Μετατόπιση (σε μέτρα) νέων διαστάσεων που προκύπτουν για το σχεδιαζόμενο σύστημα} = \sqrt{(\min\{\Delta_x, \Delta'_y\})^2 + (\max\{\Delta_y, \Delta'_x\})^2}$

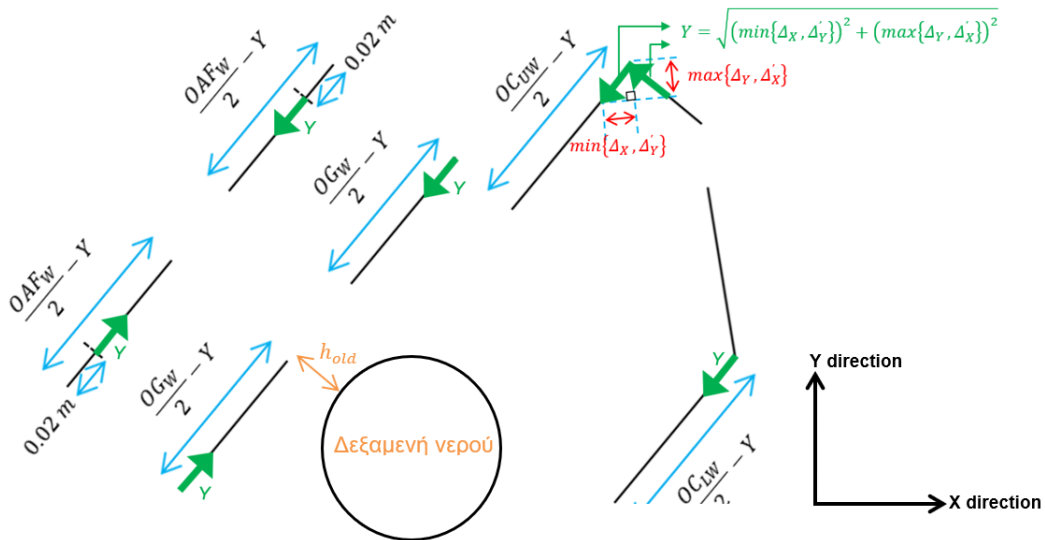
Σχήμα 3.8: Διαστάσεις (σε μέτρα) και συνολικές ποσότητες (σε κιλά) προσόψεων πλαισίου αλουμινίου, διάφανης επιφάνειας και εξωτερικού καλύμματος νέου συστήματος σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διαστάσεις και συνολικές ποσότητες του αρχικού συστήματος ICS.

Συνεπώς οι συνολικές διαστάσεις του νέου συστήματος θα είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του αρχικού ICS (από τη στιγμή που δεν μεταβάλλεται το είδος των υλικών των διαφόρων τμημάτων του συστήματος).

Σύμφωνα λοιπόν με τη μεθοδολογία της AKZ [9], όλα τα παραπάνω, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης του νέου συστήματος θα είναι μικρότερες από τις επιβαρύνσεις του πρότυπου ICS.

Γίνεται κατανοητό ότι ανάλογα με τη κλιματική ζώνη το περιβαλλοντικό φορτίο θα υφίστανται αυξομειώσεις λόγω αλλαγών στη συνολική μάζα του συστήματος (Πίνακας 3.2, μικρότερα και μεγαλύτερα αντίστοιχα κάτοπτρα που σημαίνουν μικρότερες και μεγαλύτερες μάζες ICS συστήματος). Δηλαδή στις βορειότερες περιοχές που η συνολική μάζα των ICS είναι μεγαλύτερη θα είναι μεγαλύτερο και το περιβαλλοντικό φορτίο ενώ στις νοτιότερες περιοχές που η συνολική μάζα των ICS είναι μικρότερη θα είναι αντίστοιχα μικρότερο και το περιβαλλοντικό φορτίο.

Ο εικοστός τέταρτος περιορισμός των εξισώσεων (3.16) προκύπτει από την εξίσωση (3.84) έχοντας σαν οδηγό το σχήμα 3.9. Ουσιαστικά είναι η υπόθεση ότι το ύψος του πάνω άκρου της δεξαμενής νερού από τη διάφανη επιφάνεια (h_{new} – για το νέο σύστημα) δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το αντίστοιχο ύψος (h_{old}) του προτύπου συστήματος ICS. Αυτός ο περιορισμός έρχεται μαζί με τον εικοστό τρίτο περιορισμό των εξισώσεων (3.16) και εξασφαλίζει και αυτός με μαθηματική λογική τις θερμικές απώλειες της δεξαμενής (να μην είναι δηλαδή περισσότερες από τις αντίστοιχες του προτύπου συστήματος) βάσει, αυτή τη φορά, των μεγίστων τιμών που μπορούν να λάβουν οι γωνίες ψ_m και φ_m – έτσι περιορίζονται οι μέγιστες τιμές των γωνιών αυτών, ειδικότερα για ψυχρότερα κλίματα και μεγάλο αριθμό ενοίκων στην κατοικία γιατί τότε είναι που τείνουν να αυξηθούν οι διαστάσεις του κατόπτρου σε υπερβολικό βαθμό. Το ύψος h_{new} υπολογίζεται συσχετίζοντας το μήκος $Y(m)$ που ορίστηκε στις προηγούμενες παραγράφους με το αρχικό ύψος (h_{old}) του προτύπου. Με μόνη διαφορά ότι τώρα το μήκος $Y(m)$ δίνεται σε παραμετρική μορφή, δηλαδή σε συνάρτηση με τις γωνίες ψ_m , φ_m .



Σχήμα 3.9: Ελάχιστη απόσταση (σε μέτρα) του πάνω άκρου της δεξαμενής νερού από τη διάφανη επιφάνεια του συστήματος ICS.

Θα είναι λοιπόν:

$$h_{old} + \sqrt{\left(0.15 \cdot \left[\frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin(1.0114)}{1 + \cos(1.0114)}\right] - 0.15 \cdot \left[\frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin\varphi_m}{1 + \cos\varphi_m}\right]\right)^2 + \left(0.15 \cdot \left[2.356 - \frac{(3\pi/2) \cdot \cos(1.0164)}{1 + \cos(1.0164)}\right] - 0.15 \cdot \left[2.356 - \frac{(3\pi/2) \cdot \cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m}\right]\right)^2} \geq$$

$$h_{old} \Rightarrow \frac{\sin\varphi_m}{1 + \cos\varphi_m} \cdot \left(0.199 - 0.18 \cdot \frac{\sin\varphi_m}{1 + \cos\varphi_m}\right) + \left[2.356 - \frac{(3\pi/2) \cdot \cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m}\right] \cdot \left\{0.033 - 0.0225 \cdot \left[2.356 - \frac{(3\pi/2) \cdot \cos\psi_m}{1 + \cos\psi_m}\right]\right\} \leq$$

$$0.067 \quad (3.84)$$

Έτσι η εξίσωση (3.84) βοηθάει στο να δοθεί μία σταθερή τιμή στην ελάχιστη απόσταση (h_{new}) του πάνω άκρου της δεξαμενής νερού από τη διάφανη επιφάνεια η οποία θα είναι:

$$\begin{aligned}
h_{new} = h_{old} + Y(\psi_m, \varphi_m) = h_{old} + \sqrt{\left(0.15 \cdot \left[\frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin(1.0114)}{1 + \cos(1.0114)}\right] - 0.15 \cdot \left[\frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m}\right]\right)^2} \\
+ \left(0.15 \cdot \left[2.356 - \frac{(\frac{3\pi}{2}) \cdot \cos(1.0164)}{1 + \cos(1.0164)}\right] - 0.15 \cdot \left[2.356 - \frac{(\frac{3\pi}{2}) \cdot \cos \psi_m}{1 + \cos \psi_m}\right]\right)^2 = \\
h_{old} + \sqrt{\left(0.235 - 0.15 \cdot \left[\frac{(2\sqrt{2}) \cdot \sin \varphi_m}{1 + \cos \varphi_m}\right]\right)^2 + \left(0.110 - 0.15 \cdot \left[2.356 - \frac{(\frac{3\pi}{2}) \cdot \cos \psi_m}{1 + \cos \psi_m}\right]\right)^2} = 0.087 \text{ m}
\end{aligned}
\tag{3.85}$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για όλες τις κλιματικές ζώνες, δηλαδή πάντα η απόσταση του πάνω άκρου της δεξαμενής νερού (του νέου συστήματος) από τη διάφανη επιφάνεια (h_{new}) θα είναι ίση: με την αντίστοιχη απόσταση του προτύπου “(h_{old}) + το μήκος $Y(\psi_m, \varphi_m)$ ”. Αποτελεί και ένα είδος ελέγχου στο κατά πόσο τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης είναι «λογικά». Αν δηλαδή $h_{new} < h_{old}$ τότε η βέλτιστη λύση και η διαδικασία σχεδίασης των επί μέρους τμημάτων της ηλιακής συσκευής δεν δίνουν εφικτές προσεγγίσεις.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμικής ενέργειας του νέου ICS συστήματος (πίνακας 3.2) χρησιμοποιείται η εξίσωση 2.1 του κεφαλαίου 2.3 με τις νέες όμως διαστάσεις, για το σχεδιαζόμενο σύστημα, που προκύπτουν από το περιβάλλον GUI. Συνέπως η νέα εξίσωση για τη παραγόμενη θερμική ενέργεια θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$Q_{THE/Year-new} = \sum_{k=1}^{k=12} \{ D_k \cdot [G_m \cdot A_{\alpha-new}(m^2) \cdot t_{day} \cdot n_{d-new} - A_{r-new}(m^2) \cdot U_{S-new} \cdot t_{night} \cdot (T_{i,m} - T_{\alpha,m})] \}
\tag{3.86}$$

Στη παραπάνω εξίσωση οι περισσότεροι συντελεστές είναι ίδιοι με την εξίσωση 2.1 του κεφαλαίου 2.3 εκτός από τους: $A_{\alpha-new}(m^2)$, n_{d-new} , $A_{r-new}(m^2)$ και U_{S-new} . Η ΜΗΑ (n_{d-new}) και ο ΣΘΑ (U_{S-new}) υπολογίζονται απευθείας από το πρόβλημα πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης (3.16) (Διαγράμματα 3.3, 3.4). Για τον υπολογισμό των $A_{\alpha-new}(m^2)$ και $A_{r-new}(m^2)$ ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Καταρχάς για την επιφάνεια ανοίγματος της ηλιακής συσκευής $A_{\alpha-new}(m^2)$ θα ισχύει:

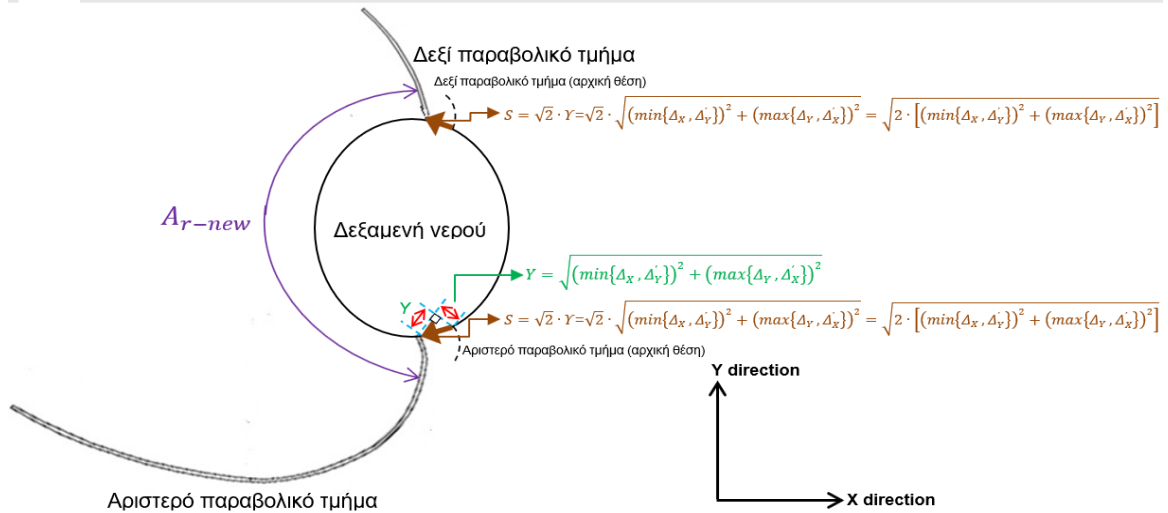
$$\begin{aligned}
A_{\alpha-new}(m^2) = A_{\alpha}(m^2) - (2 \cdot Y(m) \cdot l(m)) = OG_W - \left[\left(2 \cdot \right. \right. \\
\left. \left. \sqrt{(\min\{\Delta_X, \Delta'_Y\})^2 + (\max\{\Delta_Y, \Delta'_X\})^2} \right) \cdot l(m) \right]
\end{aligned}
\tag{3.87}$$

Όπου $l(m)$ είναι το μήκος του κατόπτρου (κατά τον άξονα Z), $A_{\alpha}(m^2)$ η επιφάνεια ανοίγματος του πρότυπου συστήματος (εξίσωση 2.1, κεφάλαιο 2.3) και τα $OG_W, \Delta_X, \Delta_Y, \Delta'_X, \Delta'_Y$ προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.80) και (3.74) - (3.77) αντίστοιχα.

Για τη περίπτωση της επιφάνειας απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας $A_{r-new}(m^2)$ θα ισχύει:

$$\begin{aligned}
A_{r-new}(m^2) &= A_r(m^2) - (2 \cdot S(m) \cdot l(m)) = A_r(m^2) - \left(2 \cdot \sqrt{Y(m)^2 + Y(m)^2} \cdot l(m) \right) = \\
A_r(m^2) &- \left(2 \cdot \sqrt{2 \cdot Y(m)} \cdot l(m) \right) = A_r(m^2) - \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot Y(m) \cdot l(m) \right) = A_r(m^2) - \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot \right. \\
&\left. \sqrt{(\min\{\Delta_X, \Delta'_Y\})^2 + (\max\{\Delta_Y, \Delta'_X\})^2} \cdot l(m) \right) = A_r(m^2) - \left(2 \cdot \right. \\
&\left. \sqrt{2 \cdot [(\min\{\Delta_X, \Delta'_Y\})^2 + (\max\{\Delta_Y, \Delta'_X\})^2]} \cdot l(m) \right) \quad (3.88)
\end{aligned}$$

Θα είναι πάλι $l(m)$ το μήκος του κατόπτρου (κατά τον άξονα Z), $A_r(m^2)$ η επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας του πρότυπου συστήματος (εξίσωση 2.1, κεφάλαιο 2.3) και τα $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta'_X, \Delta'_Y$ προκύπτουν από τις (3.74) - (3.77) αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκε πριν. Ο υπολογισμός του μήκους $S(m)$ πάνω στην επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται σύμφωνα με το σχήμα 3.10:



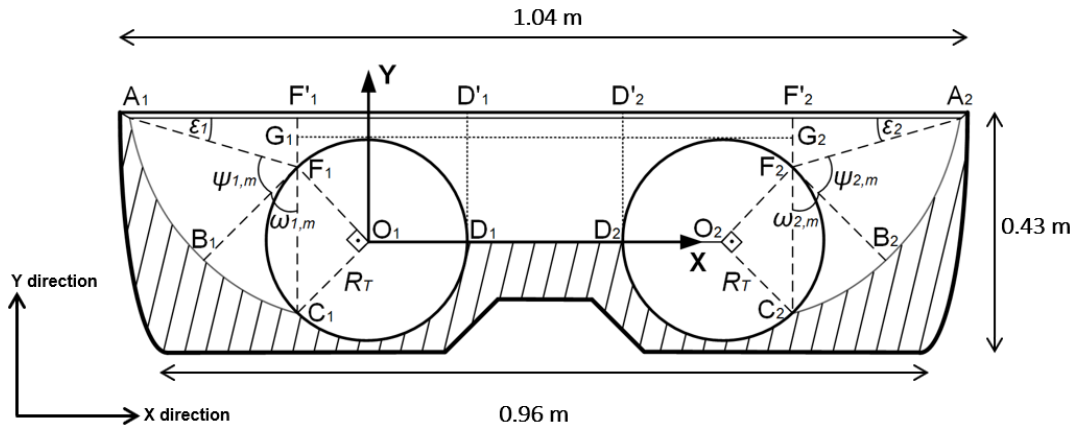
Σχήμα 3.10: Υπολογισμός μήκους $S(m)$ (στο XY επίπεδο) που αντιστοιχεί στη μείωση της επιφάνειας απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας $A_{r-new}(m^2)$ του σχεδιαζόμενου από τον αλγόριθμο συστήματος ICS.

Κανονικά το μήκος $S(m)$ αντιστοιχεί σε τόξο κύκλου (κυκλική βάση δεξαμενής νερού χρήσης). Επειδή όμως το μήκος αυτό είναι πολύ μικρό και για διευκόλυνση των υπολογιστικών πράξεων γίνεται η παραδοχή ότι είναι ευθύγραμμο τμήμα και υπολογίζεται με χρήση πυθαγόρειου θεωρήματος [124] όπου στο νοητό ορθογώνιο τρίγωνο που σχηματίζεται οι δύο κάθετες πλευρές είναι κάθε μία ίση με το μήκος $Y(m)$ που υπολογίστηκε στην εξίσωση (3.78) – εφόσον το μήκος $Y(m)$ που προσθαφαιρείται από τις αρχικές διαστάσεις θεωρείται ίδιο και για τις δύο πλευρές (αριστερά – δεξιά) όπως επίσης και κατά την οριζόντια αλλά και την κατακόρυφη διεύθυνση του συστήματος και το μήκος $S(m)$ που αντιστοιχεί στη μείωση της επιφάνειας απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας θα θεωρείται αντίστοιχα ίδιο και για τις δύο πλευρές της δεξαμενής νερού (σχήμα 3.10). Συνεπώς, το διπλάσιο γινόμενο του μήκους $S(m)$ επί το μήκος $l(m)$ αφαιρείται από την αρχική επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας

$A_r(m^2)$ αφού το νέο κάτοπτρο που προκύπτει, το οποίο είναι μικρότερο σε διαστάσεις σε σχέση με το αρχικό κάτοπτρο, τοποθετείται λίγο ψηλότερα στο νέο σύστημα ICS (υψηλότερο σύστημα).

3.3 Βέλτιστη σχεδίαση συστήματος ICS με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης σε σειρά

Το πρότυπο σύστημα ICS με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης [45] παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2:



Εικόνα 3.2: Τομή πρότυπου ηλιακού θερμικού συστήματος (ICS) με συμμετρικούς ανακλαστήρες και δύο δεξαμενές νερού χρήσης με καθορισμό παραμέτρων σχεδίασης [45].

Θα είναι σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία [45]:

Παραβολικό τμήμα (A_1B_1)

$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T \cdot \left[1 + \frac{4}{1+\cos\psi_1} \cdot \sin\left(\psi_1 + \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ y &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T \cdot \left[1 - \frac{4}{1+\cos\psi_1} \cdot \cos\left(\psi_1 + \frac{\pi}{4}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{με} \quad 0 \leq \psi_1 \leq 61.48^\circ \quad (3.89)$$

Κυκλικό τμήμα (B_1C_1)

$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T \cdot [1 + 2 \cdot \sin(\omega_1)] \\ y &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T \cdot [1 - 2 \cdot \cos(\omega_1)] \end{aligned} \right\} \quad \text{με} \quad 0 \leq \omega_1 \leq 45^\circ \quad (3.90)$$

Κυκλικό τμήμα (C_2B_2)

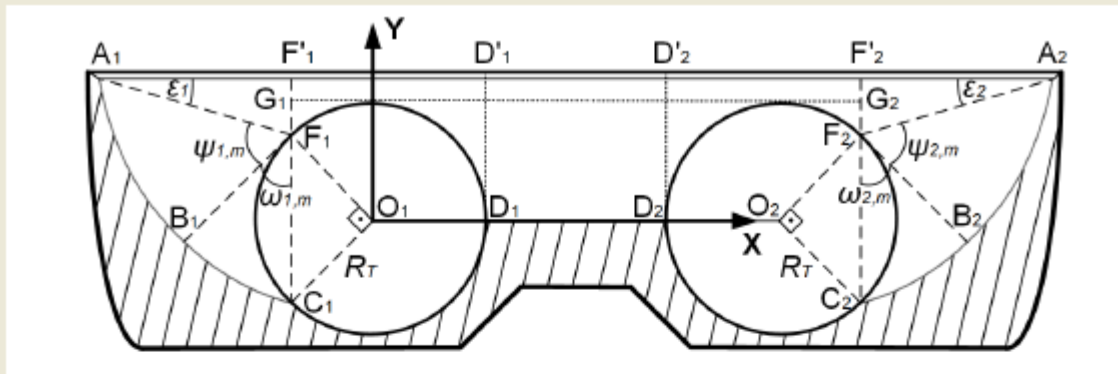
$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T \cdot [1 + 2 \cdot \sin(\omega_1)] \\ y &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T \cdot [1 - 2 \cdot \cos(\omega_1)] \end{aligned} \right\} \quad \text{με} \quad 0 \leq \omega_1 \leq 45^\circ \quad (3.91)$$

Παραβολικό τμήμα (B_2A_2)

$$\left. \begin{aligned} x &= \left[6 + \sqrt{2} \cdot \left[1 + \frac{4}{1+\cos\psi_2} \cdot \sin\left(\psi_2 + \frac{\pi}{4}\right) \right] \right] \cdot \frac{R_T}{2} \\ y &= \left[6 + \sqrt{2} \cdot \left[1 - \frac{4}{1+\cos\psi_2} \cdot \cos\left(\psi_2 + \frac{\pi}{4}\right) \right] \right] \cdot \frac{R_T}{2} \end{aligned} \right\} \quad \text{με} \quad 0 \leq \psi_2 \leq 61.48^\circ \quad (3.92)$$

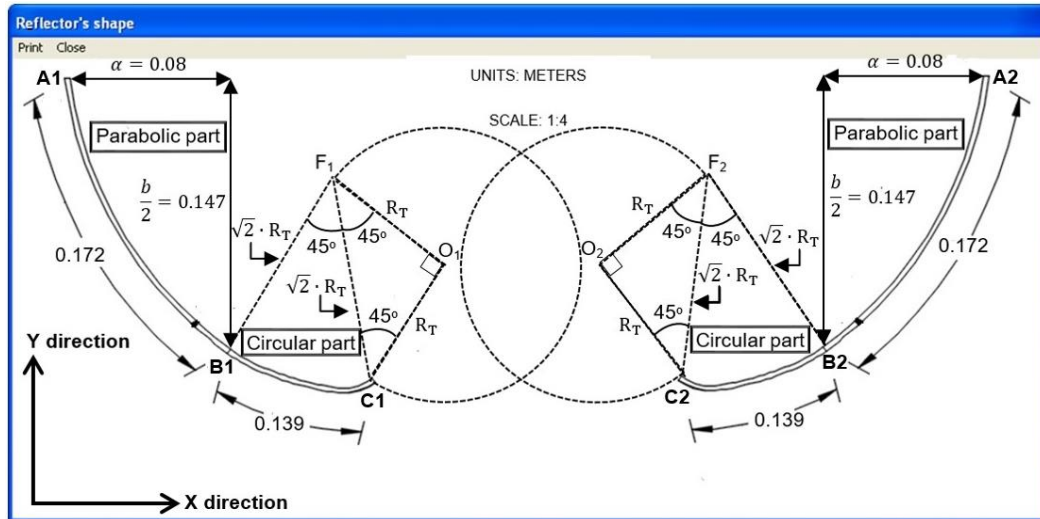
Όπου R_T είναι η ακτίνα των βάσεων των δεξαμενών νερού χρήσης.

Η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, για το σύστημα με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης, είναι όμοια με την αντίστοιχη που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2 συνεπώς δεν θα αναλυθούν λεπτομέρειες που αφορούν τις ΑΣ ή τον αλγόριθμο επίλυσης. Θα απεικονιστούν μόνο τα αποτελέσματα του αλγόριθμου για τη κλιματική ζώνη της Κρήτης και αριθμό ενοίκων $n = 8$ (λόγω της μεγάλης συλλεκτικής επιφάνειας της συγκεκριμένης ηλιακής συσκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ζεστού νερού περισσότερων ενοίκων). Χρησιμοποιώντας το GUI περιβάλλον του σχήματος 3.1 τα ενεργειακά, περιβαλλοντικά (παραγόμενη θερμική ενέργεια και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου) και γεωμετρικά αποτελέσματα (βέλτιστες διαστάσεις κατόπτρου) του παραπάνω συστήματος δίνονται στις εικόνες 3.3 και 3.4 αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού του κατόπτρου (εξισώσεις καθορισμού ανοιγμάτων του ανακλαστήρα κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση της ηλιακής συσκευής) και των επί μέρους τμημάτων του συστήματος γιατί υπάρχουν διαφορές σε σχέση με το σύστημα με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού (ειδικά στο ότι αφορά τη μαθηματική εξίσωση ΕΕΚΜΤΠ του ανακλαστήρα αλλά και στις αλγεβρικές πράξεις που δίνουν τις διαστάσεις και τη μορφή των επί μέρους τμημάτων του ηλιακού θερμικού συστήματος).



| | | |
|---|----------------------|-------------------|
| Climate zone: | Crete | |
| Number of occupants in the building: | 8 | |
| Desired temperature in Celsius degrees: | 45 | |
| Length of the reflector: | 1.5 m | |
| Total capacity of the water tanks (lt) : | 280 lt | |
| Material of the transparent cover : | low iron oxide glass | |
| Material of the reflector : | Aluminized mylar | |
| Material of the tank : | Steel painted black | |
| Produced thermal energy (MWh) : | 4.7787 | Three ICS systems |
| Annual emission reduction (tn CO ₂) : | 0.93 | |
| Production cost of the ICS water heater : | 1235.358 Euros | |

Εικόνα 3.3: Παραγόμενη θερμική ενέργεια και κόστος παραγωγής για τρία συστήματα ICS με συμμετρικό κάτοπτρο που φέρουν δύο δεξαμενές νερού σε σειρά για τη κλιματική ζώνη της Κρήτης ($n = 8$).



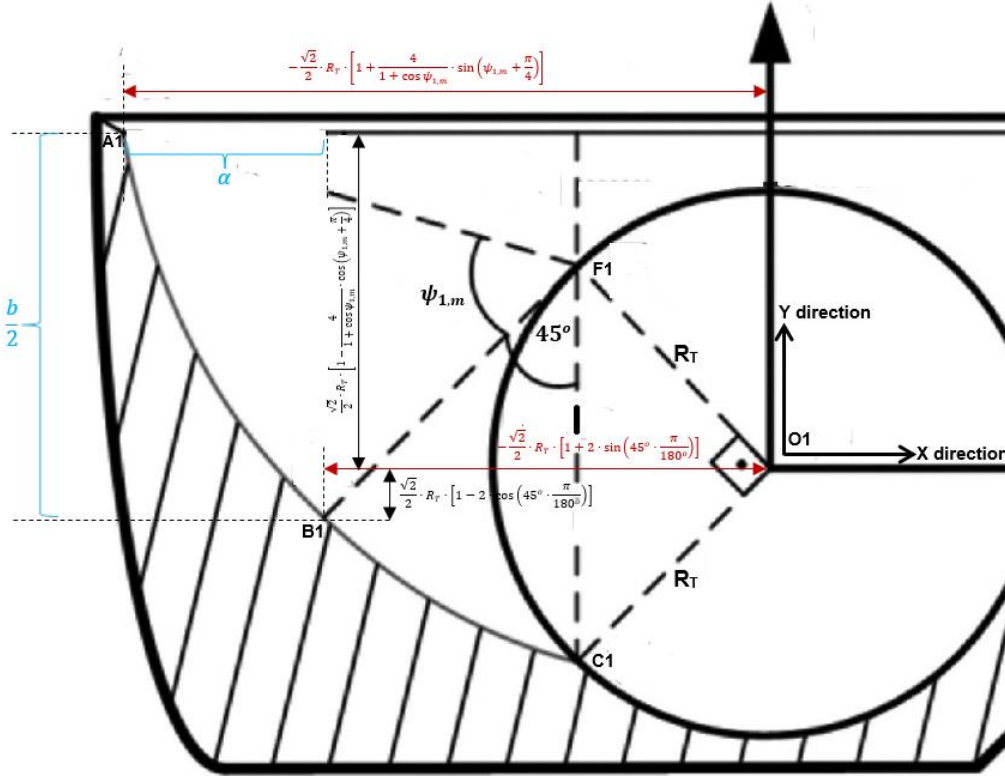
Εικόνα 3.4: Βέλτιστες διαστάσεις κατόπτρου για σύστημα ICS με συμμετρικό κάτοπτρο που φέρει δύο δεξαμενές νερού σε σειρά για τη κλιματική ζώνη της Κρήτης ($n = 8$).

Για τα παραβολικά τμήματα $\overline{A_1B_1}$ και $\overline{A_2B_2}$ (Εικόνα 3.4) θα ισχύει η ακόλουθη ΕΕΚΜΤΠ [123]:

$$2 \cdot \overline{A_1B_1} = 2 \cdot \overline{A_2B_2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{b^2 + 16a^2} + \frac{b^2}{8a} \cdot \ln \left(\frac{4a + \sqrt{b^2 + 16a^2}}{b} \right)$$

$$\Rightarrow \overline{A_1B_1} = \overline{A_2B_2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{b^2 + 16a^2} + \frac{b^2}{8a} \cdot \ln \left(\frac{4a + \sqrt{b^2 + 16a^2}}{b} \right) \right] \quad (3.93)$$

Όπου a και $\frac{b}{2}$ είναι οι οριζόντιες και κάθετες διαστάσεις των ανοιγμάτων των παραβολικών τμημάτων $\overline{A_1B_1}$ και $\overline{A_2B_2}$, στο ΧΥ επίπεδο, αντίστοιχα οι οποίες υπολογίζονται συνδυάζοντας την υπάρχουσα βιβλιογραφία [45] με την εικόνα 3.2 συνεπώς θα προκύψει το διάγραμμα 3.5 και σύμφωνα με αυτό οι ακόλουθες εξισώσεις ((3.94) και (3.95)):



Διάγραμμα 3.5: Διαστάσεις των ανοιγμάτων α και $\frac{b}{2}$ αντίστοιχα (στο XY επίπεδο) του παραβολικού τμήματος $\widehat{A_1B_1}$ [45].

$$\alpha(m) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T(m) \cdot \left\{ \left[1 + \frac{4}{1+\cos\psi_{1,m}} \cdot \sin\left(\psi_{1,m} + \frac{\pi}{4}\right) \right] - \left[1 + 2 \cdot \sin\left(45^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \right] \right\} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T(m) \cdot \left[-1.414 + \frac{4}{1+\cos\psi_{1,m}} \cdot \sin\left(\psi_{1,m} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (3.94)$$

$$\frac{b}{2}(m) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T(m) \cdot \left\{ \left[1 - \frac{4}{1+\cos\psi_{1,m}} \cdot \cos\left(\psi_{1,m} + \frac{\pi}{4}\right) \right] + \left[1 - 2 \cdot \cos\left(45^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \right] \right\} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R_T(m) \cdot \left[0.585 - \frac{4}{1+\cos\psi_{1,m}} \cdot \cos\left(\psi_{1,m} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (3.95)$$

Θα είναι $\pi = 3.14159$ [123] έτσι ώστε η γωνία $\widehat{B_1F_1C_1}$ (Διάγραμμα 3.5), στις προηγούμενες εξισώσεις, να υπολογίζεται σε ακτίνια. Επιπλέον $R_T(m)$ ορίζεται ως η ακτίνα της κυκλικής βάσης για κάθε δεξαμενή νερού του συστήματος ICS [45]. Και πρέπει ακόμα να επισημανθεί ότι και η γωνία $\psi_{1,m}$ (μέγιστη γωνία συμμετρικού παραβολικού κατόπτρου) στις εξισώσεις (3.94), (3.95) (Διάγραμμα 3.5) υπολογίζεται από το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε ακτίνια.

Τα κυκλικά τμήματα B_1C_1 και B_2C_2 στην εικόνα 3.4 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση μήκους τόξου κυκλικού τομέα [123]. Οι γωνίες $\widehat{B_1F_1C_1}$, $\widehat{B_2F_2C_2}$ είναι ίσες με τις παρά τη βάση γωνίες των ισοσκελών ορθογωνίων τριγώνων $F_1O_1C_1$ και $F_2O_2C_2$ ($\widehat{B_1F_1C_1} = \widehat{O_1F_1C_1} = \widehat{O_1C_1F_1} = \widehat{B_2F_2C_2} = \widehat{O_2F_2C_2} = \widehat{O_2C_2F_2} = 45^\circ$). Οι πλευρές F_1O_1 , O_1C_1 , F_2O_2 και O_2C_2 αυτών των

τριγώνων καθώς επίσης και τα σημεία O_1, O_2 είναι οι ακτίνες και τα κέντρα αντίστοιχα [45] των κυκλικών βάσεων των δύο δεξαμενών νερού του συστήματος ICS (Διάγραμμα 3.5).

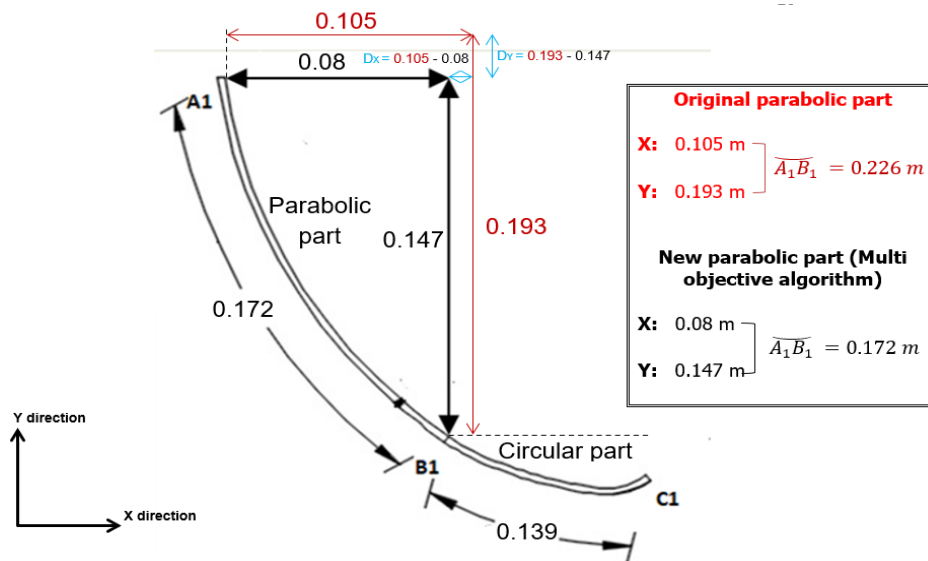
$$B_1C_1 = B_2C_2 = \sqrt{2} \cdot R_T(m) \cdot \widehat{B_1F_1C_1} \cdot \frac{\pi}{180} = \sqrt{2} \cdot R_T(m) \cdot \widehat{B_2F_2C_2} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (3.96)$$

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία [45] μόνο τα παραβολικά τμήματα του ανακλαστήρα μπορούν να αλλάξουν σε διαστάσεις κατά τη βελτιστοποίηση και τη σχεδίαση νέων συστημάτων ICS. Αντίθετα τα κυκλικά τμήματα παραμένουν σταθερά. Συνεπώς, οι γωνίες $\widehat{B_1F_1C_1}$ και $\widehat{B_2F_2C_2}$ δε μεταβάλλονται ($\widehat{B_1F_1C_1} = \widehat{B_2F_2C_2} = 45^\circ$) [45].

Τελικά, το συνολικό μήκος (σε μέτρα) της καμπύλης του παραβολικού ανακλαστήρα (στο XY επίπεδο) θα είναι:

$$W_{CPC}(m) = 2 \cdot (\overline{A_1B_1} + B_1C_1) = 2 \cdot (\overline{A_2B_2} + B_2C_2) \quad (3.97)$$

Η σύγκριση μεταξύ του νέου παραβολικού τμήματος (που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση) στο XY επίπεδο (για το αριστερό τμήμα του παραβολικού ανακλαστήρα) με βάση τα αποτελέσματα του αλγόριθμου και την υπάρχουσα βιβλιογραφία [45], παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11:



Σχήμα 3.11. Σύγκριση μεταξύ νέων και αρχικών διαστάσεων (στο XY επίπεδο).

Το συγκεκριμένο σχήμα επιπροσθέτως απεικονίζει τις διαφορές (σε μέτρα στο XY επίπεδο) που προκύπτουν αν αφαιρεθούν οι καινούργιες διαστάσεις, για το παραβολικό τμήμα, από τις αρχικές διαστάσεις του συστήματος της βιβλιογραφίας (εξισώσεις (3.98), (3.99)):

$$D_x = 0.105 - 0.08 = 0.025 \text{ m} \quad (3.98)$$

$$D_y = 0.193 - 0.147 = 0.046 \text{ m} \quad (3.99)$$

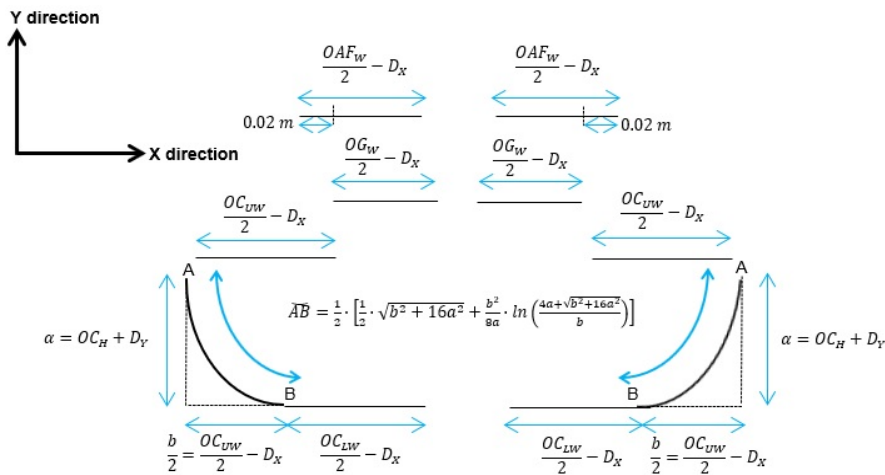
Όπως παρατηρείται από το σχήμα 3.11 το κάτοπτρο του νέου «σχεδιαζόμενου» από τη διαδικασία βελτιστοποίησης ICS συστήματος είναι μικρότερο σε διαστάσεις σε σχέση με το

αρχικό κάτοπτρο του πρότυπου συστήματος [45], όπως και στη περίπτωση του συστήματος με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το επόμενο βήμα θα είναι ο υπολογισμός των διαστάσεων, πάλι στο ΧΥ επίπεδο, των υπόλοιπων τμημάτων του νέου συστήματος ICS (πρόσοψη) με βάση τις εξισώσεις (3.98) και (3.99). Αρχικά θα αφαιρεθεί η διαφορά κατά τη Χ κατεύθυνση (D_X) από τα πλάτη των αρχικών διαστάσεων του πλαισίου αλουμινίου και της διάφανης επιφάνειας αντίστοιχα (Σχήμα 3.12). Όμοια για το εξωτερικό κάλυμμα, αφαιρείται η διαφορά κατά τη Χ κατεύθυνση (D_X) από το πάνω και κάτω πλάτος αντίστοιχα του καλύμματος (Σχήμα 3.12). Αντίθετα, κατά τη Υ κατεύθυνση, προστίθεται η διαφορά D_Y στο αρχικό ύψος του εξωτερικού καλύμματος και έτσι με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα υψηλότερο σύστημα ICS το οποίο σημαίνει λιγότερες θερμικές απώλειες στη δεξαμενή νερού [120], [24], [25], [93], [59], [45].

Κατά τη Ζ κατεύθυνση δε λαμβάνει χώρα καμία μεταβολή στις διαστάσεις ούτε του παραβολικού ανακλαστήρα αλλά και των υπολοίπων τμημάτων του νέου συστήματος, σε σύγκριση πάντα με το αρχικό σύστημα ICS.

Προκειμένου να γίνει η σχεδίαση της αριστερής και δεξιάς πλευράς (\overline{AB}) της πρόσοψης του εξωτερικού καλύμματος θα χρησιμοποιηθεί πάλι η εξίσωση (3.93) (μήκος τόξου παραβολής) [123] με $\alpha = OC_H + D_Y$, $\frac{b}{2} = \frac{OC_{UW}}{2} - D_X$ και OC_H , OC_{UW} να είναι το αρχικό ύψος και πλάτος (της πάνω πλευράς) αντίστοιχα του εξωτερικού καλύμματος στο ΧΥ επίπεδο (Σχήμα 3.12):



OAF_w : Original ICS Aluminium Frame Width (m)

OG_w : Original ICS transparent cover (Glass) Width (m)

OC_{uw} : Original ICS Casing Upper Width (m)

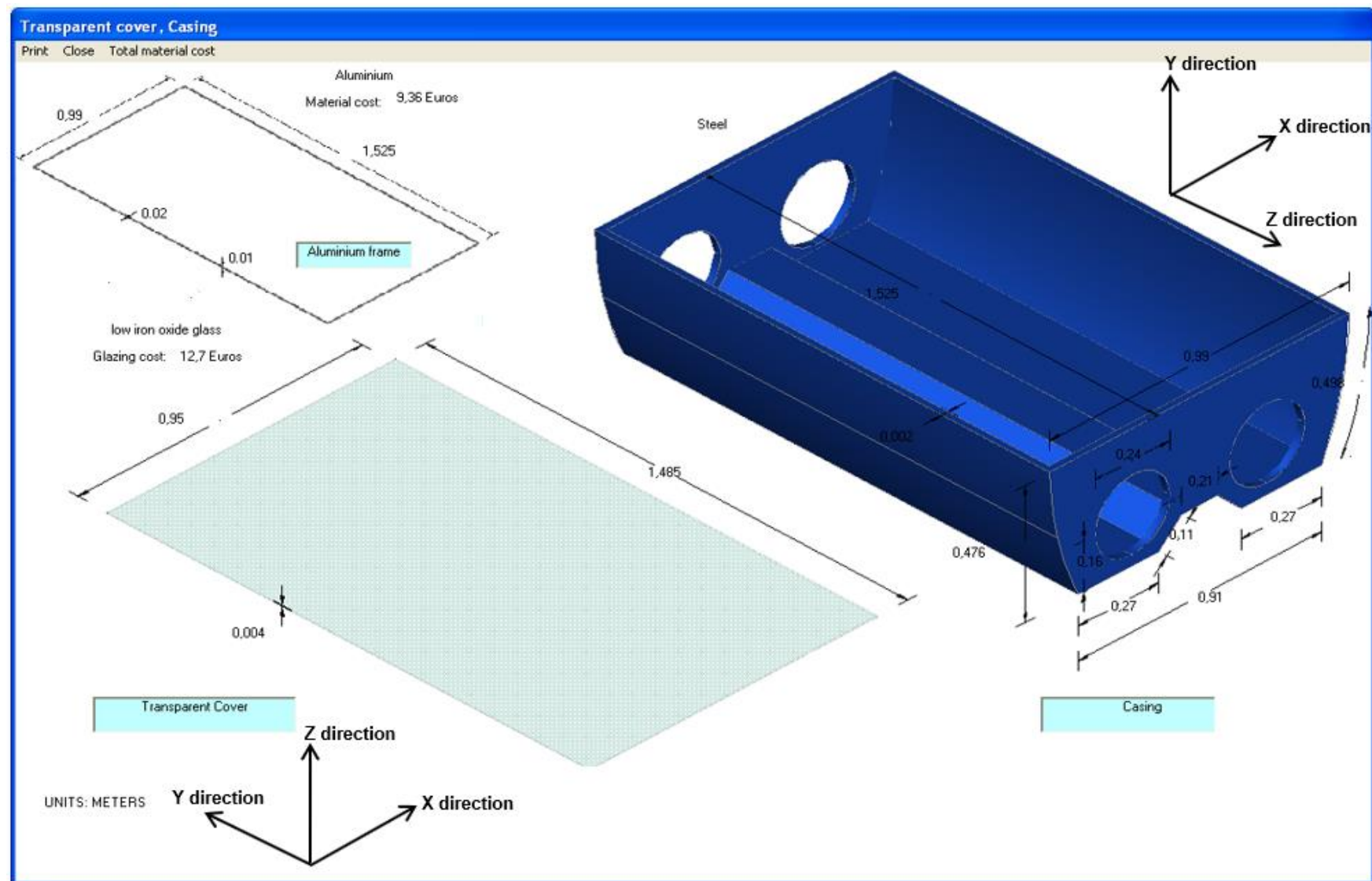
OC_H : Original ICS Casing Height (m)

OC_{LW} : Original ICS Casing Lower Width (m)

Σχήμα 3.12. Διαμόρφωση πρόσοψης του ICS συστήματος (στο ΧΥ επίπεδο) που προκύπτει από το πρόβλημα βελτιστοποίησης [123], [45].

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί οδηγούν τελικά στα τελικά σχέδια (Εικόνα 3.5) για το νέο σύστημα ICS για τη κλιματική ζώνη της Κρήτης και $n = 8$. Είναι προφανές ότι το νέο σύστημα θα είναι μικρότερο σε διαστάσεις, συνεπώς οικονομικότερο, σε σχέση με το πρότυπο ICS σύστημα [45].

Ακολουθώντας όμοια διαδικασία, όπως αυτή που εφαρμόστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η παραγόμενη θερμική ενέργεια καθώς και η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) και ο χρόνος αποπληρωμής (Payback Period) για μία μονάδα συστήματος ICS με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού χρήσης θα είναι αντίστοιχα $Q = 1.59 \text{ MWh / Year}$, ΚΠΑ = 99.78 Ευρώ και Payback Period = 7.3 έτη. Η αρκετά μικρότερη ΚΠΑ και ο μεγάλος χρόνος αποπληρωμής (σε σχέση με το σύστημα με το ασύμμετρο κάτοπτρο – Πίνακας 3.3) οφείλονται στο μεγάλο κόστος παραγωγής της μίας μονάδας συστήματος ICS (Εικόνα 3.3: $C_p = \frac{1235.358}{3} = 411.786 \text{ Ευρώ}$) η οποία οδηγεί σε υψηλή τιμή πώλησης του συγκεκριμένου συστήματος στην αγορά ηλιακών θερμικών συστημάτων.

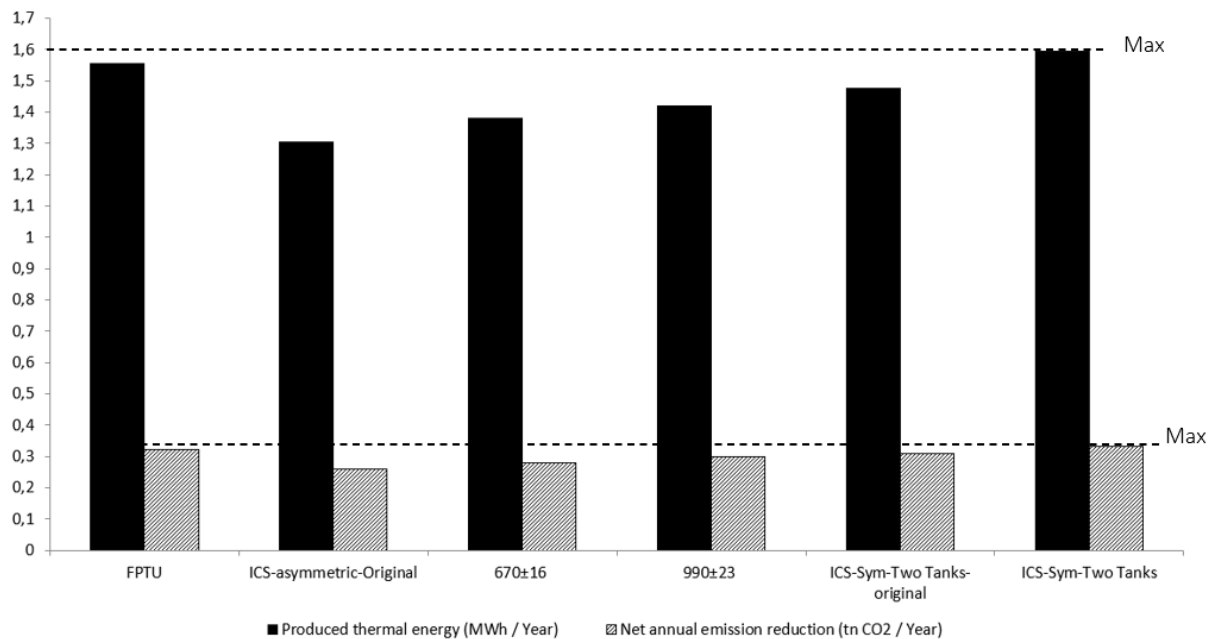


Εικόνα 3.5: Τελικές διαστάσεις του σχεδιαζόμενου από τον αλγόριθμο συστήματος ICS, για τη κλιματική ζώνη της Κρήτης και $n = 8$.

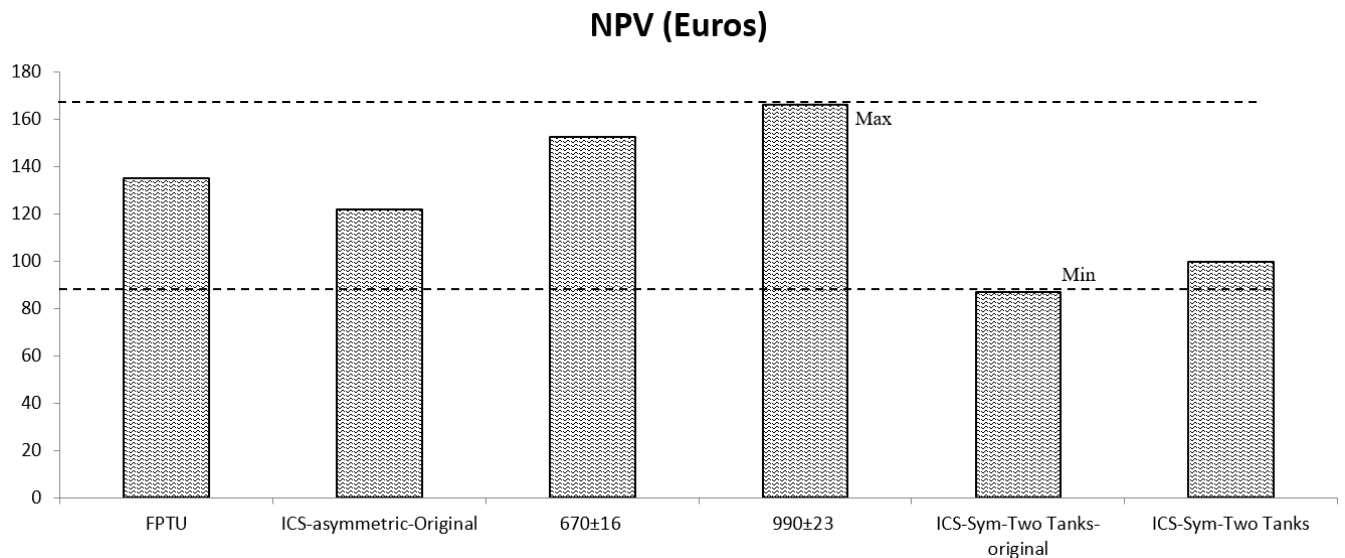
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.Τεχνοοικονομική ανάλυση συνολικών συστημάτων

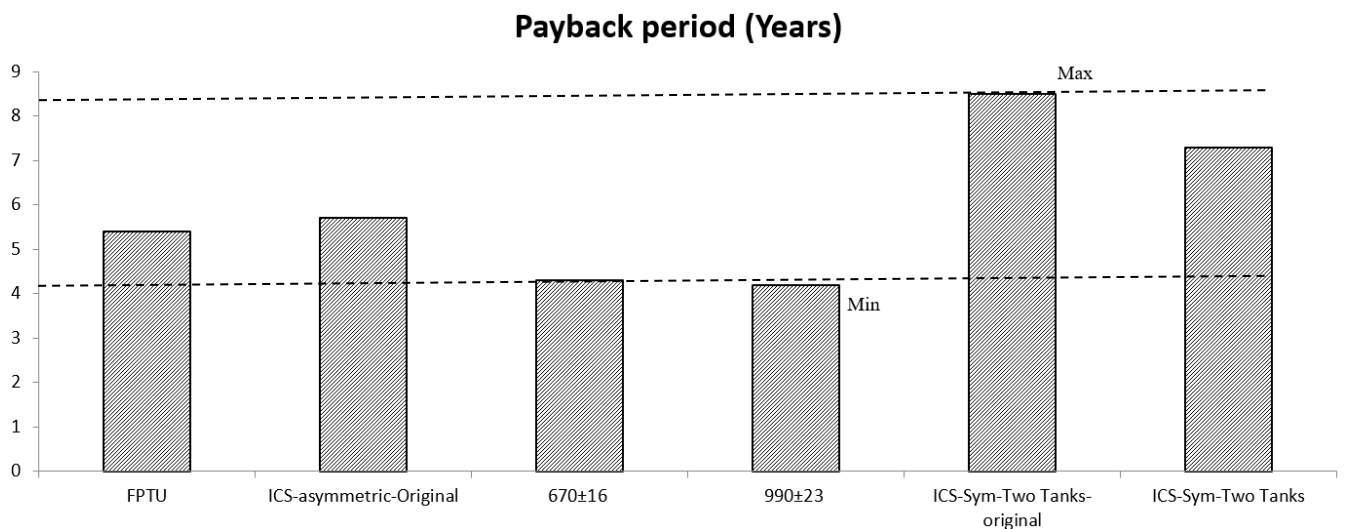
Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου προκύπτουν τα Διαγράμματα 4.1 - 4.3. Στα διαγράμματα αυτά θα γίνει η Τεχνοοικονομική ανάλυση ($Q_{THE}/Year$ - NAER, NPV & Payback period) μίας μονάδας, από τα σχεδιαζόμενα από τον αλγόριθμο ICS συστήματα (κεφάλαια 3.2 και 3.3), σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πρότυπα τους [59], [45] καθώς και με το FPTU σύστημα [114] που μελετήθηκε στα διαγράμματα 3.1 (Περιβαλλοντικό φορτίο στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης) και 3.3 (ΜΗΑ) & 3.4 (ΣΘΑ) των κεφαλαίων 3.1, 3.2. Η σύγκριση αυτή θα γίνει για την περιοχή της Κρήτης (καλύτερη περίπτωση που προκύπτει από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και για τα δύο σχεδιαζόμενα ICS συστήματα, σύμφωνα με τα κεφάλαια 3.2 και 3.3):



Διάγραμμα 4.1: Σύγκριση ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και ετήσιου δείκτη μείωσης αερίων εκπομπών.



Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας.



Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση χρόνου αποπληρωμής.

Από το διάγραμμα 4.1 παρατηρείται ότι για τη περίπτωση των συστημάτων με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού η καλύτερη επιλογή είναι αυτή με αρχική συνολική πίεση 990 ± 23 mbar (at 24 ± 1 °C). Αυτή η επιλογή γίνεται βάσει του συνδυασμού ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης αφού φαίνεται από το διάγραμμα ότι παρόλο που η ετήσια παραγόμενη ενέργεια των ICS είναι σχετικά μικρότερη από την αντίστοιχη του FPTU συστήματος, το σύστημα 990 ± 23 mbar χρησιμοποιείται με σχεδόν με την ίδια συχνότητα (ο δείκτης αερίων εκπομπών πλησιάζει πολύ κοντά τον αντίστοιχο δείκτη του FPTU συστήματος) για τη παραγωγή ζεστού νερού στη κατοικία (έναντι του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα) με το FPTU σύστημα. Η ενεργειακή ανάλυση που απεικονίζεται στο διάγραμμα 4.1 δείχνει ότι υπάρχει βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος με ασύμμετρο κάτοπτρο, σε σχέση με το αντίστοιχο πρότυπο του (ICS-asymmetric-Original) της τάξης του 8.81%. Η βελτίωση αυτή σίγουρα δεν είναι πολύ μεγάλη αλλά λαβαίνοντας υπόψιν τις μεγάλες θερμικές απώλειες της

δεξαμενής νερού χρήσης (σε σχέση με τα FPTU), η οποία δεν μονώνεται πλήρως [25] αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στην όλη προσπάθεια κατασκευής ICS συστημάτων που προσεγγίζουν σε επιδόσεις τα FPTU της αγοράς.

Επίσης από τα διαγράμματα 4.2 και 4.3 η καλύτερη επιλογή, για όλα γενικά τα συστήματα, είναι το σύστημα με αρχική συνολική πίεση 990 ± 23 mbar (at 24 ± 1 °C). Η μεγαλύτερη καθαρή παρούσα αξία και ο μικρότερος χρόνος αποπληρωμής στα διαγράμματα αυτά σημαίνουν ότι το συγκεκριμένο σύστημα αποσβαίνει γρηγορότερα τα χρήματα του (στο στάδιο χρήσης) σε σχέση με όλα τα άλλα ηλιακά θερμικά συστήματα. Το σύστημα με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά εμφανίζει να μεν τη καλύτερη ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση (Διάγραμμα 4.1) από όλα τα υπό μελέτη συστήματα (ακόμα και από το FPTU σύστημα κυρίως λόγω της μεγάλης συλλεκτικής επιφάνειας που διαθέτει) αλλά λόγω της υψηλής τιμής αγοράς (επειδή είναι μεγαλύτερο σε συνολικό μέγεθος χρησιμοποιεί μεγαλύτερες ποσότητες υλικών κατασκευής συνεπώς έχει μεγαλύτερο κόστος παραγωγής – φαίνεται και στο κεφάλαιο 3.3 - άρα και τιμή πώλησης) που διαθέτει (τιμή που δεν ισοσκελίζεται από την ενεργειακή του απόδοση) εμφανίζει τη μικρότερη καθαρή παρούσα αξία και το μεγαλύτερο χρόνο αποπληρωμής από όλα τα υπό μελέτη συστήματα (μπορεί δηλαδή να παράγει το μεγαλύτερο θερμικό φορτίο αλλά η δαπάνη κατασκευής του είναι τέτοια που δεν επιτρέπει να προκύπτει ουσιαστικό κέρδος από τη χρήση του στη διάρκεια του χρόνου λειτουργικής ζωής του). Η ενεργειακή ανάλυση του διαγράμματος 4.1 για το σύστημα με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά δείχνει ότι υπάρχει βελτίωση στην απόδοση του συστήματος αυτού, σε σχέση με το πρότυπο του (ICS-Sym-Two Tanks-original) της τάξης του 7.84% που και αυτή δεν είναι πολύ μεγάλη αλλά ειδικά στην περίπτωση του συγκεκριμένου συστήματος οι θερμικές απώλειες στις δεξαμενές νερού χρήσης είναι ακόμα μεγαλύτερες [45] γιατί σε αυτές δεν εφαρμόζεται η τεχνική μείωσης των θερμικών απωλειών με διαφοροποίηση της συνολικής πίεσης στο διάκενο του διπλού δοχείου νερού, που υπάρχει στα ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο που μελετώνται στη παρούσα εργασία [59].

Συνεπώς εκείνο που επιτυγχάνεται κυρίως μέσα από τη διαδικασία της βέλτιστης σχεδίασης και φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι η βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των σχεδιαζόμενων από τον αλγόριθμο ICS συσκευών, ακόμα και του συστήματος με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δοχεία νερού χρήσης (σε σχέση πάντα με τα αντίστοιχα πρότυπα τους), με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της απόδοσης των συμβατικών ηλιακών θερμικών συστημάτων της αγοράς.

Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκε μια λεπτομερή τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική μελέτη (σε ολόκληρο το κύκλο ζωής) καθώς και μια διαδικασία βέλτιστης σχεδίασης ICS συστημάτων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ζεστού νερού σε κατοικίες που βρίσκονται στον Ελλαδικό χώρο. Τα πρότυπα ICS συστήματα που χρησιμοποιούνται σαν βάση στη διαδικασία σχεδίασης είναι α) ένα σύστημα με ασύμμετρο παραβολικό κάτοπτρο που φέρει δεξαμενή η οποία διαθέτει διπλό τοίχωμα (δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία). Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των δύο κυλινδρικών δοχείων βρίσκεται υπό μερικό κενό, ενώ υπάρχει επίσης μια μικρή ποσότητα νερού (στο κάτω μέρος του εξωτερικού δοχείου), το οποίο λειτουργεί ως υλικό αλλαγής φάσης (PCM) και αποτελεί το μέσο θέρμανσης του νερού χρήσης, μέσω του μηχανισμού της εξάτμισης – συμπύκνωσης β) ένα σύστημα με συμμετρικό παραβολικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά.

Αρχικά δημιουργείται, με βάση μία παλαιότερη τεχνική διαδοχικής αναζήτησης της βέλτιστης τιμής ενός μη γραμμικού προβλήματος, μία καινούργια μέθοδος μη γραμμικής πολυστοχαστικής βελτιστοποίησης (Nonlinear Multi-Objective Optimization) με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των υπό μελέτη συστημάτων. Η δημιουργία αυτής της μεθόδου κρίνεται απαραίτητη λόγω της ύπαρξης περισσότερων τους ενός αντικειμενικών συναρτήσεων από τη στιγμή που απαιτούνται συστήματα με βέλτιστες (optimum) επιδόσεις σε όλους τους «τομείς». Επιπλέον λόγω της φύσης και της πολυπλοκότητας του προβλήματος δεν υπάρχει «έτοιμη» κατάλληλη τεχνική που θα μπορούσε να διευκολύνει την επίλυση του πολυστοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης σε σύντομο σχετικά χρόνο. Γενικά η πολυστοχαστική βελτιστοποίηση δεν μπορεί να τυποποιηθεί εφόσον μοντελοποιεί «ρεαλιστικές» καταστάσεις που εξαρτώνται από περισσότερων του ενός απρόβλεπτα φαινόμενα ή περιοχές διερεύνησης. Επίσης πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι αντικειμενικές συναρτήσεις τέτοιου τύπου προβλημάτων, αποτελούνται σχεδόν πάντα από μη γραμμικές μεταβλητές γεγονός που κάνει ακόμα πιο απαραίτητη τη δημιουργία πρωτότυπων τεχνικών επίλυσης τους.

Με τη βοήθεια αυτής της μεθόδου γίνεται η σχεδίαση της παραβολικής επιφάνειας του ανακλαστήρα των υπό μελέτη ICS συστημάτων καθώς και του ελάχιστου αριθμού μονάδων που θα τοποθετηθούν σε μία οικία σε συνάρτηση με τον αριθμό των ενοίκων και τη κλιματική ζώνη εγκατάστασης. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή μεγιστοποιείται η ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής παράγουν νέα βελτιωμένα ICS συστήματα τα οποία τείνουν να πλησιάσουν (ή και να ξεπεράσουν ακόμα) σε ενεργειακή απόδοση τα ηλιακά θερμικά συστήματα με επίπεδο συλλέκτη που έχουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς. Ειδικότερα όταν τα ICS συστήματα εγκατασταθούν σε νοτιότερες περιοχές προκύπτει η μεγαλύτερη βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση των νέων συστημάτων (της τάξης των 8.81% και 7.84% για ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και ICS με συμμετρικό κάτοπτρο αντίστοιχα) σε σχέση με τα αντίστοιχα πρότυπα τους. Η χρήση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στη

παρούσα εργασία για τη σχεδίαση της παραβολικής επιφάνειας διευκολύνει σε σημαντικό βαθμό τη κατασκευή των νέων ICS συστημάτων γιατί συνδυάζεται με περιβάλλοντα CAD που μοντελοποιούν καλύτερα και ευκολότερα τη πολύπλοκη γεωμετρία των παραβολικών κατόπτρων (CPC) που διαθέτουν αυτά τα συστήματα.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός «στόχος» η μελέτη του οποίου ήταν απαραίτητη στην κατασκευή των νέων ICS συστημάτων και διερευνήθηκε μέσω του συγκεκριμένου πολυστοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η οικονομική δαπάνη κατασκευής τους (cost) γιατί λόγω του μεγάλου όγκου των τμημάτων που τα αποτελούν (κέλυφος, παραβολικό κάτοπτρο, μεγάλος όγκος και βάρος μόνωσης) η τελική τιμή τους θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα FPTU συστήματα. Η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων υλικών (ιδιαίτερα στο κέλυφος) αλλά και η εκτεταμένη χρήση Χάλυβα στη κατασκευή τους μπορεί να αυξήσει σημαντικά την οικονομική δαπάνη κατασκευής γεγονός που κάνει απαραίτητη τη χρήση μαθηματικής βελτιστοποίησης σαν μια προσπάθεια ελέγχου της γεωμετρίας και των ποσοτήτων υλικών κάθε τμήματος των ICS. Τα αποτελέσματα της μεθόδου και η σύγκριση με τα αντίστοιχα πρότυπα συστήματα δείχνουν ότι παράγονται βελτιωμένα «οικονομικότερα», μικρότερου δηλαδή κόστους κατασκευής συστήματα (ICS με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού).

Στη συνέχεια η προσομοίωση της περιβαλλοντικής και οικονομικής ανάλυσης που γίνεται για το στάδιο χρήσης, για τα «σχεδιαζόμενα» από τον αλγόριθμο συστήματα, αποδεικνύει ότι τα συστήματα αυτά προσεγγίζουν από τη μία τη περιβαλλοντική συμπεριφορά των FPTU συστημάτων ενώ επιπλέον εμφανίζονται να έχουν καλύτερα οικονομικά χαρακτηριστικά (NPV & Payback Period) – λόγω δηλαδή της βελτίωσης της απόδοσης τους τα νέα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν στον ίδιο βαθμό με τα συμβατικά (FPTU) με άμεση συνέπεια την κατανάλωση λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας στις κατοικίες (κυρίως τα ICS συστήματα με ασύμμετρο κάτοπτρο και διπλό δοχείο νερού). Όταν όμως η δαπάνη κατασκευής (cost) τέτοιων συστημάτων (ICS συστήματα με συμμετρικό κάτοπτρο και δύο δεξαμενές νερού σε σειρά) είναι πολύ μεγάλη (σε σχέση με την ενεργειακή τους απόδοση), λόγω ποσοτήτων υλικών, εμφανίζουν μικρότερο οικονομικό όφελος από τη χρήση τους.

Επιπλέον, εξετάζοντας και το περιβαλλοντικό «ίχνος» στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης, παρατηρείται ότι τα νέα συστήματα, παρουσιάζουν μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου στα στάδια αυτά λόγω αυξομειώσεων στη μάζα τους ανάλογα με τη κλιματική ζώνη αλλά και λόγω μικρότερων διαστάσεων των νέων συστημάτων που προκύπτει από τη βέλτιστη σχεδίαση (σε σύγκριση πάντα με τα αρχικά ICS). Παρόλο που η μεταβολή αυτή του περιβαλλοντικού φορτίου οφείλεται κυρίως στην ενέργεια που δαπανάται για τη κατασκευή των επί μέρους τμημάτων των ICS, σχετίζεται και με τη ποσότητα κάθε υλικού (αφού η διαφοροποίηση της μάζας επηρεάζει την ενέργεια κατασκευής), σύμφωνα με τη θεωρία της μεθόδου της AKZ.

Βιβλιογραφία

- [1] T. E. Graedel, *Streamlined Life-Cycle Assessment*. New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River, 1998.
- [2] G. Pennihgton, DW., Potting, J, Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., Rebitzer, *Life cycle assessment Part2: Current impact assessment practice*. Environmental International, 2004.
- [3] “ecoinvent v3.9.1 - ecoinvent.” Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-9-1/>
- [4] “SimaPro | LCA software for informed changemakers.” Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://simapro.com/>
- [5] N. Mousiopoulos, L. Ntziachristos, T. Slini, N. Μουσιόπουλος, Λ. Ντζιαχρήστος, and Θ. Σλίνη, “ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ,” Jan. 2016.
- [6] ISO, “Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework (ISO 14040:2006),” 2004 Accessed: Feb. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [7] “ISO - ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.” Accessed: Feb. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [8] U. De Lleida, K. Ali, I. Menoufi, A. Castell, and L. F. Cabeza, “An overview on Life Cycle Impact Assessment (LCIA) methodologies: State of the art Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art,” 2011.
- [9] M. A. Curran, *LCA Methodology, Environmental Life-Cycle Assesment*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [10] H.-M. Henning, *Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings. A Handbook for Planners*. New York: Springer Wien, 2007.
- [11] J. Mariyappan, *Solar Thermal Thematic Review*. Washington: Springer Wien, 2001.
- [12] H. Diver, Rich, Kolb, Greg, Price, *Solar Parabolic Through*. D.C. 20585 & EPRI 3412 Hillview Avenue Palo Alto, California 94304: Office of Utility Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy 1000 Independence Avenue Washington, 1997.
- [13] M. Souliotis, D. Chemisana, Y. G. Caouris, and Y. Tripanagnostopoulos, “Experimental study of integrated collector storage solar water heaters,” *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 1083–1094, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.061.
- [14] MALTEZOS SA, “MALTEZOS SA.”
- [15] “CALPAK – ΗΛΙΑΚΟΙ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΕΣ – ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.” Accessed: May 03, 2020. [Online]. Available: <https://www.calpak.gr/el/>
- [16] R. Teske, S., Brakmann, G., Aringhoff, *Solar Thermal Power*. Greenpeace, 2010.
- [17] J. H. Mason, A.A., Davidson, “Measured Performance and Modeling of an Evacuated-Tube, Integral-Collector-Storage Solar Water Heater,” *J. Sol. Energy Eng.*, pp. 221–228,

- 1995.
- [18] “Calpak,” 2018.
 - [19] K. Devanarayanan and K. Kalidasa Murugavel, “Integrated collector storage solar water heater with compound parabolic concentrator – development and progress,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 51–64, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.07.076.
 - [20] F. Global Environment, *Assessment of the World Bank / GEF Strategy for the MarketDevelopment of Concentrating Solar Thermal Power*. Karlsruhe: GEF, 2005.
 - [21] “SOLE SA.” [Online]. Available: www.sole.gr
 - [22] R. Menna, Pietro, di-Valdalbero, *Concentrating Solar Power – From research to implementation*. Belgium: Publications Office of the European Communities, 2007.
 - [23] “Ηλιακοι Θερμοσιφωνες ALPHA Compact - Ηλιακα Συστηματα Ηλιακος Θερμοσιφωνας Τριπλης Ενεργειας.” Accessed: May 03, 2020. [Online]. Available: <https://www.eurostar-solar.com/ηλιακοι-θερμοσιφωνες-alpha.html>
 - [24] M. Souliotis and Y. Tripanagnostopoulos, “Experimental study of CPC type ICS solar systems,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 389–408, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.10.003.
 - [25] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, and T. Nousia, “CPC type integrated collector storage systems,” *Sol. Energy*, vol. 72, no. 4, pp. 327–350, May 2002, doi: 10.1016/S0038-092X(02)00005-1.
 - [26] S. A. Kalogirou, “Environmental benefits of domestic solar energy systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 18–19, pp. 3075–3092, 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.12.019.
 - [27] S. Kalogirou, “Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination,” *Appl. Energy*, vol. 60, no. 2, pp. 65–88, 1998, doi: 10.1016/S0306-2619(98)00018-X.
 - [28] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, and M. Pérez, “Parabolic-trough solar collectors and their applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 1695–1721, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2010.03.012.
 - [29] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, and V. Lo Brano, “Life cycle assessment of a solar thermal collector,” *Renew. Energy*, vol. 30, no. 7, pp. 1031–1054, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2004.09.009.
 - [30] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, and V. Lo Brano, “Life cycle assessment of a solar thermal collector: Sensitivity analysis, energy and environmental balances,” *Renew. Energy*, vol. 30, no. 2, pp. 109–130, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2004.05.006.
 - [31] R. Battisti and A. Corrado, “Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage,” *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no. 13–14, pp. 1295–1300, 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.05.007.
 - [32] S. A. Kalogirou, “Performance and environmental life cycle analysis of thermosyphon solar water heaters,” Nicosia, Cyprus, 2004.
 - [33] S. Kalogirou, “Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 39–48, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.SOLENER.2008.06.005.

- [34] A. De Laborderie *et al.*, “Environmental Impacts of Solar Thermal Systems with Life Cycle Assessment,” *World Renew. Energy Congr. 2011 - 8-13 May 2011, Linköping, Sweden*, pp. 3678–3685, 2011, doi: 10.3384/ecp110573678.
- [35] F. J. Rey-Martínez, E. Velasco-Gómez, J. Martín-Gil, L. M. Navas Gracia, and S. Hernández Navarro, “Life Cycle Analysis of a Thermal Solar Installation at a Rural House in Valladolid (Spain),” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 25, no. 5, pp. 713–724, Jun. 2008, doi: 10.1089/ees.2007.0115.
- [36] N. A. Masrurah, B. Li, and J. Klemeš, “Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process,” *Renew. Energy*, vol. 31, no. 4, pp. 537–548, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.03.008.
- [37] G. Comodi, M. Bevilacqua, F. Caresana, L. Pelagalli, P. Venella, and C. Paciarotti, “LCA analysis of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels,” *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 234–237, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.1096.
- [38] C. Lamnatou, G. Nottton, D. Chemisana, and C. Cristofari, “Life cycle analysis of a building-integrated solar thermal collector, based on embodied energy and embodied carbon methodologies,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 378–387, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.011.
- [39] C. Lamnatou, D. Chemisana, R. Mateus, M. G. Almeida, and S. M. Silva, “Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 833–846, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.RENENE.2014.09.057.
- [40] C. Lamnatou and D. Chemisana, “Concentrating solar systems: Life Cycle Assessment (LCA) and environmental issues,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 916–932, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.04.065.
- [41] C. Lamnatou, C. Cristofari, D. Chemisana, and J. L. Canaletti, “Building-integrated solar thermal systems based on vacuum-tube technology: Critical factors focusing on life-cycle environmental profile,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1199–1215, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.07.030.
- [42] S. Eicher, C. Hildbrand, A. Kleijer, J. Bony, M. Bunea, and S. Citherlet, “Life cycle impact assessment of a solar assisted heat pump for domestic hot water production and space heating,” *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 813–818, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.094.
- [43] E. Carnevale, L. Lombardi, and L. Zanchi, “Life cycle assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale,” *Energy*, vol. 77, pp. 434–446, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.028.
- [44] C. J. Koroneos and E. A. Nanaki, “Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater,” *J. Clean. Prod.*, vol. 37, pp. 154–161, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.07.001.
- [45] N. Arnaoutakis, M. Souliotis, and S. Papaefthimiou, “Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications,” *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 187–200, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.008.

- [46] E. Pihl, D. Kushnir, B. Sandén, and F. Johnsson, "Material constraints for concentrating solar thermal power," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 944–954, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.04.057.
- [47] R. H. Crawford, G. J. Treloar, B. D. Ilozor, and P. E. D. Love, "Comparative greenhouse emissions analysis of domestic solar hot water systems," *Build. Res. Inf.*, vol. 31, no. 1, pp. 34–47, 2003, doi: 10.1080/09613210210160800.
- [48] B. Greening and A. Azapagic, "Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK?," *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 23–36, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.07.048.
- [49] G. Tsilingiridis, G. Martinopoulos, and N. Kyriakis, "Environmental performance of thermosyphonic domestic solar hot water systems under different climatic conditions: A case study for Greece," *Glob. Nest J.*, 2004.
- [50] G. Martinopoulos, G. Tsilingiridis, and N. Kyriakis, "Three eco-tool comparison with the example of the environmental performance of domestic solar flat plate hot water systems," *Proc. Int. Conf. Environ. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. B556–B561, 2005.
- [51] G. Martinopoulos, G. Tsilingiridis, and N. Kyriakis, "Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 545–555, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.08.035.
- [52] A. R. and S. K. S. Uddin- Md, S. Rasid, "Energy and emission analysis of evacuated tube solar water heating system and options study for the potential improvement," Bangladesh, 2014.
- [53] T. Tsoutsos, N. Frantzeskaki, and V. Gekas, "Environmental impacts from the solar energy technologies," *Energy Policy*, vol. 33, no. 3, pp. 289–296, 2005, doi: 10.1016/S0301-4215(03)00241-6.
- [54] G. P. Hammond and C. I. Jones, "Embodied energy and carbon in construction materials," *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy*, vol. 161, no. 2, pp. 87–98, 2008, doi: 10.1680/ener.2008.161.2.87.
- [55] A. Genkinger, R. Dott, and T. Afjei, "Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 101–105, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.013.
- [56] G. F. Menzies and Y. Roderick, "Energy and carbon impact analysis of a solar thermal collector system," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 9–16, 2010, doi: 10.1080/19397030903362869.
- [57] O. Ibrahim, F. Fardoun, R. Younes, and H. Louahlia-Gualous, "Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects," *Building and Environment*, vol. 72, pp. 259–286, Feb. 2014. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.09.006.
- [58] C. Lamnatou, F. Motte, G. Notton, D. Chemisana, and C. Cristofari, "Cumulative energy demand and global warming potential of a building-integrated solar thermal system with/without phase change material," *J. Environ. Manage.*, vol. 212, pp. 301–310, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2018.01.027.
- [59] M. Souliotis, S. Papaefthimiou, Y. G. Caouris, A. Zacharopoulos, P. Quinlan, and M. Smyth,

- "Integrated collector storage solar water heater under partial vacuum," *Energy*, vol. 139, pp. 991–1002, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.074.
- [60] Y. Hang, M. Qu, and F. Zhao, "Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States," *Energy Build.*, vol. 45, pp. 181–188, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.057.
- [61] S. S. and E. F. R. Hoffman, M. Brondani, F. Parris, A. Friderichs, "Economic-environmental comparison between flat-plate and evacuated tube solar collectors," *Glob. NEST JournalGlobal NEST Int. J.*, 2018, doi: 10.30955/gnj.001386.
- [62] G. Comodi, M. Bevilacqua, F. Caresana, C. Paciarotti, L. Pelagalli, and P. Venella, "Life cycle assessment and energy-CO₂-economic payback analyses of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels," *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 944–955, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.036.
- [63] S. R. Allen, G. P. Hammond, H. A. Harajli, M. C. McManus, and A. B. Winnett, "Integrated appraisal of a Solar Hot Water system," *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1351–1362, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.11.018.
- [64] T. H. J Burch, J Salasovich, "No Cold-climate solar domestic water heating systems: life-cycle analyses and opportunities for cost reductionTitle," Orlando, Florida, 2005.
- [65] D. Laing, W. D. Steinmann, P. Viebahn, F. Gräter, and C. Bahl, "Economic analysis and life cycle assessment of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 132, no. 4, 2010, doi: 10.1115/1.4001404.
- [66] R. H. Crawford and G. J. Treloar, "Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia," *Sol. Energy*, vol. 76, no. 1–3, pp. 159–163, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.07.030.
- [67] M. Leckner and R. Zmeureanu, "Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 232–241, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.07.031.
- [68] P. Hernandez and P. Kenny, "Net energy analysis of domestic solar water heating installations in operation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1. Elsevier Ltd, pp. 170–177, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.144.
- [69] M. M. Kablan, "Techno-economic analysis of the Jordanian solar water heating system," *Energy*, vol. 29, no. 7, pp. 1069–1079, 2004, doi: 10.1016/j.energy.2004.01.003.
- [70] S. Colle, S. L. De Abreu, and R. Rüther, "Uncertainty in economical analysis of solar water heating and photovoltaic systems," *Sol. Energy*, vol. 70, no. 2, pp. 131–142, 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00134-1.
- [71] T. P. Otanicar and J. S. Golden, "Comparative environmental and economic analysis of conventional and nanofluid solar hot water technologies," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 15, pp. 6082–6087, 2009, doi: 10.1021/es900031j.
- [72] A. Valan Arasu and T. Sornakumar, "Life cycle cost analysis of new FRP based solar parabolic trough collector hot water generation system," *J. Zhejiang Univ. A*, 2008, doi: 10.1631/jzus.a072134.
- [73] G. N. Kulkarni, S. B. Kedare, and S. Bandyopadhyay, "Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications," *Sol. Energy*, vol. 82,

- no. 8, pp. 686–699, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.solener.2008.02.011.
- [74] P. Frei, U., Vogelsanger, “Solar thermal systems for domestic hot water and space heating,” *SPF Inst. für Solartechnik Prüfung Forsch.*, 2000.
 - [75] D. M. Atia, F. H. Fahmy, N. M. Ahmed, and H. T. Dorrah, “Optimal sizing of a solar water heating system based on a genetic algorithm for an aquaculture system,” *Math. Comput. Model.*, vol. 55, no. 3–4, pp. 1436–1449, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.mcm.2011.10.022.
 - [76] S. A. Kalogirou, “Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms,” *Appl. Energy*, vol. 77, no. 4, pp. 383–405, Apr. 2004, doi: 10.1016/S0306-2619(03)00153-3.
 - [77] L. Abdel-Malek, “Optimum design of solar water heating systems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 219–225, Jan. 1985, doi: 10.1016/0305-0548(85)90046-2.
 - [78] I. M. Michaelides and D. R. Wilson, “Optimum design criteria for solar hot water systems,” *Renew. Energy*, vol. 9, no. 1-4 SPEC. ISS., pp. 649–652, Sep. 1996, doi: 10.1016/0960-1481(96)88370-4.
 - [79] F. de Winter, “+IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Optimum Designs for Solar Water Heating Equipment for the Single Family Home,” 2010.
 - [80] Lizarraga-Garcia, “Optimal Operation and Design of Solar-Thermal Energy Storage Systems,” 2012.
 - [81] D. Weinstock and J. Appelbaum, “Optimal solar field design of stationary collectors,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 126, no. 3, pp. 898–905, Aug. 2004, doi: 10.1115/1.1756137.
 - [82] C. Yan, S. Wang, Z. Ma, and W. Shi, “A simplified method for optimal design of solar water heating systems based on life-cycle energy analysis,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 271–278, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.08.021.
 - [83] Y. Hang, L. Du, M. Qu, and S. Peeta, “Multi-objective optimization of integrated solar absorption cooling and heating systems for medium-sized office buildings,” *Renew. Energy*, vol. 52, pp. 67–78, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.004.
 - [84] O. Helal, B. Chaouachi, and S. Gabsi, “Design and thermal performance of an ICS solar water heater based on three parabolic sections,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 2421–2432, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.06.021.
 - [85] G. Mitsopoulos, E. Bellos, and C. Tzivanidis, “Parametric analysis and multi-objective optimization of a solar heating system for various building envelopes,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 8, pp. 307–317, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.09.007.
 - [86] E. Bellos, C. Tzivanidis, and D. Tsimpoukis, “Optimum number of internal fins in parabolic trough collectors,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 137, pp. 669–677, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.037.
 - [87] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Development of an analytical model for the daily performance of solar thermal systems with experimental validation,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 28, pp. 22–29, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.05.003.
 - [88] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Investigation of a star flow insert in a parabolic trough solar

- collector,” *Appl. Energy*, vol. 224, pp. 86–102, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.099.
- [89] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Parametric analysis and optimization of a cooling system with ejector-absorption chiller powered by solar parabolic trough collectors,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 168, pp. 329–342, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.024.
- [90] M. J. Ko, “Analysis and optimization design of a solar water heating system based on life cycle cost using a genetic algorithm,” *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11380–11403, 2015, doi: 10.3390/en81011380.
- [91] S. Kalogirou, “Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system,” *Renew. Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 179–192, Oct. 1997, doi: 10.1016/S0960-1481(97)00029-3.
- [92] Y. Tripanagnostopoulos and M. Souliotis, “Integrated collector storage solar systems with asymmetric CPC reflectors,” *Renew. Energy*, vol. 29, no. 2, pp. 223–248, 2004, doi: 10.1016/S0960-1481(03)00195-2.
- [93] M. Souliotis *et al.*, “Heat retaining integrated collector storage solar water heater with asymmetric CPC reflector,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 2474–2487, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.07.005.
- [94] D. Haillot, X. Py, V. Goetz, and M. Benabdelkarim, “Storage composites for the optimisation of solar water heating systems,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 86, no. 6, pp. 612–617, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.cherd.2008.01.007.
- [95] P. C. Eames and P. W. Griffiths, “Thermal behaviour of integrated solar collector/storage unit with 65 °C phase change material,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 20, pp. 3611–3618, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2006.02.029.
- [96] I. Al-Hinti, A. Al-Ghandoor, A. Maaly, I. Abu Naqera, Z. Al-Khateeb, and O. Al-Sheikh, “Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 8, pp. 1735–1740, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2009.08.038.
- [97] M. Chaabane, H. Mhiri, and P. Bournot, “Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials (PCM),” *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 897–903, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.07.089.
- [98] A. Pugsley, M. Smyth, J. D. Mondol, A. Zacharopoulos, and L. Di Mattia, “Experimental Characterisation of a Flat Panel Integrated-Collector-Storage Solar Water Heater Featuring a Photovoltaic Absorber and a Planar Liquid-Vapour Thermal Diode,” in *Proceedings of EuroSun2016*, Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, Aug. 2016, pp. 1–12. doi: 10.18086/eurosun.2016.08.14.
- [99] J. Rhee, A. Campbell, A. Mariadass, and B. Morhous, “Temperature stratification from thermal diodes in solar hot water storage tank,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 3, pp. 507–511, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.solener.2009.12.007.
- [100] A. Rabl, “Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators,” *Sol. Energy*, vol. 18, no. 6, pp. 497–511, 1976, doi: 10.1016/0038-092X(76)90069-4.
- [101] A. Rabl, “Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers,”

- Appl. Opt.*, vol. 15, no. 7, p. 1871, Jul. 1976, doi: 10.1364/AO.15.001871.
- [102] M. J. Carvalho, M. Collares-Pereira, J. M. Gordon, and A. Rabl, "Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection," *Sol. Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 393–399, Jan. 1985, doi: 10.1016/0038-092X(85)90127-6.
- [103] L. Li, Q. Lin, and Z. Ming, "A survey of artificial immune algorithms for multi-objective optimization," *Neurocomputing*, vol. 489, pp. 211–229, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.neucom.2021.08.154.
- [104] J. A. Duro *et al.*, "Methods for constrained optimization of expensive mixed-integer multi-objective problems, with application to an internal combustion engine design problem," *Eur. J. Oper. Res.*, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.EJOR.2022.08.032.
- [105] M. D. Sarmouk, A. Smaili, H. Fellouah, and A. Merabtine, "Energy and economic assessment of a hybrid solar/gas heating system using a combined statistical-based multi-objective optimization method," *J. Build. Eng.*, vol. 59, p. 105095, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105095.
- [106] A. J. S. J. Nanda, and R. K. Maddila, "A multi-objective natural aggregation algorithm for optimizing user allocation matrix in visible light communication," *Optik (Stuttg.)*, vol. 267, p. 169692, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.IJLEO.2022.169692.
- [107] B. Xu *et al.*, "Cooperative co-evolutionary algorithm for multi-objective optimization problems with changing decision variables," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 607, pp. 278–296, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.INS.2022.05.123.
- [108] Θ. Απέργης, *Κατασκευή Ηλιακού Θερμοσίφωνα της εταιρείας SOLE AE. Ποσότητες υλικών*. Αθήνα: SOLE AE, 2019.
- [109] Ε. Νάκου, *Κατασκευή Ηλιακού Θερμοσίφωνα της εταιρείας SOLE AE. Ιστορικό κατασκευής*. Αθήνα, 2019.
- [110] J. Maul, B. G. Frushour, J. R. Kontoff, H. Eichenauer, K.-H. Ott, and C. Schade, "Polystyrene and Styrene Copolymers," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. doi: 10.1002/14356007.a21_615.pub2.
- [111] "Engineering ToolBox." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [112] Α. Ε. Κτηριων, "ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΤΩΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ," 2011.
- [113] M. Souliotis, N. Arnaoutakis, G. Panaras, A. Kavga, and S. Papaefthimiou, "Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications," *Renew. Energy*, vol. 126, pp. 708–723, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.011.
- [114] "RETSscreen | Natural Resources Canada." Accessed: May 03, 2020. [Online]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>
- [115] G. C. I. Lin and S. V. Nagalingam, *CIM justification and optimisation*. Taylor & Francis, 2000.

- [116] "Theory and Problems in Financial Management : M. Y. Khan : 9780074636831." Accessed: Feb. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.bookdepository.com/Theory-Problems-Financial-Management-M-Y-Khan/9780074636831>
- [117] "Agency for Toxic Substances and Disease Registry." Accessed: Nov. 12, 2019. [Online]. Available: <https://www.atsdr.cdc.gov/>
- [118] ATSDR, *Minimal Risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances*. Madison County, Tennessee: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2006.
- [119] *REVIEW ON TOXICITY OF STAINLESS STEEL TIINA SANTONEN, HELENE STOCKMANN-JUVALA AND ANTTI ZITTING FINNISH INSTITUTE OF OCCUPATIONAL HEALTH.*
- [120] M. Souliotis and Y. Tripanagnostopoulos, "Study of the distribution of the absorbed solar radiation on the performance of a CPC-type ICS water heater," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 846–858, May 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.05.042.
- [121] M. Collares-Pereira and A. Rabl, "The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values," *Sol. Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 155–164, Jan. 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90100-2.
- [122] N. Arnaoutakis, M. Milousi, S. Papaefthimiou, P. A. Fokaides, Y. G. Caouris, and M. Souliotis, "Life cycle assessment as a methodological tool for the optimum design of integrated collector storage solar water heaters," *Energy*, vol. 182, pp. 1084–1099, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.097.
- [123] "Schaum's mathematical handbook of formulas and tables - PDF Free Download." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://epdf.pub/schaums-mathematical-handbook-of-formulas-and-tablesdc2f8603272491941b362853bbce940385159.html>
- [124] J. McCleary, *Geometry from a differentiable viewpoint, second edition*. Cambridge University Press, 2010. doi: 10.1017/CBO9781139022248.
- [125] "RETScreen Expert, Natural Resources Canada."
- [126] "The Skylighting Guidelines | Build Up." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.buildup.eu/en/practices/publications/skylighting-guidelines>
- [127] "AAMA - Glass Standards and Guidelines." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://aamanet.org/pages/glass-standards-and-guidelines>
- [128] "Materials Science and Engineering | MIT OpenCourseWare | Free Online Course Materials." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/>
- [129] "plasticker - the home of plastics." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://plasticker.de/>
- [130] V. Velmurugan and K. Srithar, "Prospects and scopes of solar pond: A detailed review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 8, pp. 2253–2263, Oct. 2008, doi: 10.1016/J.RSER.2007.03.011.
- [131] J. L. Kuester and J. H. Mize, *Optimization techniques with Fortran*. McGraw-Hill, 1973.
- [132] "Non-linear optimization techniques - M. J. Box, D. Davies, William Henry Swann, Imperial Chemical Industries, Ltd - Βιβλία Google." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available:

https://books.google.gr/books/about/Non_linear_optimization_techniques.html?id=xjwZAQAAIAAJ&redir_esc=y

- [133] W. Spendley, G. R. Hext, and F. R. Himsworth, "Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation," *Technometrics*, vol. 4, no. 4, p. 441, Nov. 1962, doi: 10.2307/1266283.
- [134] "Optimization, Volume 1 - 1st Edition." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/optimization/nemhauser/978-0-444-87284-5>
- [135] "Rardin, Optimization in Operations Research, 2nd Edition | Pearson." Accessed: Feb. 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Rardin-Optimization-in-Operations-Research-2nd-Edition/PGM209578.html>
- [136] N. Arnaoutakis *et al.*, "Design, Energy, Environmental and Cost Analysis of an Integrated Collector Storage Solar Water Heater Based on Multi-Criteria Methodology," *Energies*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15051673.