



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.
Σχεδιασμός Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης για την
υβριδοποίηση του ΑΗΣ της περιοχής Σορωνής Ρόδου»

Δάφλος Δημήτριος

Μηχανολόγος Μηχανικός

Επιβλέπων: Δρ. Ευάγγελος Γ. Καπετάνιος



ΑΘΗΝΑ, 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.
Σχεδιασμός Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης για την υβριδοποίηση του ΑΗΣ της
περιοχής Σορωνής Ρόδου»

Δάφλος Ι. Δημήτριος
Μηχανολόγος Μηχανικός

Επιβλέπων: Δρ. Ευάγγελος Γ. Καπετάνιος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Μαρτίου 2012.

.....
Μ. Φούντη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Αντωνιάδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δρ. Ε. Καπετάνιος

Αθήνα, Μάρτιος 2012

.....

Δάφλος Ι. Δημήτριος

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

Copyright © Δάφλος Ι. Δημήτριος, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στο σχεδιασμό μίας εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης προς ενσωμάτωση στον Ατμοηλεκτρικό Σταθμό της περιοχής Σορωνής της Ρόδου. Σκοπός του σχεδιασμού είναι η υβριδοποίηση της ατμοηλεκτρικής μονάδας και η εξοικονόμηση του απαιτούμενου, για τη λειτουργία του ατμοστροβίλου, καυσίμου.

Για τη συγγραφή της εργασίας απαιτήθηκε πολύμηνη προσπάθεια και μελέτη μεγάλου εύρους επιστημονικών αντικειμένων και κλάδων, από τη Μετεωρολογία και την Οπτική, έως τη Θερμοδυναμική και τη Μετάδοση Θερμότητας. Με κάποια από αυτά είχα έρθει σε επαφή κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, αλλά και κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π, ενώ για κάποια άλλα η παρούσα εργασία αποτέλεσε την αφορμή για την πρώτη επαφή. Θεωρώ πως η διεπιστημονική προσέγγιση που το αντικείμενο της εργασίας απαιτούσε, με βοήθησε να εντρυφήσω περαιτέρω στα πρώτα, και να διευρύνω τους επιστημονικούς μου ορίζοντες, φέρνοντάς με σε επαφή με τα δεύτερα.

Με την ολοκλήρωσή της θέλω να ευχαριστήσω πολύ τον Δρ. Ευάγγελο Καπετάνιο, ο οποίος μου έδωσε το έναυσμα να ασχοληθώ με την πολλά υποσχόμενη και ενδιαφέρουσα τεχνολογία της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θέλω επίσης να τον ευχαριστήσω για την καιρία καθοδήγησή του, τις συμβουλές και τις επισημάνσεις του, την υπεύθυνη επίβλεψη της εργασίας, καθώς και για την ψυχραιμία που μου μετέδιδε σε δύσκολες στιγμές κατά την εκπόνησή της.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την καθηγήτρια κ. Μαρία Φούντη, τον Αναπληρωτή Καθηγητή, κ. Αντωνιάδη και τον Δρ. Ευάγγελο Καπετάνιο για την προσεκτική και αντικειμενική κριτική της εργασίας μου.

Θερμές ευχαριστίες στον κ. Σπύρο Πλατή, Δ/ντή ΚΜΕΕΕ Χανίων-Λινοπεραμάτων-Ρόδου και την κα. Φιλιώ Μπέρδη, Τομεάρχη Λειτουργίας ΑΗΣ Ρόδου, για την πρόθυμη ανταπόκρισή τους, και την άμεση βοήθειά τους στην παροχή στοιχείων για τη λειτουργία του ατμοηλεκτρικού σταθμού Σορωνής Ρόδου.

Τέλος, αλλά πρωτίστως, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υπομονή και την ανοχή που επέδειξαν καθ'όλη την ενασχόλησή μου με την εργασία. Πρώτα απ'όλα, όμως, για τη γενναιοδωρία και την αγάπη τους καθ'όλη τη διάρκεια της ζωής μου. Η συμβολή τους είναι τεράστια. Τους χρωστώ πολλά.

Δημήτρης Δάφλος

Στους γονείς μου...

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας άρχισε να ερευνάται και να αναπτύσσεται ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 άρχισε να βρίσκει εμπορική εφαρμογή στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και να προτάσσεται ως αξιόπιστη λύση για την ηλεκτροπαραγωγή.

Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να ενσωματωθεί σε ήδη υπάρχοντες θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, και να καταστήσει τη λειτουργία τους υβριδική, εκτοπίζοντας σημαντικές ποσότητες καυσίμου, και αντικαθιστώντας τις με θερμότητα προερχόμενη από ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι η ηλιακή. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται η εγκατάσταση νέων σταθμών που να εκμεταλλεύονται την τεχνολογία, αλλά μπορούν να αξιοποιηθούν οι ήδη υπάρχοντες, γεγονός που προσφέρει ευελιξία στην ηλεκτροπαραγωγή και μειώνει το συνολικό κόστος.

Η ευρύτερα διαδεδομένη διάταξη συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας είναι οι συλλέκτες παραβολικής σκάφης. Το 96,5% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια γίνεται σε τέτοιες εγκαταστάσεις. Οι διατάξεις αυτές χαρακτηρίζονται από ανταγωνιστικό κόστος παραγωγής ενέργειας, υψηλές αποδόσεις μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε θερμική και χαμηλό ρίσκο επένδυσης, λόγω της εμπειρίας που έχει αποκομισθεί κατά τη μακρόχρονη λειτουργία τους.

Στην παρούσα εργασία γίνεται ο σχεδιασμός μίας εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης, με σκοπό την ενσωμάτωσή της στον Ατμοηλεκτρικό Σταθμό της περιοχής Σορώνης Ρόδου και την παροχή μέρους της απαιτούμενης θερμότητας για τη λειτουργία του ατμοστροβίλου, με αποτέλεσμα την υβριδοποίηση της λειτουργίας του. Σχεδιαστικό στόχο αποτελούν η κάλυψη της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε θερμότητα, αλλά και η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας ικανής να τροφοδοτήσει τη λειτουργία του ατμοστροβίλου επί 8 ώρες, στο σημείο σχεδίασης.

Αρχικά, γίνεται η εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού της περιοχής. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται μέσες μηνιαίες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για το νησί της Ρόδου, όπως αυτές προκύπτουν από την επεξεργασία μετρήσεων της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας από την ΕΜΥ. Στη συνέχεια, οι τιμές αυτές εισάγονται σε σχέσεις για την εξαγωγή ημερήσιων και ωριαίων τιμών ακτινοβολίας. Ως σημείο σχεδίασης της εγκατάστασης χρησιμοποιείται η μέγιστη των ωριαίων τιμών άμεσης ακτινοβολίας. Βάσει αυτής της τιμής υπολογίζεται η επιφάνεια συλλεκτών που απαιτείται για την επίτευξη των σχεδιαστικών στόχων.

Στη συνέχεια, γίνεται επιλογή των στοιχείων των επιμέρους υποσυστημάτων της διάταξης (συλλεκτών, ρευστού μεταφοράς θερμότητας και μέσου αποθήκευσης θερμότητας) μέσω της αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων. Η διαστασιολόγηση των επιμέρους υποσυστημάτων γίνεται μέσα από μία διαδικασία ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους της εγκατάστασης, το οποίο συσχετίζεται με τις θερμοκρασίες του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην είσοδο και την έξοδο των υποσυστημάτων της εγκατάστασης. Μέσω της διαδικασίας αυτής, βρίσκονται οι βέλτιστες θερμοκρασίες λειτουργίας της εγκατάστασης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τιμής της παραγόμενης ενέργειας από το πεδίο συλλεκτών. Τα τελικά αποτελέσματα της μελέτης περιλαμβάνουν την τιμή της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, της εκτόπισης καυσίμου και εξοικονόμησης κόστους καυσίμου, καθώς και τη μείωση εκπομπών ρύπων που επιτυγχάνονται από την ενσωμάτωση της εγκατάστασης των συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορώνης και την υβριδοποίηση της λειτουργίας του, από την οποία προκύπτουν πολλαπλά οφέλη:

- Ευελιξία στην παραγωγή ενέργειας: Με την προσθήκη ενός υποσυστήματος αποθήκευσης, η μέση παροχή θερμότητας κατά τους θερινούς μήνες καλύπτει τις απαιτήσεις του ατμοστροβίλου για 20 και πλέον ώρες ημερησίως, ενώ τον Ιούλιο ξεπερνά τις 22 ώρες.
- Περιβαλλοντικά οφέλη: Η ποσότητα καυσίμου που εκτοπίζεται και αντικαθίσταται από ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι ιδιαίτερα μεγάλη, με φυσικό επακόλουθο τη μεγάλη μείωση των εκπομπών ρύπων κατά τη λειτουργία του ατμοστροβίλου. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας από το πεδίο συλλεκτών επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε ποσοστό 51,79%. Με άλλα λόγια, περισσότερη από τη μισή ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του ατμοστροβίλου, σε ετήσια βάση, δύναται να δοθεί από ΑΠΕ μέσω του πεδίου συλλεκτών. Επιπλέον, η παροχή θερμότητας στον ΑΗΣ από το πεδίο συλλεκτών ξεπερνά αυτό το ποσοστό 6 μήνες το χρόνο (Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο), με το μέγιστο ποσοστό τον Ιούλιο να αγγίζει, όπως αναφέρθηκε, το 93,5%. Ως προς τις ρυπογόνες ουσίες κατά την καύση του μαζούτ, η μέση ετήσια εξοικονόμηση αγγίζει τους 45.410 τόνους CO₂, 739 τόνους SO₂, 85,65 τόνους NO_x, 48,25 τόνους σωματιδίων και 8,13 τόνους CO, με ευεργετικές επιπτώσεις για το περιβάλλον και την περιοχή της Σορώνης.
- Οικονομικά Οφέλη: Το κόστος επένδυσης εγκατάσταση εκτιμήθηκε στα 30.313 χιλ. ευρώ. Ταυτόχρονα, όμως, η εξοικονόμηση κόστους καυσίμου που επιτυγχάνεται είναι πολύ σημαντική, με τη μέση ετήσια τιμή της να φθάνει τις 8.098 χιλ. ευρώ. Προκύπτει ότι, ακόμα και χωρίς να συνοπολογίσει κανείς τη μελλοντική (και πιθανότατα αυξητική) πορεία της τιμής του αργού πετρελαίου, με τις τωρινές τιμές η απόσβεση του κόστους επένδυσης ολοκληρώνεται σε λιγότερο από 4 χρόνια.

Συμπερασματικά η τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας για χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή είναι μία πολλά υποσχόμενη και εξελίξιμη τεχνολογία και η περίπτωση υβριδοποίησης της ατμοηλεκτρικής μονάδος Σορώνης Ρόδου προκύπτει ότι είναι κατ' αρχήν θελκτική ως επένδυση, τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά.

EXTENDED SUMMARY

Electric power production through concentrated solar power began being investigated and developed as soon as the mid '70s. Since the early '80s, it has found commercial applications in California, USA and being promoted as a reliable solution towards electricity production.

The main advantage of this technology is that it can be integrated in already established thermoelectric power plants, which work on conventional fuels, and render their function hybrid, displacing significant fuel quantities and replacing it with heat coming from a renewable source, such as solar power. In this way, there is no need for establishing new plants that could utilize this technology. Instead the already established ones can be used, a feature that offers flexibility in electric power production and lowers total cost.

The most widely implemented concentrated solar power (CSP) configurations are parabolic trough collectors (PTCs). 96,5% of global CSP electricity production is taking place in such installations. This configuration is characterized by competitive energy production cost, high solar-to-thermal efficiencies and low investment risk, due to the experience that has been accumulated during their longtime operation.

In the present thesis, the design of a PTC installation is being carried out, with the goal of integrating it in the steam power plant of Soroni, Rhodes, supplying, in part, the required for the turbine's operation heat, and resulting in the hybridization of its operation. Design goals are meeting the turbine's heat demand, and energy storage capable of supplying the turbine's operation for 8 hours, at design point.

Initially, an estimation of the region's solar potential is being carried out. Mean monthly values of the total irradiation on the horizontal plane, for the island of Rhodes, are used for the calculations, as derived from processing mean monthly insolation measurements carried out by the HNMS. Afterwards, these values are inserted in formulas for the extraction of daily and hourly irradiation values. The highest hourly Direct Normal Insolation (DNI) value is used as the installation's design point. The collectors' aperture area needed for meeting the design goals is calculated, based on that value.

Afterwards, a selection of the configuration's individual subsystems' elements (collectors, heat transfer fluid (HTF), storage medium) is taking place, through the evaluation of alternative solutions. Dimensioning of the individual subsystems is done through a total installation cost minimizing procedure. Total cost is associated with the HTF's temperature in the inlet and outlet of the installation's subsystems. Through this procedure, the installation's optimal operation temperature values are found, which are used for calculating the value of the energy produced by the collector field.

The final results of the this study include the yearly produced energy value, fuel displacement and fuel cost reduction values, as well as the pollutants' emission reduction accomplished by the PTC installation's integration in the Soroni's steam power plant and its operation's hybridization, to which, multiple benefits accrue:

- Flexibility in Power Production: Through the addition of a storage subsystem, mean heat supply during the summer can meet the turbine's demand for 20 plus hours daily, while in July, this value exceeds 22 hours.

- Environmental Benefits: The quantity of fuel that is displaced and replaced by a renewable source is particularly significant, resulting in a major reduction of pollutants' emission during the turbine's operation. The fact that the yearly collector field energy production suffices for meeting 51,79% of the turbine's demand is also noteworthy. In other words, more than half of the energy required for the turbine's operation, on a yearly basis, can be supplied by a renewable source, through the collector field. In addition, heat supply to the steam power plant by the collector field exceeds this percentage 6 months a year (April through September), with the highest percentage reaching 93,5% in July. Concerning pollutants resulting from crude oil combustion, mean yearly reduction reaches 45,410 tonnes of CO₂, 739 tonnes of SO₂, 85.65 tonnes of NO_x, 48.25 tones of particulates and 8.13 tonnes of CO, with beneficiary results for the environment and the region of Soroni.
- Economic Benefits: The capital cost of the installation was estimated at €30,313,000. At the same time, the fuel cost savings achieved is significant, with the mean yearly value reaching €8,098,000. Even without taking into the account the future (and most probably increasing) trend of crude oil prices, the investment capital cost's amortization is concluded in less than four years, in present values.

In conclusion, the technology of concentrating solar power towards electricity production is a very promising and developable technology, and the case of hybridizing the steam power plant of Soroni, Rhodes is initially evaluated as an attractive investment technically, environmentally and financially.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	18
1.2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	18
1.2.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	18
1.2.2. ΘΕΡΜΑΝΣΗ – ΨΥΞΗ.....	19
1.2.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	20
Άμεσες Μέθοδοι	20
Έμμεσες Μέθοδοι.....	21
1.3. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ	24
1.4. ΣΤΟΧΟΙ, ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	28
1.4.1. Στόχοι για τη διάδοση των ΑΠΕ και της Ηλιακής Ενέργειας	28
1.4.2. Πολιτικές και Κίνητρα για τη διάδοση των ΑΠΕ και της Ηλιακής Ενέργειας.....	32
1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	35
2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ	35
2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	39
2.2.1. ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	39
2.2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	43
Υπολογισμός συνιστωσών Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου	44
Υπολογισμός συνιστωσών Ημερήσιας Ηλιακής ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου	46
Υπολογισμός συνιστωσών Ωριαίας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου.....	48
Υπολογισμός Ωριαίας Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες.....	49
2.2.3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΝΗΜΙΤΟΝΟΥ	50
Περιστροφή γύρω από έναν άξονα.....	52
2.3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	55
3.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	56
3.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ.....	56
3.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΛΟΓΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ	59
Οπτικός Λόγος Συγκέντρωσης.....	59
Γεωμετρικός Λόγος Συγκέντρωσης	59
3.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	59

3.4.1. ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ STIRLING	60
Περιγραφή του κύκλου Stirling	61
Μηχανές Stirling	62
Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Stirling	64
Βαθμός απόδοσης ιδανικού κύκλου Stirling.....	65
Ρευστά λειτουργίας.....	66
Αποκλίσεις της λειτουργίας των πραγματικών μηχανών Stirling από τον ιδανικό κύκλο.....	66
3.4.2. ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON.....	67
Περιγραφή του κύκλου Brayton.....	67
Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Brayton.....	68
Ρευστά λειτουργίας.....	70
Αύξηση της απόδοσης του ιδανικού κύκλου Brayton	70
Αποκλίσεις της λειτουργίας των πραγματικών αεριοστροβίλων από τον ιδανικό κύκλο Brayton	73
3.4.3. ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE	74
Περιγραφή του κύκλου Rankine	74
Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Rankine.....	75
Ρευστά λειτουργίας.....	76
Αύξηση της απόδοσης του ιδανικού κύκλου Rankine	76
Αποκλίσεις της λειτουργίας των πραγματικών ατμοστροβίλων από τον ιδανικό κύκλο Rankine	78
3.4.4. ΑΛΛΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΙΣΧΥΟΣ	79
3.5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	80
3.5.1. ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΣΚΑΦΗΣ (PARABOLIC TROUGH COLLECTORS - PTCs).....	80
Περιγραφή - Αρχή Λειτουργίας Συστήματος	81
Κάτοπτρα-Δέκτες.....	82
Στοιχεία παραβολικής γεωμετρίας	82
Γωνία αποδοχής	85
Λόγος Συγκέντρωσης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης.....	86
Μέγιστος Λόγος Συγκέντρωσης – Μέγιστη Δυνατή Θερμοκρασία.....	87
Συντελεστής ανακοπής (intercept factor)	88
Οπτική απόδοση.....	91
Απόδοση Δέκτη	93
Εμπορικά διαθέσιμοι συλλέκτες	93
Δυνατότητες ενσωμάτωσης συλλεκτών παραβολικής σκάφης σε θερμοηλεκτρικές μονάδες	97
Συνοπτική καταγραφή των ηλιοθερμικών μονάδων παραβολικής σκάφης	98
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συλλεκτών παραβολικής σκάφης	108

3.5.2. ΗΛΙΑΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ (SOLAR POWER TOWERS)	109
Περιγραφή – Αρχή Λειτουργίας Συστήματος.....	109
Ιστορική ανασκόπηση	110
Ηλιοστάτες.....	111
Πεδίο ηλιοστατών	113
Δέκτες	118
Απόδοση δέκτη.....	121
Ρευστά μεταφοράς θερμότητας	121
Συνοπτική καταγραφή των ηλιοθερμικών μονάδων κεντρικού δέκτη.....	122
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ηλιακών πύργων.....	125
3.5.3. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΔΙΣΚΟΙ	126
Περιγραφή – Αρχή Λειτουργίας Συστήματος.....	126
Ιστορική ανασκόπηση	127
Κάτοπτρα.....	128
Οπτική απόδοση.....	132
Μέγιστος Λόγος Συγκέντρωσης – Μέγιστη Δυνατή Θερμοκρασία	133
Δέκτες	133
Απόδοση δέκτη.....	134
Εφαρμογή σε κύκλους ισχύος – Δυνατότητες ενσωμάτωσης σε θερμοηλεκτρικές μονάδες	135
Συνοπτική καταγραφή των ηλιοθερμικών μονάδων Δίσκου/Μηχανής	135
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διατάξεων Δισκων/Μηχανής	136
3.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ CSP ΣΤΟΝ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΟΡΩΝΗΣ ΣΤΗ ΡΟΔΟ-ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΡΥΠΩΝ	138
4.1. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ	140
4.1.1. Επιλογή μονάδας του ΘΗΣ Σορωνής για την ενσωμάτωση διάταξης συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας.....	142
4.2. ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΟΥ ΘΗΣ ΣΟΡΩΝΗΣ.....	142
4.2.1. Ατμοπαραγωγός του ΑΗΣ Σορωνής.....	144
4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ	146
4.3.1. Υπολογισμός Μηνιαίου Μέσου Ημερήσιου Δείκτη Αιθριότητας	146
4.3.2. Υπολογισμός συνιστωσών Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου.....	147
4.3.3. Υπολογισμός συνιστωσών Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου	148
4.3.4. Υπολογισμός συνιστωσών Ωριαίας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου.....	148
4.3.5. Υπολογισμός Ωριαίας Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες.....	151
4.4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CSP ΠΡΟΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΟΝ ΑΗΣ ΣΟΡΩΝΗΣ	154

4.4.1. Επιλογή Τεχνολογίας CSP	154
4.4.2. Στόχοι Σχεδίασης	155
Σημείο Σχεδίασης	155
Υπολογισμός Ζήτησης	155
Υπολογισμός Χωρητικότητας Αποθήκευσης για την κάλυψη της ζήτησης στο Σημείο Σχεδίασης	156
4.4.3. Επιλογή Υποσυστημάτων	156
Επιλογή και Χαρακτηριστικά Συλλεκτών.....	156
Επιλογή Ρευστού Μεταφοράς Θερμότητας (HTF)	157
Επιλογή Μέσου Αποθήκευσης Θερμότητας	158
4.4.4. Διαμόρφωση Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης – Συνοπτική Παρουσίαση της Λειτουργίας του Συστήματος	161
Διαμόρφωση εγκατάστασης	161
Συνοπτική Παρουσίαση της Λειτουργίας του Συστήματος.....	162
4.4.5. Υπολογισμός παροχών και θερμοκρασιών στο σημείο σχεδίασης – Διαστασιολόγηση Υποσυστημάτων – Υπολογισμός Κόστους Εγκατάστασης	163
Κόστος εναλλάκτη θερμότητας ως συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας	164
Κόστος αποθήκευσης ως συνάρτηση των θερμοκρασιών ψυχρής και θερμής δεξαμενής	165
Κόστος συλλεκτών ως συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας.....	167
Συνολικό Κόστος Εναλλάκτη Θερμότητας, Δεξαμενών Αποθήκευσης και Πεδίου Συλλεκτών, ως Συνάρτηση των Θερμοκρασιών Εισόδου και Εξόδου	172
Σχήμα 4.9: Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης συναρτήσει των θερμοκρασιών του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως.....	176
Διαστασιολόγηση Υποσυστημάτων - Υπολογισμός Παροχής Ρευστού Μεταφοράς Θερμότητας στο Σημείο Σχεδίασης	177
4.4.6. Ενεργειακή Παραγωγή της Εγκατάστασης – Εξοικονόμηση Καυσίμου και Ρύπων με την Ενσωμάτωσή της στον ΑΗΣ Σορώνης.....	181
Υπολογισμός Ενεργειακής Παραγωγής.....	181
Υπολογισμός Εξοικονόμησης Καυσίμου	182
Αποτελέσματα Υπολογισμών	182
4.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	194
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	196
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	198

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.4.1: Χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες αερίων λειτουργίας κύκλου Stirling	66
Πίνακας 3.5.1: Χαρακτηριστικά συλλεκτών Luz	94
Πίνακας 3.5.2: Εγκατεστημένες ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης	98
Πίνακας 3.5.3: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης υπό κατασκευή.....	107
Πίνακας 3.5.4: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης υπό ανάπτυξη.....	107
Πίνακας 3.5.5: Πειραματικοί Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος.....	110
Πίνακας 3.5.6: Ρευστά μεταφοράς θερμότητας σε δέκτες ηλιακών πύργων	121
Πίνακας 3.5.7: Εγκατεστημένες ηλιοθερμικές μονάδες κεντρικού δέκτη (ηλιακών πύργων).....	123
Πίνακας 3.5.8: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών κεντρικού δέκτη (ηλιακών πύργων) υπό κατασκευή	124
Πίνακας 3.5.9: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών κεντρικού δέκτη (ηλιακών πύργων) υπό ανάπτυξη.....	124
Πίνακας 4.1: Μεταβολή ηλεκτροπαραγωγής στη Ρόδο, για τα έτη 1996-2011.....	138
Πίνακας 4.2: Μονάδες ΘΗΣ Σορωνής της Ρόδου	141
Πίνακας 4.3: Ιδιότητες ρευστού λειτουργίας σε σημεία του κύκλου του ΑΗΣ Σορωνής	145
Πίνακας 4.4: Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας \bar{K}_T για το νησί της Ρόδου	147
Πίνακας 4.5: Συνιστώσες Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ακτινοβολίας για το νησί της Ρόδου.	147
Πίνακας 4.6: Συνιστώσες Ημερήσιας Ακτινοβολίας για το νησί της Ρόδου	148
Πίνακας 4.7: Διάρκεια ημέρας για τη μέση ημέρα κάθε μήνα για το νησί της Ρόδου	149
Πίνακας 4.8: Συνιστώσες ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, στο οριζόντιο επίπεδο, για τη μέση ημέρα κάθε μήνα για το νησί της Ρόδου	149
Πίνακας 4.9: Ωριαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία, σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες, για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, στο νησί της Ρόδου	152
Πίνακας 4.13: Ιδιότητες υποψηφίων ρευστών αποθήκευσης θερμότητας.....	160
Πίνακας 4.14: Υπολογισμός κόστους αποθήκευσης για τα 3 υποψήφια ρευστά αποθήκευσης θερμότητας.....	161
Πίνακας 4.15: Συνθήκες ακτινοβολίας και τιμές ζήτησης και ιδιοτήτων νερού στο σημείο σχεδίασης	164
Πίνακας 4.16: Ωριαίες τιμές ηλιακής ενέργειας και απόδοσης πεδίου συλλεκτών για τη μέση ημέρα του Ιουλίου.....	170
Πίνακας 4.17: Διαστασιολόγηση και κοστολόγηση εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορωνής.....	180
Πίνακας 4.18: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Ιανουαρίου.....	183
Πίνακας 4.19: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Φεβρουαρίου.....	183
Πίνακας 4.20: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Μαρτίου	184
Πίνακας 4.21: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Απριλίου.....	184

Πίνακας 4.22: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Μαΐου.....	185
Πίνακας 4.23: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Ιουνίου	185
Πίνακας 4.24: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Ιουλίου	186
Πίνακας 4.25: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Αυγούστου	186
Πίνακας 4.26: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Σεπτεμβρίου.....	187
Πίνακας 4.27: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Οκτωβρίου	187
Πίνακας 4.28: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Νοεμβρίου	188
Πίνακας 4.29: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Δεκεμβρίου	188
Πίνακας 4.30: Μέσες τιμές εκπεμπόμενων ρύπων κατά την καύση του μαζούτ	189
Πίνακας 4.31: Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας και Εξοικονόμηση Καυσίμου και Ρύπων στον ΑΗΣ Σορωνής ...	189
Πίνακας Π1: Μέση Μηνιαία και Ετήσια Ολική Ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m ² .mo)].....	198
Πίνακας Π2: Σύγκριση Μηνιαίων Μέσων Ημερήσιων Δεικτών Διάχυσης \bar{K}_d κατά Lalas et al. και κατά Erbs et al για την περιοχή της Ρόδου	199
Πίνακας Π3: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Ιανουαρίου για την περιοχή της Ρόδου	200
Πίνακας Π4: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Φεβρουαρίου για την περιοχή της Ρόδου	201
Πίνακας Π5: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Μαρτίου για την περιοχή της Ρόδου.....	202
Πίνακας Π6: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Απριλίου για την περιοχή της Ρόδου	203
Πίνακας Π7: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Μαΐου για την περιοχή της Ρόδου	204
Πίνακας Π8: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Ιουνίου για την περιοχή της Ρόδου.....	205
Πίνακας Π9: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Ιουλίου για την περιοχή της Ρόδου.....	206
Πίνακας Π10: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Αυγούστου για την περιοχή της Ρόδου.....	207
Πίνακας Π11: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Σεπτεμβρίου για την περιοχή της Ρόδου	208
Πίνακας Π12: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Οκτωβρίου για την περιοχή της Ρόδου	209
Πίνακας Π13: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Νοεμβρίου για την περιοχή της Ρόδου	210
Πίνακας Π14: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Δεκεμβρίου για την περιοχή της Ρόδου.....	211
Πίνακας Π15: Συνιστώσες ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, στο οριζόντιο επίπεδο, για τη Ρόδο.....	212
Πίνακας Π16: Ωριαίες ηλιακές γωνίες για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, στη Ρόδο.....	216

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.2.1: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα	21
Σχήμα 1.2.3.2: Δομικό διάγραμμα τυπικής μονάδας CSP	22
Σχήμα 1.3.1: Κατανομή πηγών ενέργειας στην τελική καταναλισκόμενη ενέργεια του έτους 2009 και Ποσοστό συμμετοχής των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ	25
Σχήμα 1.3.2: Συμμετοχή των διαφόρων μορφών ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων των ΑΠΕ) στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του έτους 2010	25
Σχήμα 1.3.3: Μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ, ανά κατηγορία, και βιοκαυσίμων	26
Σχήμα 1.4.1: Συμμετοχή των ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του έτους 2009 και αντίστοιχος στόχος έως το 2010, σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2001/77	29
Σχήμα 1.4.2: Συμμετοχή των ΑΠΕ στην συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια του έτους 2009 και αντίστοιχος στόχος έως το 2010, σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2009/28	30
Σχήμα 1.4.3: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φωτοβολταϊκών συστημάτων στα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και σύγκριση με το στόχο της Λευκής Βίβλου	31
Σχήμα 1.4.4: Συνολική επιφάνεια εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών στα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και σύγκριση με το στόχο της Λευκής Βίβλου	32
Σχήμα 2.1.1: Ουράνια σφαίρα και γωνία απόκλισης δ	36
Σχήμα 2.1.2: Ηλιακή ωριαία γωνία για σημείο P στην επιφάνεια της Γης.....	37
Σχήμα 2.1.3: Γωνίες ηλιακού ζενίθ, ηλιακού ύψους και ηλιακού αζιμουθίου	38
Σχήμα 2.2.1: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας	39
Σχήμα 2.2.2: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας για διαφορετικές τιμές της μάζας αέρα, σε αίθριες συνθήκες	42
Σχήμα 2.2.3: Διάνυσμα διεύθυνσης της καθέτου επιφάνειας τυχαίου προσανατολισμού N, ως προς σύστημα συντεταγμένων Onez, με τις γωνίες κλίσης β και αζιμουθίου γ	50
Σχήμα 2.2.4: Ανάλυση του διανύσματος S της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων	52
Σχήμα 2.2.5: Γεωμετρική σχέση μεταξύ των συστημάτων συντεταγμένων Orbu και Onez	53
Σχήμα 3.4.1: Διάγραμμα P-u και Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Stirling.....	60
Σχήμα 3.4.2: Μηχανή Stirling άλφα διαμόρφωσης	62
Σχήμα 3.4.3: Μηχανή Stirling βήτα διαμόρφωσης	63
Σχήμα 3.4.4: Μηχανή Stirling γάμα διαμόρφωσης.....	64
Σχήμα 3.4.5: Διάγραμμα P-u και Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Brayton	67
Σχήμα 3.4.6: Ανοιχτός και Κλειστός κύκλος Brayton	68
Σχήμα 3.4.7: Μηχανή αεριοστροβίλου με αναγεννητήρα	70

Σχήμα 3.4.8: Διάγραμμα T-s κύκλου Brayton με αναγέννηση (προθέρμανση)	71
Σχήμα 3.4.9: Μηχανή αεριοστροβίλου με δύο στάδια συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη και δύο βαθμίδες εκτόνωσης, με αναθέρμανση και προθέρμανση και Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου αεριοστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη αναθέρμανση και αναγέννηση.....	72
Σχήμα 3.4.10: Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine και Ατμοστρόβιλος Rankine	74
Σχήμα 3.4.11: Ατμοστρόβιλος με δύο βαθμίδες εκτόνωσης και αναθέρμανση και Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση.....	78
Σχήμα 3.5.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών ηλιοθερμικής εγκατάστασης με συλλέκτες παραβολικής σκάφης	81
Σχήμα 3.5.2: Παραβολή	82
Σχήμα 3.5.3: (α) Ακτίνες παράλληλες στον άξονα της παραβολής, (β) Ακτίνες με απόκλιση 1 μοίρας από τον άξονα της παραβολής	85
Σχήμα 3.5.4: Τομή συλλέκτη παραβολικής σκάφης	86
Σχήμα 3.5.5: Ανάκλαση μη παράλληλων ηλιακών ακτίνων από παραβολικό κάτοπτρο.....	90
Σχήμα 3.5.6: Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με την πυκνότητα του πεδίου συλλεκτών παραβολικής σκάφης	92
Σχήμα 3.5.7: Πρόοψη και οπίσθια όψη των συλλεκτών LS-3.....	93
Σχήμα 3.5.8: Πρόοψη και οπίσθια όψη των συλλεκτών Eurotrough	95
Σχήμα 3.5.9: Οπίσθια όψη συλλέκτη SENERTROUGH-1.....	96
Σχήμα 3.5.10: Διάγραμμα ροής διεργασιών ηλιοθερμικής εγκατάστασης ηλιακού πύργου	109
Σχήμα 3.5.11: Οπίσθια όψη ηλιοστάτη της εγκατάστασης Solar Two στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ	111
Σχήμα 3.5.12: Σχηματικό διάγραμμα ηλιοστάτη τανυσμένης μεμβράνης.....	112
Σχήμα 3.5.14: Απόδοση συνημιτόνου του πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Solar One στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και Απόδοση συνημιτόνου του πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Sierra Suntower στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ.....	114
Σχήμα 3.5.15: Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με τη μεταβολή του μεγέθους του ηλιοστάτη, Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με την ώρα και ημέρα του χρόνου, Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με το γεωγραφικό πλάτος, Απόδοση σκίασης και παρεμβολής του πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Sierra Suntower στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ.....	115
Σχήμα 3.5.16: Απόδοση πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Sierra Suntower στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και Απόδοση πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης PS10 στην Ισπανία	117
Σχήμα 3.5.17: Σχηματική αναπαράσταση του εξωτερικού δέκτη στην εγκατάσταση Solar One της Καλιφόρνια των ΗΠΑ.....	119
Σχήμα 3.5.18: Σχηματική αναπαράσταση κεντρικού δέκτη τύπου κοιλότητας	120
Σχήμα 3.5.19: Ηλιοθερμική διάταξη Δίσκου/Stirling με τα συστατικά της στοιχεία	126
Σχήμα 3.5.20: Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη παραβολοειδούς	128
Σχήμα 3.5.21: Δίσκος πολλαπλών κατόπτρων της McDonnell Douglas στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ	130
Σχήμα 3.5.22: Δίσκος πλήρους παραβολοειδούς επιφάνειας της Eurodish	131

Σχήμα 3.5.23: Δίσκος πολλαπλών τανυσμένων μεμβρανών της SAIC/STM.....	132
Σχήμα 3.5.24: Σχηματική αναπαράσταση του δέκτη του Δίσκου/Stirling της Eurodish	134
Σχήμα 4.1: Μεταβολή ηλεκτροπαραγωγής στη Ρόδο, για τα έτη 1996-2011	139
Σχήμα 4.2: Μηνιαία Ηλεκτροπαραγωγή Νήσου Ρόδου κατά το έτος 2011, ανά πηγή ενέργειας.....	140
Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου λειτουργίας της ατμοστροβλικής μονάδας του ΘΗΣ Σορωνής.....	143
Σχήμα 4.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας κατά τη ροή του στους αγωγούς του ατμοπαραγωγού.....	144
Σχήμα 4.5: Λειτουργικό διάγραμμα εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης με δύο δεξαμενές αποθήκευσης	162
Σχήμα 4.6: Κόστος Εναλλάκτη Θερμότητας συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως.....	173
Σχήμα 4.7: Κόστος Αποθήκευσης συναρτήσει των θερμοκρασιών θερμής και ψυχρής δεξαμενής T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως.	174
Σχήμα 4.8: Κόστος Συλλεκτών συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως.....	175
Σχήμα 4.9: Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης συναρτήσει των θερμοκρασιών του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως	176
Σχήμα 4.10: Παραγωγή Ενέργειας Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης του ΑΗΣ Σορωνής (Μηνιαίες και Ετήσιες Αθροιστικές τιμές).....	190
Σχήμα 4.11: Κάλυψη Ζήτησης Ατμοστροβίλου του ΑΗΣ Σορωνής σε θερμότητα εκπεφρασμένης σε ώρες λειτουργίας του ατμοστροβίλου και ως ποσοστό επί τοις εκατό, από την ενσωμάτωση πεδίου συλλεκτών παραβολικής σκάφης.....	191
Σχήμα 4.12: Εκτόπιση Καυσίμου και Εξοικονόμηση Κόστους Καυσίμου (Μηνιαίες και Ετήσιες Αθροιστικές τιμές), από την ενσωμάτωση εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορωνής	192
Σχήμα 4.13: Εξοικονόμηση Ρύπων, ανά ρυπογόνο ουσία, (Μηνιαίες Τιμές) από την ενσωμάτωση εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορωνής.	193

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια στη μορφή της ηλιακής ακτινοβολίας ή της θερμότητας από τα αρχαία χρόνια, κάνοντας χρήση διαρκώς εξελισσόμενων τεχνικών και τεχνολογιών. Η ηλιακή ενέργεια σε συνδυασμό με άλλες παράγωγες πηγές ενέργειας που εξαρτώνται από αυτή, όπως η αιολική και η ενέργεια από κύματα, καθώς και η υδροηλεκτρική ενέργεια και η παραγωγή ενέργειας από βιομάζα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον πλανήτη. Ωστόσο, μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού αξιοποιείται.

Η Γη δέχεται περίπου 174 petawatts (10^{15} W) ηλιακής ενέργειας στην ανώτερη ατμόσφαιρά της^[1]. Από αυτά, ένα ποσοστό περίπου 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τα νέφη, τους ωκεανούς και το έδαφος. Το συνολικό μέγεθος της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται είναι περίπου 3.850.000 exajoules (10^{18} joule) ανά έτος ή 3,8YJ (10^{24} joules). Προς σύγκριση, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας το 2008 ανήλθε σε περίπου 474 EJ^[2], ενώ οι προβλέψεις για τη συνολική ενέργεια των διαθέσιμων ορυκτών και πυρηνικών καυσίμων μέχρι την εξάντλησή τους ανέρχονται σε 0,4YJ και 2,8YJ^[2] αντίστοιχα. Από τα παραπάνω στοιχεία, φαίνεται ότι η ετήσια ροή ηλιακής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από το συνολικό ενεργειακό δυναμικό των εναπομεινάντων ορυκτών και πυρηνικών καυσίμων μαζί.

Είναι προφανές ότι δεν είναι διαθέσιμο προς αξιοποίηση το σύνολο της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει με τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας στη γη. Εξάλλου, αναφέρθηκε ότι ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας μετατρέπεται σε άλλες μορφές, όπως η αιολική ή η ενέργεια βιομάζας. Είναι ωστόσο επίσης γεγονός, ότι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας ως εναλλακτικής, ανανεώσιμης πηγής ενέργειας παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η χρήση της για παραγωγή θερμότητας το 2005 ανερχόταν στο 0,5% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας^[3], ενώ την ίδια χρονιά το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ ανερχόταν μόλις στο 0,04%^[3].

1.2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

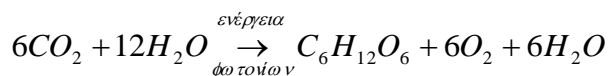
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται περιληπτικά οι χρήσεις και εφαρμογές που βρίσκει η ηλιακή ενέργεια και η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, είτε άμεσα είτε μέσω της μετατροπής της σε άλλες μορφές ενέργειας.

1.2.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την κινητήρια δύναμη για ένα πλήθος φυσικών φαινομένων, καθώς και το «καύσιμο» για πολλές φυσικές διεργασίες.

Μία από τις γνωστότερες είναι φυσικά η *φωτοσύνθεση*, η χημική διεργασία κατά την οποία οι φωτοαυτότροφοι οργανισμοί (πράσινα φυτά, άλγη και κάποια βακτήρια) δεσμεύουν την ηλιακή

ενέργεια και τη χρησιμοποιούν για τη μετατροπή διοξειδίου του άνθρακα και νερού σε οξυγόνο και ενεργειακά πλούσιες οργανικές ενώσεις (κυρίως υδατάνθρακες), κατά την εξίσωση:



Με τη διεργασία αυτή, η ηλιακή ενέργεια μετασχηματίζεται σε χημική και δεσμεύεται στις παράγωγες ενώσεις. Θεωρητικά, ο μέγιστος βαθμός μετατροπής, ή η μέγιστη απόδοση, της διεργασίας κυμαίνεται μεταξύ 5 και 6%. Στην πράξη, η απόδοσή της δεν ξεπερνά το 4% στα τροπικά δάση, και το 0,25-0,75% στις καλλιέργειες^[4]. Πέρα από τον προφανή ρόλο της φωτοσύνθεσης ως θεμελιώδους λειτουργίας για τη διατήρηση και ανάπτυξη της τροφικής αλυσίδας, η ίδια διεργασία μπορεί να μας προμηθεύσει με ενέργεια σε μορφή θερμογόνου δύναμης (βιοκαύσιμα), ή θερμότητας (μέσω της καύσης της βιομάζας).

Η ηλιακή ενέργεια, ως πηγή θερμότητας, είναι υπεύθυνη επίσης για την παρουσία φυσικών φαινομένων, όπως είναι οι μεγάλης κλίμακας κινήσεις αέριων μαζών (άνεμος) λόγω θερμοκρασιακών διαφορών και δημιουργίας διαφορικών πιέσεων. Κατ' επέκταση η *αιολική ενέργεια*, μία υψηλής ποιότητας (υψηλής εξέργειας) μορφή μηχανικής ενέργειας, είναι απλά η μετατροπή μέρους της θερμικής ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας σε κινητική ενέργεια αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα. Η ηλιακή ενέργεια είναι επίσης, πρωτίστως, υπεύθυνη και για τη δημιουργία των θαλάσσιων κυμάτων, που δημιουργούνται κατά τη μεταφορά κινητικής ενέργειας από τον αέρα στα γειτονικά επιφανειακά στρώματα νερού. Η ενέργεια των κυμάτων είναι επίσης μηχανική ενέργεια, επομένως είναι πλήρως διαθέσιμη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση κατάλληλων μετατροπέων.

1.2.2. ΘΕΡΜΑΝΣΗ - ΨΥΞΗ

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη θέρμανση χώρων και νερού. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αυτές διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά συστήματα. Τα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούν αντλίες για την κυκλοφορία του νερού μέσα στο σύστημα, ενώ στα παθητικά συστήματα η κυκλοφορία πραγματοποιείται με φυσική συναγωγή.

Τα συστήματα θέρμανσης νερού τυπικά αποτελούνται από τον ηλιακό συλλέκτη, τους αγωγούς κυκλοφορίας του νερού και τη δεξαμενή αποθήκευσης του θερμού νερού. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από μία επίπεδη μεταλλική πλάκα, με κατάλληλο μαύρο επίχρυσμα για την αποτελεσματικότερη απορρόφηση της ακτινοβολίας και επικολλημένους χάλκινους σωλήνες για την κυκλοφορία του νερού. Συνήθως, η μεταλλική πλάκα καλύπτεται από μία ή περισσότερες στρώσεις γυαλιού ή διαφανούς πολυμερούς (όπως τα πολυανθρακικά) για την προστασία του συλλέκτη από το περιβάλλον, αλλά και για καλύτερη μόνωση και επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών. Στην περίπτωση των άμεσων συστημάτων ή συστημάτων ανοιχτού βρόχου, το νερό περνάει απευθείας από τους αγωγούς του συλλέκτη, όπου και θερμαίνεται, ενώ στα έμμεσα συστήματα ή συστήματα κλειστού βρόχου, η μεταφορά θερμότητας στο δεξαμενή γίνεται μέσω εναλλακτών θερμότητας. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται συνήθως για αυτό το σκοπό είναι η προπυλενική γλυκόλη.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί και για τη θέρμανση χώρων. Στην περίπτωση αυτή, ο ατμοσφαιρικός αέρας υπόκειται σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία, μέσω των επιφανειών

απορρόφησης της ακτινοβολίας, όπου και θερμαίνεται μέσω συναγωγής. Στη συνέχεια προωθείται στους προς θέρμανση χώρους μέσω του συστήματος εξαερισμού του κτιρίου.

Εκτός από θέρμανση, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ψύξη και αφύγρανση χώρων. Κατά κανόνα, η ψύξη γίνεται με απορρόφηση ενός ψυκτικού μέσου από ένα μέσο μεταφοράς. Το σύστημα ψύξης απορρόφησης που χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση είναι το σύστημα αμμωνίας-νερού. Στο σύστημα αυτό, η αμμωνία παίζει το ρόλο του ψυκτικού και το νερό το ρόλο του μέσου μεταφοράς, ενώ η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται ως πηγή θερμότητας για την εξάτμιση της αμμωνίας στο διάλυμα αμμωνίας νερού, και την ολοκλήρωση του κύκλου ψύξης. Για την αφύγρανση χώρων χρησιμοποιούνται υγροσκοπικές ουσίες (όπως πυριτικές γέλες, θειικά άλατα και χλωρίδια του ασβεστίου), οι οποίες απορροφούν την υγρασία από τον αέρα του περιβάλλοντος χώρου, ενώ η ηλιακή ενέργεια παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για την ξήρανσή τους, και την επανάληψη της διαδικασίας.

1.2.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίζονται στις άμεσες και έμμεσες μεθόδους.

Άμεσες Μέθοδοι

Οι άμεσες μέθοδοι εκμεταλλεύονται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες. Σε αυτές η μετατροπή της ενέργειας γίνεται με τη χρήση ημιαγωγών που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από έναν αριθμό κυψελών, αποτελούμενων από φωτοβολταϊκό υλικό. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φωτοβολταϊκών κυψελών είναι κυρίως το μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο, το τελουρίδιο του καδμίου και το σεληνίδιο/σουλφίδιο του χαλκού και ινδίου^[5].

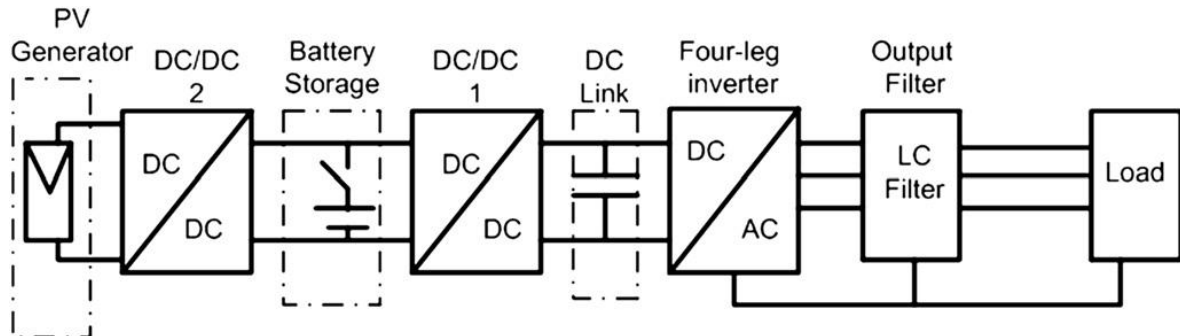
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται στη δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού (και του επακόλουθου ηλεκτρικού ρεύματος) σε ένα υλικό, κατά την έκθεσή του στο φως. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία προσδίδει ενέργεια στα ηλεκτρόνια του υλικού, ικανή ώστε ορισμένα από αυτά να μεταπηδήσουν από τη στοιβάδα σθένους (valence band) στη στοιβάδα αγωγής (conduction band), επιτρέποντας σε αυτά να λειτουργούν ως ελεύθεροι φορείς. Όταν δύο ημιαγωγοί, τύπου p και n αντίστοιχα, ενωθούν, τότε τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται προς διαφορετικές κατευθύνσεις, λόγω του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή εξάντλησης (depletion region), οδηγώντας στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα συστήματα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων διακρίνονται στα:

- Αυτόνομα συστήματα
- Διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα

Τα δύο συστήματα δε διαφέρουν μεταξύ τους, ωστόσο στα αυτόνομα η απαίτηση είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος και η μεγάλη διαθεσιμότητα, και για το λόγο αυτό συνοδεύονται από κάποια μορφή αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως στη μορφή μπαταριών.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το βασικό σχηματικό διάγραμμα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με τα εξαρτήματα που το απαρτίζουν:



Σχήμα 1.2.1: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα (Πηγή: R. Nasiri, Ahmad Radan. “Adaptive pole-placement control of 4-leg voltage-source inverters for standalone photovoltaic systems”, 2011)

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται:

- Το φωτοβολταϊκό πάνελ (PV Generator) το οποίο συλλέγει την ηλιακή ενέργεια και παράγει συνεχές ρεύμα.
- Οι μετατροπείς DC/DC 1 και 2. Ο μετατροπέας DC/DC 2 είναι μετατροπέας ενίσχυσης, και η λειτουργία του είναι η προσαρμογή του φορτίου, έτσι ώστε η φόρτιση της μπαταρίας (Battery Storage) να γίνεται πάντοτε στο σημείο μέγιστης ισχύος (σημείο καμψής στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V κάθε φωτοβολταϊκής κυψέλης). Ο μετατροπέας DC/DC 1 αναλαμβάνει την ανύψωση της DC τάσης εξόδου σε επίπεδα συμβατά με την είσοδο του αντιστροφέα.
- Ο αντιστροφέας (Inverter) μετατρέπει την σταθερή τάση εισόδου σε τριφασική εναλλασσόμενη για την τροφοδότηση του φορτίου, ενώ το φίλτρο LC αναλαμβάνει την εξομάλυνσή της.

Με την ως άνω διάταξη, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παρέχουν τριφασική, καθώς και μονοφασική, ισχύ σε φορτία κάθε είδους με ημιτονοειδή τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών έχει ξεπεράσει το 30% σε εργαστηριακές συνθήκες, ωστόσο η απόδοση των εμπορικών συστημάτων είναι περίπου η μισή.

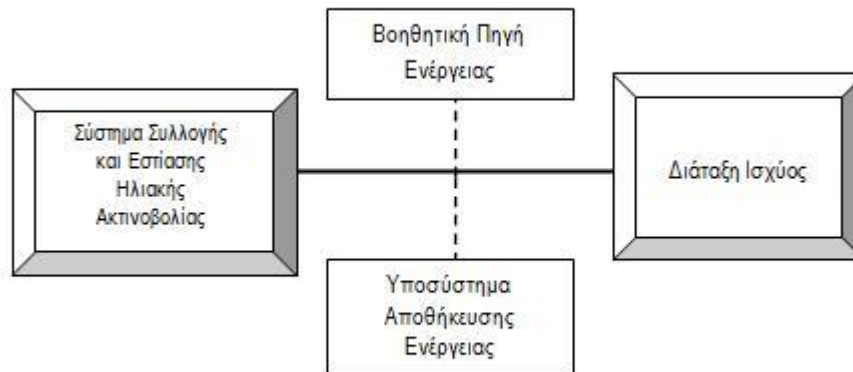
Έμμεσες Μέθοδοι

Στις έμμεσες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια συγκαταλέγονται τα συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP - Concentrated Solar Power) ή ηλιοθερμικά (solar thermal) συστήματα. Η πλήρης ανάλυσή τους θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο. Εδώ θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των βασικών τους υποσυστημάτων και της αρχής λειτουργίας τους.

Στις μονάδες αυτές, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την πραγματοποίηση ενός θερμοδυναμικού κύκλου από κάποιο ρευστό λειτουργίας. Υπό την έννοια αυτή, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ως «καύσιμο», υποκαθιστώντας τα συμβατικά καύσιμα στις μονάδες αυτές. Το προφανές πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας χωρίς ρύπους, αξιοποιώντας ώριμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το βασικό δομικό διάγραμμα που αντιστοιχεί σε κάθε μονάδα CSP:



Σχήμα 1.2.3.2: Δομικό διάγραμμα τοπικής μονάδας CSP.

Σύστημα Συλλογής και Εστίασης Ηλιακής Ακτινοβολίας: Αποτελείται από τον ηλιακό συλλέκτη (ή πεδίο συλλεκτών) και το δέκτη. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι οι επιφάνειες πάνω στις οποίες προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία και αναλαμβάνουν να την ανακλούν, έτσι ώστε αυτή να εστιάζεται στο δέκτη. Η λειτουργία του δέκτη συνοψίζεται στην απορρόφηση της εστιασμένης ακτινοβολίας, και τη μεταφορά θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας. Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη διάταξη, οι συλλέκτες μπορούν να είναι στατικοί, ή να διαθέτουν συστήματα παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης σε έναν ή δύο άξονες. Τόσο οι συλλέκτες, όσο και ο δέκτης έχουν γεωμετρία που διαφέρει από διάταξη σε διάταξη ανάλογα με τον τύπο της εστίασης (σημειακή ή γραμμική) και τον επιδιωκόμενο βαθμό συγκέντρωσης.

Βοηθητική Πηγή Ενέργειας: Η προσθήκη βοηθητικής πηγής ενέργειας (συμβατικών καυσίμων όπως ο γαιάνθρακας, ο λιγνίτης, ή το πετρέλαιο) μπορεί να αυξήσει το βαθμό διαθεσιμότητας της μονάδας CSP σε περιόδους όπου είτε οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν ευνοούν (εκτεταμένες περιόδους συννεφιάς), είτε η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (όπως π.χ. κατά τη χειμερινή περίοδο). Οι μονάδες που διαθέτουν βοηθητική πηγή ενέργειας ονομάζονται υβριδικές.

Υποσύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας: Η ηλιακή ενέργεια εκ της φύσεώς της ανήκει στις διακοπτόμενες (intermittent) πηγές ενέργειας, λόγω της αλλαγής των κλιματικών και ατμοσφαιρικών συνθηκών. Ακόμη όμως και κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας, η προσπίπτουσα ενέργεια ακτινοβολίας μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα. Επομένως, μονάδες που αξιοποιούν αποκλειστικά την ηλιακή ενέργεια, και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μόνο όταν αυτή είναι διαθέσιμη δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονάδες βάσης (μονάδες δηλαδή που παρέχουν μια σταθερή τιμή ισχύος στο δίκτυο), όπως επίσης και δε μπορούν να ανταποκριθούν σε μεταβολές της ζήτησης. Επιπλέον, δε μπορούν να παρέχουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν πλέον δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Για το λόγο αυτό, σε πολλές μονάδες σχεδιάζεται και εγκαθίσταται κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, η πλεονάζουσα ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια

της ημέρας αποθηκεύεται αντί να απορρίπτεται, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν αυξηθεί η ζήτηση, ή όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί για την κάλυψή της. Για μία πλήρη καταγραφή και περιγραφή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις μονάδες CSP, μπορεί κανείς να ανατρέξει στην εργασία των Antoni Gil et al.^[7]. Εδώ θα περιοριστούμε να αναφέρουμε τις σημαντικότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται.

Στις μονάδες CSP, η καταλληλότερη μορφή ενέργειας προς αποθήκευση είναι η *θερμική ενέργεια*^[7]. Αυτή μπορεί να αποθηκευτεί ως *αισθητή ενέργεια*, ως *λανθάνουσα ενέργεια* ή ως *χημική ενέργεια*.

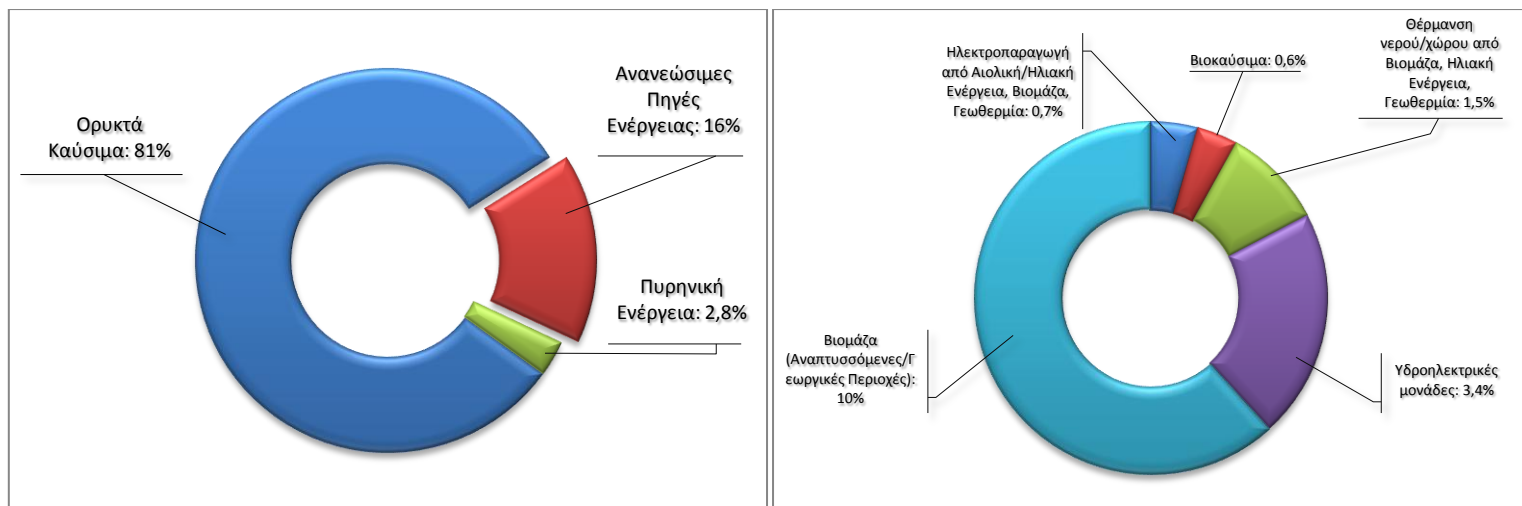
- Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής ενέργειας αποτελούνται από μία ή δύο δεξαμενές αποθήκευσης, και εκμεταλλεύονται τη θερμοχωρητικότητα των ρευστών ή υλικών που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας. Στην περίπτωση της μίας δεξαμενής, γίνεται χρήση του φαινομένου της θερμικής διαστρωμάτωσης στον όγκο του ρευστού (θερμοκλίνη), όπου ο θερμότερος όγκος του ρευστού ανελκύεται στο άνω μέρος της δεξαμενής, και ο ψυχρός παραμένει στα χαμηλότερα στρώματα. Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο δεξαμενές, η μία αποθηκεύει το θερμό ρευστό, και η δεύτερη το ψυχρό. Η θερμότητα μπορεί επίσης να αποθηκευθεί ως αισθητή ενέργεια και σε υλικά σε στερεή φάση (σκυρόδεμα, κεραμικά υλικά). Στην περίπτωση αυτή, η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω ρευστού, το οποίο εναλλάσσει θερμότητα με το στερεό.
- Στα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας, η θερμότητα αποθηκεύεται και αντλείται ισόθερμα, από ρευστά ή υλικά κατά τη διεργασία αλλαγής της φάσης τους (εξάτμιση-συμπύκνωση ή τήξη-στερεοποίηση). Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η μετάβαση από στερεό σε υγρό και αντίστροφα. Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης χαρακτηρίζεται από μικρότερες απαιτήσεις όγκου, και είναι σημαντικά οικονομικότερη, σε σχέση με τα μονοφασικά συστήματα, λόγω της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας τήξης ή εξάτμισης που χαρακτηρίζει τις διεργασίες.
- Η θερμική ενέργεια μπορεί επίσης να αποθηκευτεί ως ενέργεια δεσμών ή χημική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή, η πλεονάζουσα ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση μιας ενδόθερμης χημικής αντίδρασης. Όταν απαιτηθεί, η θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί μέσω της αντίστροφης (εξώθερμης) αντίδρασης. Για το λόγο αυτό απαιτείται, η χημική αντίδραση που επιλέγεται για την αποθήκευση, να είναι πλήρως αντιστρεπτή. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε υψηλές πυκνότητες και μακρόχρονη αποθήκευση, χωρίς απώλειες, σε συνθήκες περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, η έρευνα στον τομέα των αντιστρεπτών θερμοχημικών αντιδράσεων είναι εντατική, και η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά υποσχόμενη ως προς την πραγμάτωση του στόχου για συνεχή (24ωρη) παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Διάταξη Ισχύος: Στη διάταξη αυτή συμπεριλαμβάνονται, από πλευράς σχεδίασης και υλοποίησης, ο θερμοδυναμικός κύκλος ισχύος (συνηθέστερα κύκλοι ατμού και αερίων, αλλά και οργανικοί κύκλοι σε κάποιες περιπτώσεις), το ρευστό λειτουργίας που υπόκειται σε αυτόν (νερό, αέρια, οργανικά ρευστά), καθώς και η θερμική μηχανή για την παραγωγή μηχανικού έργου (π.χ. ατμοστρόβιλο, αεριοστρόβιλο, μηχανές Stirling). Στη διάταξη αυτή συμπεριλαμβάνονται επίσης και τα υπόλοιπα εξαρτήματα και μηχανές που πραγματοποιούν διεργασίες του κύκλου (όπως βραστήρες, συμπυκνωτές, αντλίες και εναλλάκτες θερμότητας).

1.3. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

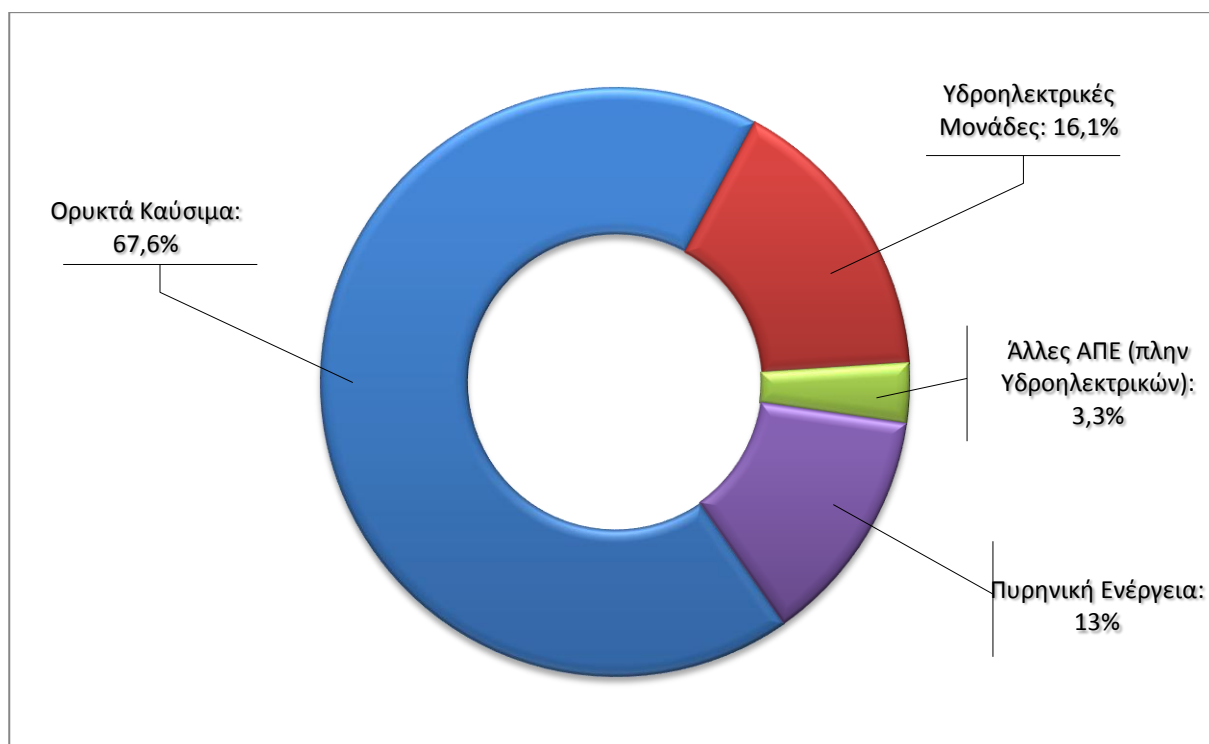
Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας το 2010 παρουσίασε αύξηση κατά 5,6% σε σχέση με το προηγούμενο έτος^[8]. Η ποσοστιαία αυτή αύξηση είναι η μεγαλύτερη από το 1975. Η συνολική κατανάλωση ξεπέρασε το προηγούμενο υψηλό του 2008, του τελευταίου έτους πριν την πρόσφατη ύφεση της παγκόσμιας οικονομίας. Η αύξηση της κατανάλωσης πραγματοποιήθηκε με μεγαλύτερους του μέσου ρυθμούς τόσο στις χώρες-μέλη του ΟΟΣΑ (αύξηση κατά 3,5%, η μεγαλύτερη από το 1984), όσο και στις αναπτυσσόμενες οικονομίες (αύξηση κατά 7,5%). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης υπήρξε μεγαλύτερη από την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, γεγονός που σημαίνει ότι η ενεργειακή ένταση της οικονομικής δραστηριότητας αυξήθηκε για δεύτερη συνεχή χρονιά. Επίσης, η χρήση ορυκτών πόρων ως καύσιμης ύλης γνώρισε τον υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης από το 1969, με συνεπακόλουθη την αντίστοιχη αύξηση των εκπομπών CO₂ και των υπολοίπων «αερίων του θερμοκηπίου». Η τελευταία υπήρξε η μεγαλύτερη από ποτέ, καθιστώντας τον στόχο για περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας στον πλανήτη κατά 2 °C, σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, δύσκολα επιτεύξιμο.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γνωρίζουν παράλληλη ανάπτυξη με τις συμβατικές, συμβάλλοντας σε ολοένα μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας. Κατά το 2010, οι ανανεώσιμες πηγές προμήθευσαν το 16%, κατ' εκτίμηση, της παγκόσμιας τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ στην ηλεκτροπαραγωγή το ποσοστό αυτό προσέγγισε το 20% μέχρι το τέλος του έτους^[9]. Επίσης, περίπου το ήμισυ των 194GW επιπλέον ισχύος που εγκαταστάθηκε κατά το 2010 προήλθε από αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας^[9]. Από αυτές η ηλιακή ενέργεια γνώρισε τη μεγαλύτερη αύξηση, λόγω της μείωσης του κόστους, με τη συνολικά εγκατεστημένη ισχύ από φωτοβολταϊκά να διπλασιάζεται. Τα νούμερα αυτά φαίνονται υψηλά, ωστόσο η θετική εικόνα μετριάζεται εάν ληφθεί υπόψιν η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (primary energy consumption). Σε αυτή την περίπτωση, το αντίστοιχο ποσοστό από ανανεώσιμες πηγές (πλην των υδροηλεκτρικών μονάδων) ανέρχεται στο 1,3%^[8]. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η συμμετοχή των διάφορων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική καταναλισκόμενη ενέργεια, καθώς και η συμμετοχή κάθε τεχνολογίας ξεχωριστά:



Σχήμα 1.3.1: (Αριστερά) Κατανομή πηγών ενέργειας στην τελική καταναλισκόμενη ενέργεια του έτους 2009. (Δεξιά) Ποσοστό συμμετοχής των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ (Πηγή: Renewables Global Status Report 2011).

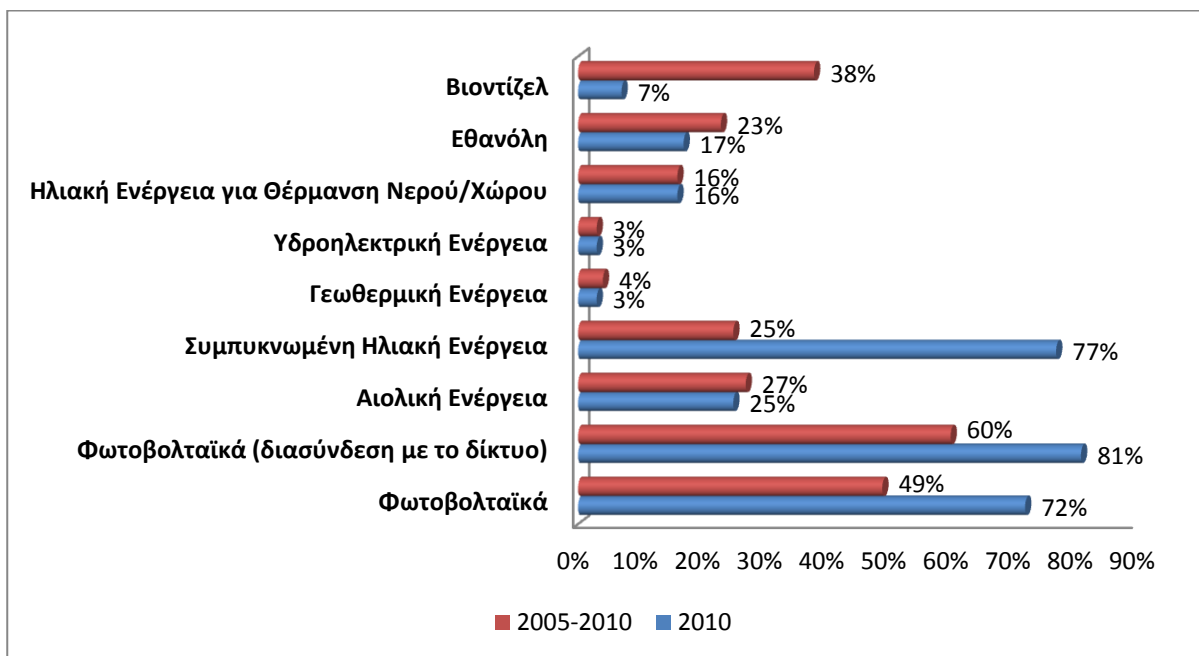
Η συμμετοχή των διαφόρων μορφών ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κατά το έτος 2010, φαίνεται αντίστοιχα στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.3.2: Συμμετοχή των διαφόρων μορφών ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων των ΑΠΕ) στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του έτους 2010 (Πηγή: Renewables Global Status Report 2011).

Κατά την περίοδο 2005-2010 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς πολλών τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μεταξύ των οποίων τα φωτοβολταϊκά, η αιολική ενέργεια, η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, τα θερμοσιφωνικά συστήματα και τα βιοκαύσιμα, αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό μεταξύ 15 και 50%. Το μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης γνώρισαν τα φωτοβολταϊκά

συστήματα, ακολουθούμενα από τα βιοκαύσιμα και τα αιολικά πάρκα. Ειδικά τα συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας γνώρισαν ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης το 2010, απ'ό,τι τα 4 προηγούμενα έτη. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέσοι ετήσιοι ρυθμοί ανάπτυξης διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ, όπου και φαίνεται καθαρά η ραγδαία ανάπτυξη που γνωρίζουν οι τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.



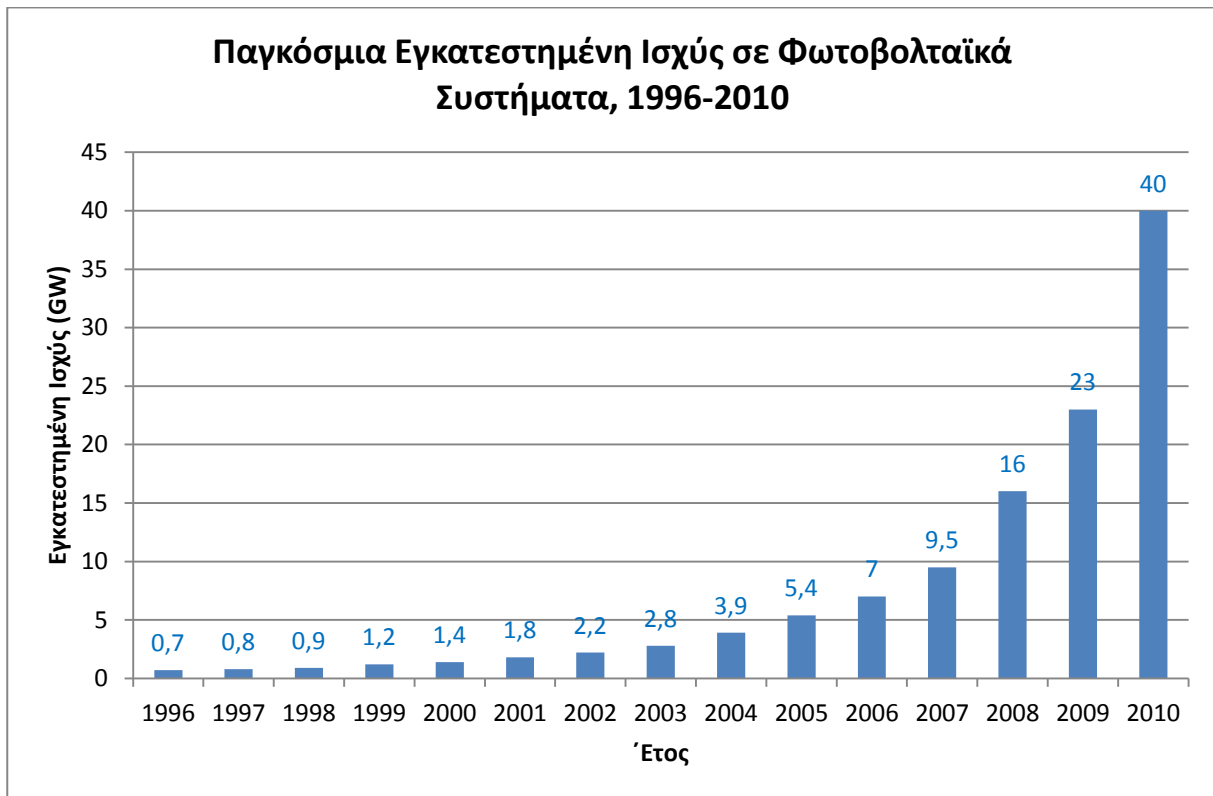
Σχήμα 1.3.3: Μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ, ανά κατηγορία, και βιοκαυσίμων (Πηγή: Renewables Global Status Report 2011).

Ενθαρρυντικό είναι, επίσης, το γεγονός ότι, παρά την ύφεση, οι επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σημείωσαν νέο ρεκόρ το 2010. Συγκεκριμένα το ύψος των συνολικών επενδύσεων στην παραγωγή ενέργειας και καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ανήλθε στα \$211 δισ. (πλην των μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων), παρουσιάζοντας αύξηση κατά 32% από τα \$160 δισ. του προηγούμενου έτους.

Σε ό,τι αφορά στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή, όσο και στις εφαρμογές θέρμανσης, το 2010 κατεγράφησαν θετικές εξελίξεις:

Για τη βιομηχανία κατασκευής *φωτοβολταϊκών συστημάτων*, το 2010 υπήρξε εξαιρετική χρονιά, με την παραγωγή τους να υπερδιπλασιάζεται. Περίπου 17GW νέας εγκατεστημένης ισχύος προστέθηκαν παγκοσμίως (σε σχέση με μόλις 7,3GW το 2009), ανεβάζοντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 40GW, περίπου επτά φορές μεγαλύτερη από τα επίπεδα του 2006^[9]. Η Ευρωπαϊκή ένωση κυριάρχησε στην παγκόσμια αγορά, με το 80% των νέων εγκαταστάσεων να πραγματοποιείται στις χώρες-μέλη της. Πρωτοπόρες χώρες υπήρξαν η Ιταλία και, κυρίως, η Γερμανία, η οποία εγκατέστησε περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα απ' ό,τι ολόκληρος ο υπόλοιπος κόσμος κατά το προηγούμενο έτος. Στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκαν εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος περίπου 200MW, τέσσερις φορές μεγαλύτερες από το 2009. Η τάση προς εγκατάσταση μεγάλων μονάδων (φωτοβολταϊκών πάρκων) συνεχίστηκε, με το συνολικό αριθμό τέτοιων μονάδων να ξεπερνά τις 5000 και να αντιστοιχεί στο 25% περίπου της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών κυψελών εξακολούθησε να μετατοπίζεται

προς την Κίνα, με 10 από τις κορυφαίες 15 εταιρείες του κλάδου εγκατεστημένες πλέον στη συγκεκριμένη περιοχή. Γενικά, ο κλάδος ανταποκρίθηκε στην πτώση του κόστους και τις ραγδαία μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς, με συγχωνεύσεις και αύξηση της κλίμακας παραγωγής. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η μεταβολή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε φωτοβολταϊκές μονάδες κατά την τελευταία 15ετία, και διακρίνεται καθαρά η ραγδαία αυξητική τάση που γνωρίζει η συγκεκριμένη τεχνολογία τα τελευταία 5 χρόνια.



Ο τομέας της *συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP)* επανήλθε, μετά από χρόνια αδράνειας, με εγκατάσταση περίπου 740MW μεταξύ του 2007 και του 2010^[8]. Εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος περίπου 478MW πραγματοποιήθηκαν μέσα στο 2010, και η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται πλέον στα 1,095GW. με τις μονάδες παραβολικής σκάφης να κυριαρχούν στην αγορά. Η Ισπανία πήρε την πρωτοκαθεδρία, με 632MW συνολικής ισχύος, μετά από την εγκατάσταση μονάδων επιπλέον ισχύος 400MW μέσα στο 2010. Οι ΗΠΑ είναι η δεύτερη χώρα στην κατάταξη με μονάδες συνολικής ισχύος 509MW, ενώ η νέα εγκατεστημένη ισχύς για το 2010 έφθασε τα 78MW. Το 2011 αναμένεται να συνεχιστεί η ανοδική πορεία της συγκεκριμένης τεχνολογίας, καθώς μονάδες συνολικής ισχύος 946MW και 1,5GW βρίσκονταν υπό κατασκευή σε Ισπανία και ΗΠΑ αντιστοίχως. Επιπλέον, στις ΗΠΑ έχουν υπογραφεί συμβάσεις για την κατασκευή μονάδων ισχύος τουλάχιστον 6,2GW. Ωστόσο, η συρρίκνωση του κόστους των φωτοβολταϊκών μονάδων οξύνει τον ανταγωνισμό μεταξύ των δύο αυτών τεχνολογιών, ενώ στις ΗΠΑ αρκετές προγραμματισμένες προς εγκατάσταση μονάδες επανασχεδιάστηκαν, ώστε να αξιοποιήσουν την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Ταυτόχρονα, το ενδιαφέρον για τέτοιες μονάδες επεκτάθηκε, πέρα από τις ΗΠΑ και την Ισπανία, και σε άλλες χώρες, ειδικά στην περιοχή της Μέσης Ανατολής, της Ανατολικής Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής, ενώ εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος περίπου

2,6GW ήταν υπό κατασκευή μέχρι το τέλος του 2010, με το σύνολο αυτών να τίθεται σε λειτουργία έως το 2014.

Σε ότι αφορά στις εγκαταστάσεις θέρμανσης, το 2010 εγκαταστάθηκαν περίπου 25GW_{th} νέας ισχύος, ανεβάζοντας τη συνολική ισχύ τέτοιων συστημάτων στα 185GW_{th}^[9]. Η Κίνα διατήρησε το προβάδισμα στην αγορά των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού, με την εγκατάσταση συλλεκτών συνολικής ισχύος 17,5GW_{th}, ενώ η ευρωπαϊκή αγορά συρρικνώθηκε εξαιτίας της οικονομικής ύφεσης. Σε αντίθεση όμως με την Κίνα, στην αγορά της οποίας κυριαρχούν οι ηλιακοί θερμοσίφωνες, στην Ευρώπη υπάρχει μία τάση μετατόπισης προς ηλιακά συστήματα που συνδυάζουν την παροχή ζεστού νερού με την οικιακή θέρμανση. Η Ελλάδα καταλαμβάνει την 3η θέση στην Ευρωπαϊκή Ένωση, μετά τη Γερμανία και την Αυστρία, με εγκατεστημένους συλλέκτες συνολικής ισχύος 2,9GW_{th}. Η Ελλάδα, επίσης, καταλαμβάνει την 4η θέση παγκοσμίως στην ανά κεφαλή εγκατεστημένη ισχύ ηλιακών συλλεκτών, με 266KW_{th} ανά 1000 κατοίκους. Την 1η θέση σε αυτή την κατάταξη καταλαμβάνει η Κύπρος, και ακολουθούν το Ισραήλ, η Αυστρία, η Ελλάδα, και η Γερμανία. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια σειρά εγκαταστάσεων ηλιακών συστημάτων παροχής θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες, κυρίως στις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Κίνα.

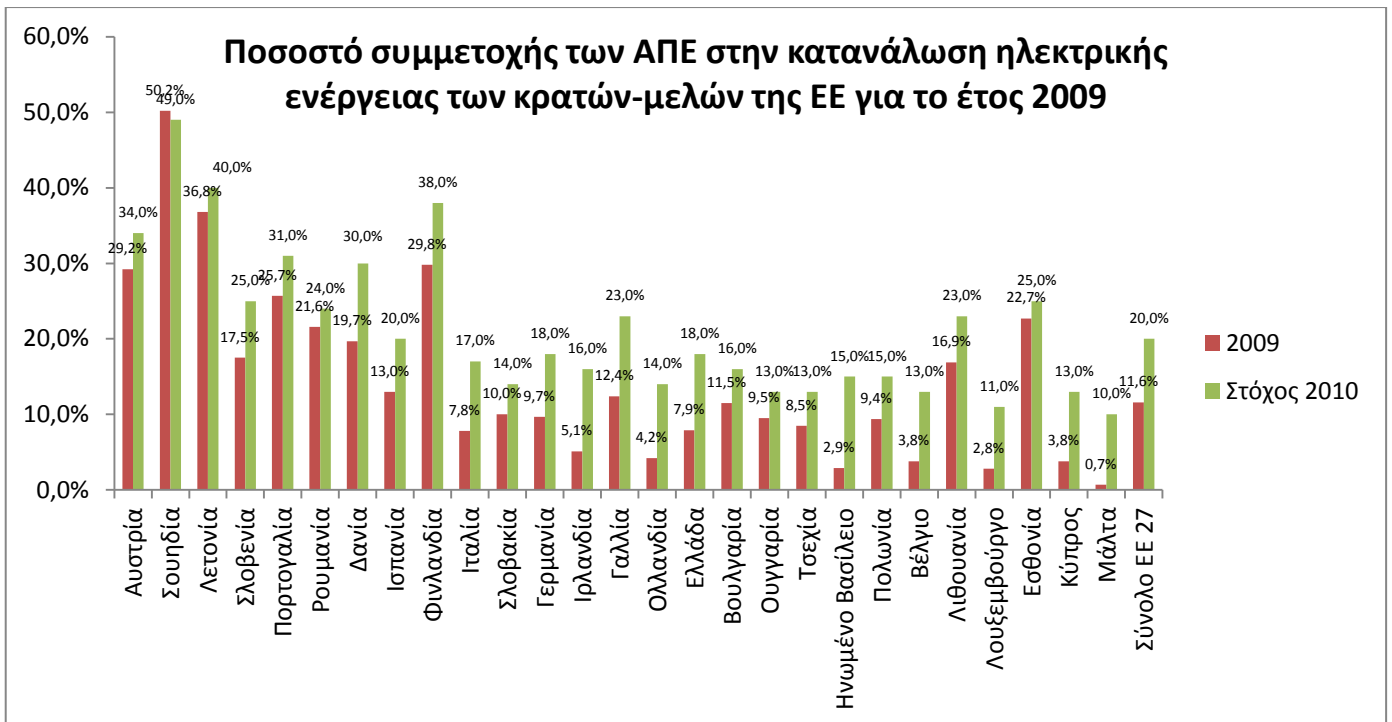
1.4. ΣΤΟΧΟΙ, ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.4.1. Στόχοι για τη διάδοση των ΑΠΕ και της Ηλιακής Ενέργειας

Είναι προφανές ότι σε αυτό το ενεργοβόρο οικονομικό περιβάλλον η χρήση της ηλιακής ενέργειας και εν γένει των ανανεώσιμων και περιβαλλοντικά φιλικών πηγών ενέργειας πρέπει να αποτελεί στρατηγική επιλογή, και η ολοένα μεγαλύτερη ενσωμάτωσή τους στην παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή μακροπρόθεσμο στόχο.

Στο πλαίσιο αυτό 96 συνολικά χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, έχουν θέσει ποσοτικούς στόχους σε ότι αφορά την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό τους ισοζύγιο^[9]. Οι στόχοι αυτοί είναι δεσμευτικοί σε ό,τι αφορά τη συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή (σε ποσοστό που τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30%), τη συνολική διείσδυσή τους στην πρωτογενή ή τελική καταναλισκόμενη ενέργεια, την παροχή θερμότητας, την εγκατεστημένη ισχύ συγκεκριμένων τεχνολογιών, και το μερίδιο των βιοκαυσίμων στη συνολική κατανάλωση καυσίμων στις μεταφορές.

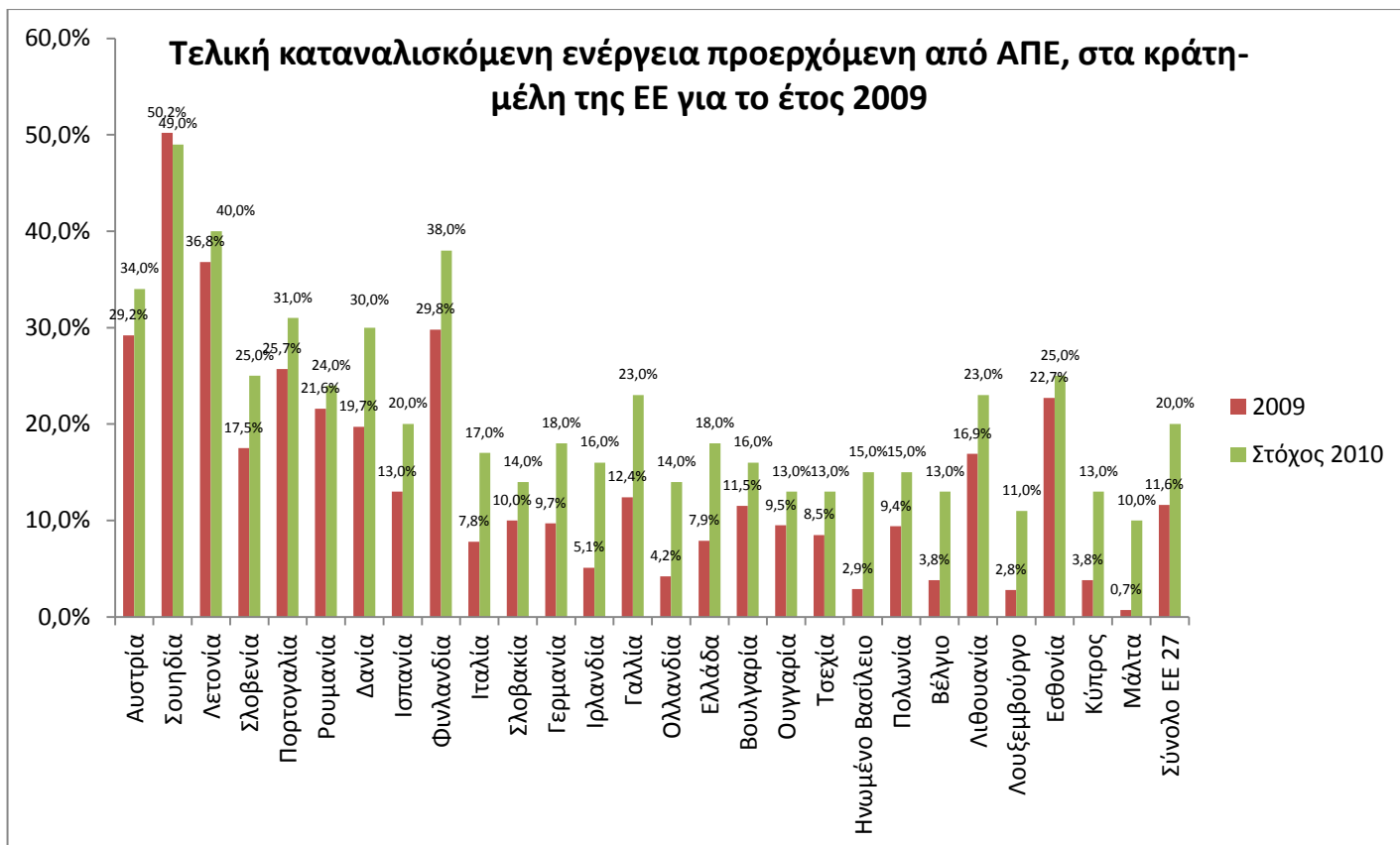
Στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο αρχικός στόχος σε ότι αφορά τις ΑΠΕ διαμορφώθηκε με τη σύνταξη της Λευκής Βίβλου το 1997, η οποία έθετε ως στόχο την συμμετοχή τους κατά 12% στην τελική κατανάλωση ενέργειας, έως το 2010. Ο στόχος αυτός αναθεωρήθηκε με την ντιρεκτίβα 2001/77 της ΕΕ, σύμφωνα με την οποία το 21% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των 27 κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ. Η συνολική εικόνα σε ότι αφορά στην επίτευξη του παραπάνω στόχου, αλλά και η πρόοδος των επιμέρους κρατών-μελών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.4.1: Συμμετοχή των ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του έτους 2009 και αντίστοιχος στόχος έως το 2010, σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2001/77. (Πηγή: The State of Renewable Energies in Europe, 10th EurObserv'ER Report, 2010)

Από τα στοιχεία του γραφήματος γίνεται φανερό ότι μόλις 6 χώρες έφθασαν ή ξεπέρασαν τον στόχο που είχε τεθεί, και συγκεκριμένα οι Λετονία, Σλοβενία, Γερμανία, Ιρλανδία, Ολλανδία και Ουγγαρία, ενώ συνολικά η συμμετοχή των ΑΠΕ στα κράτη-μέλη της ΕΕ υπολείπεται κατά 2,8% του στόχου. Ο αντίστοιχος στόχος για την Ελλάδα τέθηκε στο 20,1%, και κρίνεται μάλλον φιλόδοξος, με τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια να περιορίζεται τελικά στο 9,2% στα τέλη του 2009.

Τον αντίστοιχο στόχο για την επόμενη δεκαετία (έως το 2020) ορίζει νέα κοινοτική οδηγία, η 2009/28, σύμφωνα με την οποία 20% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στις χώρες-μέλη της ΕΕ πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ. Αυτή τη φορά, η οδηγία είναι δεσμευτική, ενώ συμπεριλαμβάνει και διάταξη σύμφωνα με την οποία το 10% των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές θα πρέπει να προέρχεται από βιοκαύσιμα έως το 2020. Η συνολική εικόνα σε ότι αφορά στην επίτευξη του παραπάνω στόχου, αλλά και η πρόοδος των επιμέρους κρατών-μελών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.4.2: Συμμετοχή των ΑΠΕ στην συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια του έτους 2009 και αντίστοιχος στόχος έως το 2010, σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2009/28. (Πηγή: The State of Renewable Energies in Europe, 10th EurObserv'ER Report, 2010)

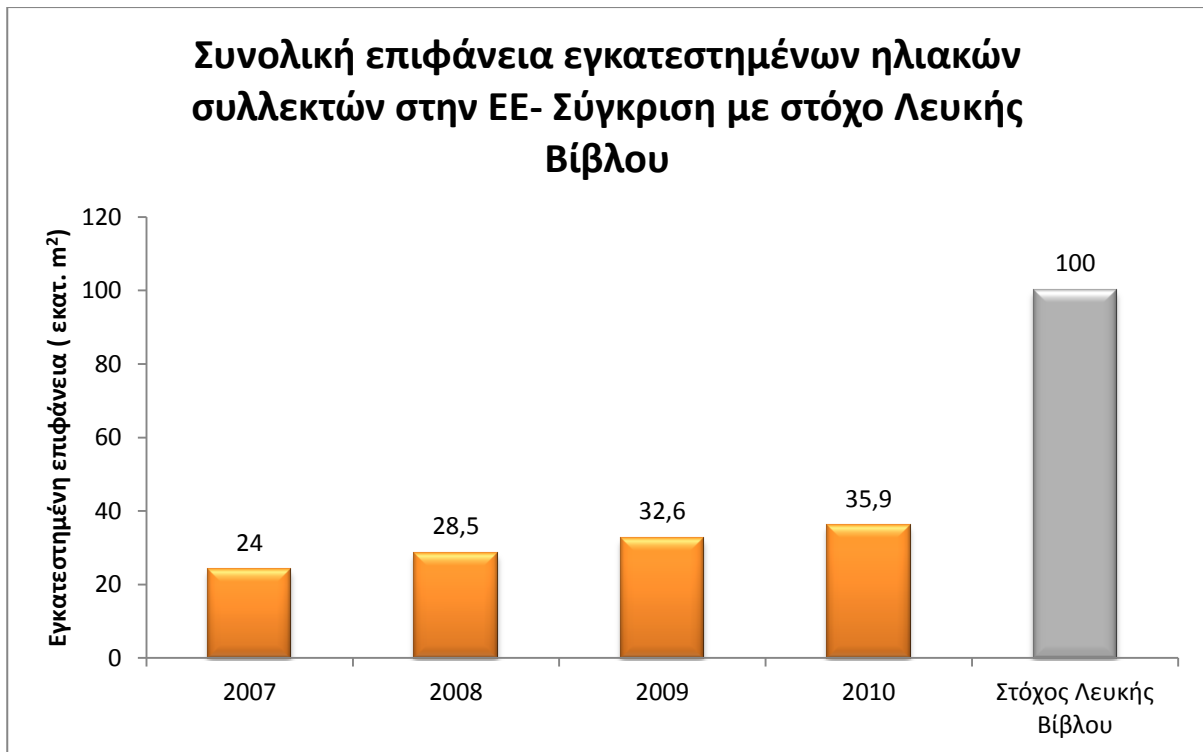
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι ορισμένες χώρες έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο σε ότι αφορά την επίτευξη του στόχου, ενώ άλλες υπολείπονται σημαντικά. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Σουηδίας, η οποία φαίνεται να έχει πετύχει το στόχο που έχει θέσει για το 2020 μία δεκαετία νωρίτερα. Θα πρέπει ωστόσο να τονιστεί, ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ υποχώρησε κατά 5,8% περίπου το 2009, ως αποτέλεσμα της οικονομικής ύφεσης και της μειωμένης οικονομικής δραστηριότητας^[10]. Ως εκ τούτου, το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην καταναλωθείσα ενέργεια αυξήθηκε κατά 0,7%. Η συμμετοχή των ΑΠΕ συνολικά στην ΕΕ βρίσκεται αυτή τη στιγμή στο ήμισυ περίπου του στόχου, και θα πρέπει να καταβληθούν ιδιαίτερα εντατικές προσπάθειες από χώρες που υπολείπονται σημαντικά (συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας) προκειμένου να επιτευχθεί.

Εκτός από τη συνολική συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με τη Λευκή Βίβλο, έχουν τεθεί επιμέρους στόχοι για τη διεισδυση των διαφόρων τεχνολογιών αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, είτε προς ηλεκτροπαραγωγή είτε προς θέρμανση. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η εικόνα που επικρατεί όσον αφορά στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών και την επίτευξη των αντίστοιχων στόχων.



Σχήμα 1.4.3: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φωτοβολταϊκών συστημάτων στα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και σύγκριση με το στόχο της Λευκής Βίβλου. (Πηγή: The State of Renewable Energies in Europe, 10th EurObserv'ER Report, 2010)

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν γνωρίσει ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, και έχουν προ καιρού υπερκαλύψει το στόχο που είχε τεθεί με τη Λευκή Βίβλο το 1997. Αιτία της άνθησης αυτής αποτελεί αφενός η δραματική μείωση του κόστους εγκατάστασης (υπολογίζεται σε 25% μέσα στο 2009^[9]), καθώς και τα διάφορα οικονομικά κίνητρα που δόθηκαν και εξακολουθούν να δίνονται σε πολλές χώρες για τη διάδοση και εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων. Πρωτοπόρες χώρες στη συνολική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων, στην ΕΕ των 27, είναι η Γερμανία, η Ισπανία, η Ιταλία, η Τσεχία και το Βέλγιο, ενώ η Ελλάδα καταλαμβάνει την 9η θέση σε αυτή την κατάταξη.



Σχήμα 1.4.4: Συνολική επιφάνεια εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών στα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και σύγκριση με το στόχο της Λευκής Βίβλου. (Πηγή: The State of Renewable Energies in Europe, 10th EurObserv'ER Report, 2010)

Κατά το 2009 παρατηρήθηκε ελάττωση του ρυθμού αύξησης της εγκατεστημένης επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών στην ΕΕ. Αυτό οφείλεται αφ'ενός στην πρόσφατη οικονομική και χρηματοπιστωτική κρίση, αφ'ετέρου στον ανταγωνισμό από άλλες τεχνολογίες (όπως τα φωτοβολταϊκά) των οποίων το κόστος μειώθηκε, και τέλος στην περικοπή των οικονομικών επιδοτήσεων και κινήτρων που δίνονταν για την εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης, όπως π.χ. στη Γερμανία και στη μείωση της οικοδομικής δραστηριότητας σε χώρες όπως η Ισπανία και η Ελλάδα. Στις κυριότερες αγορές αυτών των συστημάτων (Γερμανία, Ελλάδα, Ισπανία και Ιταλία) παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού ανάπτυξης, ενώ αντίθετα παρατηρήθηκε αύξηση σε άλλες χώρες, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Πολωνία και η Πορτογαλία. Πρωτοπόρες χώρες στη συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών, στην ΕΕ των 27, είναι η Γερμανία, η Αυστρία, η Ελλάδα, η Ιταλία, και η Γαλλία.

Τέλος, όσον αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, 6 χώρες-μέλη της ΕΕ έχουν θέσει ανάλογους στόχους, έως το 2020, στα εθνικά τους σχέδια δράσης για τις ΑΠΕ. Αναλυτικά, είναι οι: Ισπανία (5079MW), Ιταλία (600MW), Γαλλία (540MW), Πορτογαλία (500MW), Ελλάδα (250MW) και Κύπρος (75MW).

1.4.2. Πολιτικές και Κίνητρα για τη διάδοση των ΑΠΕ και της Ηλιακής Ενέργειας

Το 2010 η έλλειψη μακροχρόνιων σχεδιασμών σε πολλά μέρη του κόσμου, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην αγορά των ΑΠΕ. Ανταποκρινόμενες στη διαρκή μείωση του κόστους πολλών τεχνολογιών ΑΠΕ (και ιδιαίτερα των φωτοβολταϊκών), αλλά και στην παγκόσμια οικονομική κρίση που ξέσπασε το 2008, πολλές κυβερνήσεις προέβησαν σε περικοπές της έκπτωσης φόρου ή των

οικονομικών κινήτρων που παρείχαν για την χρήση ΑΠΕ, ενώ άλλες εξετάζουν ριζικές αλλαγές στην πολιτική τους σε αυτόν τον τομέα. Ως αποτέλεσμα, πολλοί εθνικοί μηχανισμοί και πολιτικές στήριξης των ΑΠΕ αντιμετώπισαν περικοπές στη χρηματοδότησή τους σε χώρες όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Ισπανία, η Ιταλία, η Τσεχία και το Ηνωμένο Βασίλειο.

Παρόλα αυτά, οι υποστηρικτικές πολιτικές εξακολουθούν να επηρεάζουν το ρυθμό ανάπτυξης και τη διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, τη θέρμανση και τις μεταφορές. Η βιομηχανία των ΑΠΕ, σε σύμπραξη με άλλους φορείς εξακολουθεί να ασκεί πίεση για την εγκαθίδρυση σταθερών, μακροχρόνιων πολιτικών και αποτελεσματικών μέτρων για τη διάδοσή τους.

Μία πλήρης ανάλυση και καταγραφή των υποστηρικτικών πολιτικών που εφαρμόζονται για την διάδοση των ΑΠΕ και της ηλιακής ενέργειας μπορεί να βρεθεί στην έκθεση της REN21 για το 2011^[8]. Εδώ, θα περιοριστούμε να αναφέρουμε τους κυριότερους μηχανισμούς με τους οποίους υλοποιούνται οι πολιτικές αυτές:

- Επιδότηση ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ (Feed-in Tariff, FIT): Πρόκειται για πολιτική προώθησης των ΑΠΕ, βάσει της οποίας επιχορηγείται με μία συγκεκριμένη τιμή κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στο δίκτυο από κάποιον ανεξάρτητο παραγωγό. Συνήθως πρόκειται για συμβόλαια μακράς διάρκειας (περίπου μία εικοσαετία). Εναλλακτικά, αντί μίας καθορισμένης τιμής, η μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αγοράζεται από τον διαχειριστή του δικτύου στην τιμή αγοράς συν κάποιο πριμ (Premium FIT).
- Ποσόστωση: Πρόκειται για δέσμευση (επιβαλλόμενη και όχι εθελοντική) που επιβάλλεται από τις κυβερνήσεις στους παρόχους ή τους καταναλωτές να παρέχουν ή να χρησιμοποιούν ένα προκαθορισμένο ποσοστό ΑΠΕ είτε ως ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, είτε ως ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέτρηση εισροών-εκροών: Πρόκειται για μέτρο, σύμφωνα με το οποίο μετράται η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (διαφορά παραχθείσας από καταναλωθείσα), η οποία και επιχορηγείται με μία συγκεκριμένη τιμή. Απευθύνεται σε ανεξάρτητους μικρούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, και κυρίως σε οικιακούς χρήστες.

Εκτός των παραπάνω ρυθμιστικών πολιτικών, σε πολλές χώρες δίνονται οικονομικά κίνητρα για την προώθηση των ΑΠΕ, όπως κρατικά δάνεια, εγγυήσεις και εκπτώσεις από το φόρο εισοδήματος.

Στην Ελλάδα, και σε ότι αφορά τη διείσδυση της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, δίνονται κίνητρα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και ηλιακών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Συγκεκριμένα:

Με τον νόμο 3468/2006 δίνεται έμφαση στην απλοποίηση των διαδικασιών αδειοδότησης των επενδύσεων σε ΑΠΕ και ορίζονται οι τιμές πώλησης της παραγόμενης από αυτές ενέργειας στο δίκτυο. Οι τιμές αυτές τροποποιούνται ανά έτος, ώστε να ανταποκρίνονται στον πληθωρισμό και στις αυξήσεις των τιμολογίων ηλεκτρικής ενέργειας.

Επενδύσεις σε ΑΠΕ υποστηρίζονται οικονομικά, μέσω του Εθνικού Αναπτυξιακού Νόμου 3522/2006, είτε μέσω φορολογικών εξαιρέσεων, είτε μέσω απευθείας επιχορηγήσεων, οι οποίες κυμαίνονται από το 34% έως το 55% του προϋπολογισμού του έργου, μέχρι τα 20 εκατομμύρια ευρώ. Βάσει του ίδιου νόμου, οι εμπορικές εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορούν να επιδοτηθούν με το 20-40% του κόστους εγκατάστασης, ανάλογα με την περιοχή στην οποία θα εγκατασταθούν^[11]. Επιπλέον, προβλέπεται έκπτωση φόρου κατά 20% της δαπάνης, για μικρές

οικιακές εγκαταστάσεις αυτού του είδους (έως το ποσό των €700). Ανάλογες επιχορηγήσεις δίνονται και για την κάλυψη του κόστους εγκατάστασης ηλιακών συστημάτων θέρμανσης^[12] (κατά 40% για απόδοση συλλέκτη μεγαλύτερη από 45%, και κατά 50% για απόδοση ηλιακού συλλέκτη μεγαλύτερη από 60%).

1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy#cite_ref-Smil_1991_0-0
- [2] "Statistical Review of World Energy 2009", BP. July 31, 2006. Retrieved 2009-10-24.
- [3] "Renewables, Global Status Report 2006", Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2006. Retrieved 2007-04-03.
- [4] "Solar Technologies", Frank von Hippel and Robert H. Williams, found in "Toward a Solar Civilization", Robert H. Williams, The MIT Press, 1978.
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>
- [6] R. Nasiri, Ahmad Radan. "Adaptive pole-placement control of 4-leg voltage-source inverters for standalone photovoltaic systems". Renewable Energy 36 (2011) 2032-2042.
- [7] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana Lazaro, Pablo Dolado, Belen Zalba, Luisa F. Cabeza. "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation". Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010).
- [8] "Statistical Review of World Energy", BP. June, 2011.
- [9] "Renewables, Global Status Report 2011", REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2011.
- [10] "The State of Renewable Energies in Europe", 10th EurObserv'ER Report, 2010.
- [11] EurObserv'ER, *Photovoltaic Energy Policy in Greece*, http://observer.cartajouronline.com/barosig/Fichiers/BAROSIG/Valeurs_indicateurs/PV_Greece-ang.htm
- [12] EurObserv'ER, *Solar thermal heating and cooling policy in Greece*, http://observer.cartajouronline.com/barosig/Fichiers/BAROSIG/Valeurs_indicateurs/ST_Greece-ang.htm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ

Η Γη εκτελεί μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο σε περίπου 365,25 ημέρες, περιγράφοντας μία ελλειπτική τροχιά με τον Ήλιο τοποθετημένο στη μία από τις δύο εστίες της. Συνέπεια της ελλειπτικής τροχιάς της Γης είναι ότι η απόστασή της από τον Ήλιο δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται μεταξύ $146,1 \times 10^6$ km (όταν η Γη βρίσκεται στο *περιήλιο*, περίπου στις 2 Ιανουαρίου κάθε χρόνου) και $152,1 \times 10^6$ km (όταν η Γη βρίσκεται στο *αφήλιο*, περίπου στις 3 Ιουλίου). Η μέση τιμή της απόστασης Ηλίου-Γης είναι $149,6 \times 10^6$ km.

Ταυτόχρονα με την περιστροφή της γύρω από τον Ήλιο, η Γη εκτελεί επίσης μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της (νοητή ευθεία που συνδέει το Βόρειο με το Νότιο πόλο) κάθε 24 ώρες. Ο άξονας περιστροφής της Γης είναι στραμμένος κατά $23,45^\circ$ ως προς το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, ενώ είναι στραμμένος έτσι ώστε να δείχνει πάντα προς τον Πολικό Αστέρρα, και σε αυτό οφείλεται η αλλαγή των εποχών και η μεταβολή στη διάρκεια της μέρας κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Γωνία απόκλισης (δ) είναι η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του ισημερινού της Γης με τη διάκεντρο (ευθεία που ενώνει τα κέντρα) Ηλίου-Γης. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο άξονας της Γης είναι σταθερά προσανατολισμένος ως προς ένα εξωτερικό σύστημα αναφοράς (το βόρειο άκρο του δείχνει πάντα προς τον Πολικό Αστέρρα), η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ είναι κοινή για όλα τα σημεία της επιφάνειας της Γης την εκάστοτε ημέρα. Η γωνία απόκλισης, σε μοίρες, δίνεται από τη σχέση:

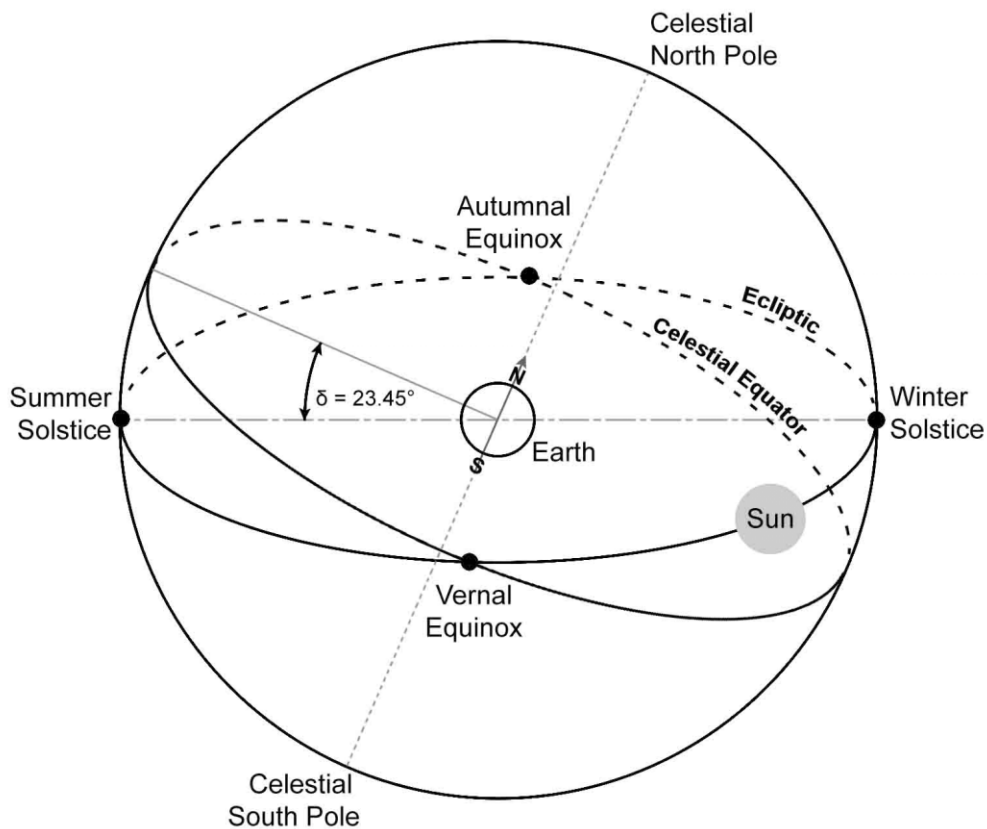
$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right), \quad -23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ \quad (2.1.1)$$

όπου:

n : Η ημέρα του χρόνου ($n=1$ για την 1η Ιανουαρίου)

Η γωνία απόκλισης λαμβάνει τις μέγιστες απόλυτες τιμές της κατά το θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο, ενώ μηδενίζεται κατά την εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία.

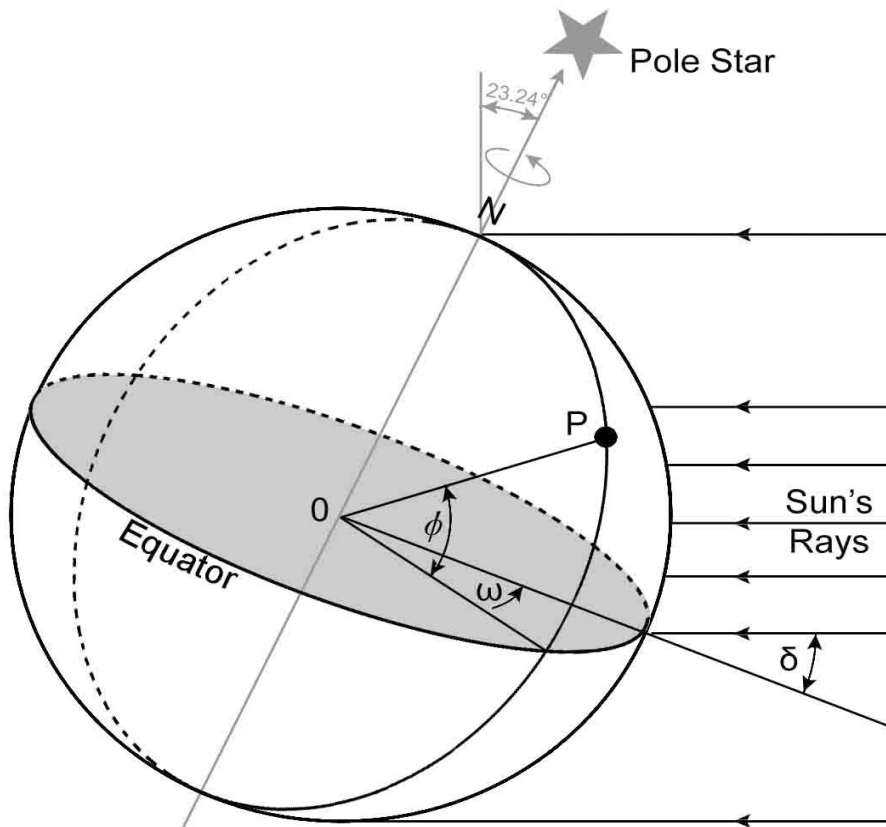
Μια εναλλακτική θεώρηση της κίνησης της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι να θεωρηθεί η Γη ως στατική, και να εξεταστεί η φαινομενική κίνηση του Ήλιου ως προς ένα παρατηρητή στην επιφάνειά της. Βάσει αυτής της θεώρησης, προκύπτει η *ουράνια σφαίρα*, με την προβολή του ισημερινού της Γης και των πόλων της ως *ουράνιου ισημερινού* και *ουράνιων πόλων* αντίστοιχα. Η φαινομενική τροχιά που ακολουθεί ο Ήλιος, κατά την περιστροφή του στην ουράνια σφαίρα ονομάζεται *εκλειπτική*, ενώ στο μοντέλο αυτό ως γωνία απόκλισης δ ορίζεται η γωνία που σχηματίζουν οι ευθείες που ενώνουν το κέντρο της Γης με την εκλειπτική και τον ουράνιο ισημερινό αντίστοιχα. Τα παραπάνω απεικονίζονται παραστατικά στο ακόλουθο σχήμα^[1]:



Σχήμα 2.1.1: Ουράνια σφαίρα και γωνία απόκλισης δ (Πηγή: “*The Sun as a source of energy, Part 1: Solar Astronomy*”. www.itacanet.org)

Με τον τρόπο αυτό ορίζονται κάποιες επιπλέον γωνίες που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της ηλιακής ενέργειας.

Ηλιακή ωριαία γωνία (ω) για οποιοδήποτε σημείο P της επιφάνειας της Γης, είναι η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περιέχει το σημείο P και του μεσημβρινού που είναι παράλληλος με τις ηλιακές ακτίνες. Βάσει της ωριαίας γωνίας ορίζεται για κάθε σημείο της Γης ένα ωρολογιακό σύστημα που ονομάζεται Τοπική Φαινόμενη Ώρα (Local Apparent Time - LAT). Σε αυτό το σύστημα, το ηλιακό μεσημέρι είναι η στιγμή κατά την οποία ο μεσημβρινός του σημείου είναι παράλληλος στις ηλιακές ακτίνες (όταν ο Ήλιος διασχίζει το σημείο τομής της προβολής του μεσημβρινού με την εκλειπτική), και σε αυτή τη στιγμή η ηλιακή ωριαία γωνία λαμβάνει την τιμή μηδέν. Να σημειωθεί ότι η ωριαία γωνία κάθε στιγμή είναι κοινή για όλα τα σημεία του εκάστοτε μεσημβρινού (δηλαδή σημεία με κοινό γεωγραφικό μήκος). Εφόσον η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της διαρκεί 24 ώρες, έπεται ότι η ωριαία γωνία μεταβάλλεται κατά $(360^\circ/24)=15^\circ$ κάθε μία ώρα. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα^[1]:



Σχήμα 2.1.2: Ηλιακή ωριαία γωνία για σημείο P στην επιφάνεια της Γης (Πηγή: “The Sun as a source of energy, Part 1: Solar Astronomy”. www.itacanet.org)

Αντίστοιχα, ορίζεται η ηλιακή γωνία δύσης (ω_s) ως ο αριθμός των ωρών (εκπεφρασμένος σε μοίρες, μέσω της σχέσης $\omega = \text{Ώρες} \times 15^\circ/\text{ώρα}$) που μεσολαβεί μεταξύ ηλιακού μεσημεριού και δύσης του ηλίου, και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \cos \omega_s &= -\tan \delta \cdot \tan \phi \Rightarrow \\ \omega_s &= \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \phi) \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

όπου:

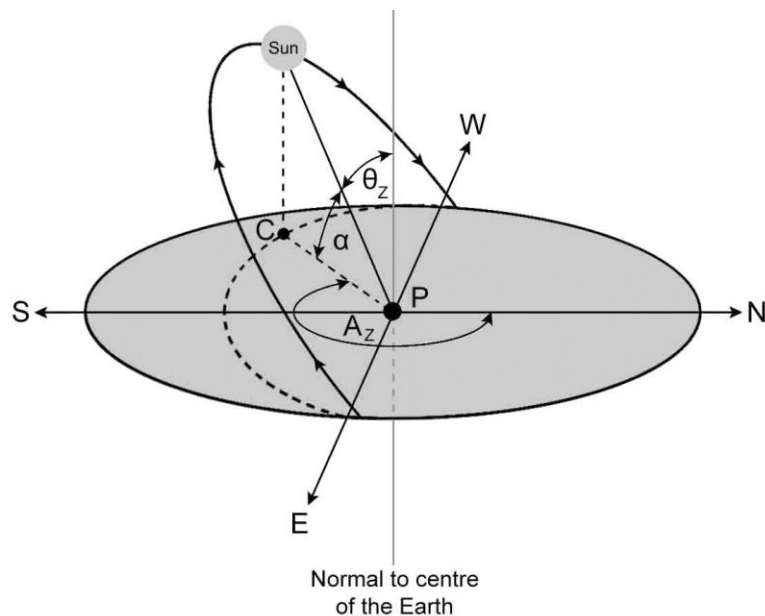
- δ : Η γωνία απόκλισης την εκάστοτε ημέρα
- ϕ : Το γεωγραφικό πλάτος του σημείου P (θετικό στο βόρειο ημισφαίριο, αρνητικό στο νότιο ημισφαίριο).

Να σημειωθεί ότι η ανατολή και η δύση του Ηλίου θεωρούνται συμμετρικές ως προς το ηλιακό μεσημέρι, επομένως αρκεί η γνώση μόνο της γωνίας δύσης για τον υπολογισμό της *συνολικής διάρκειας της ημέρας* (από την ανατολή ως τη δύση του Ηλίου) σε ώρες, από τη σχέση^[3]:

$$N = \frac{2\omega_s}{15} \times \frac{180}{\pi} \quad (2.1.3)$$

Επιπλέον, ορίζονται:

- Η ηλιακή γωνία ζενιθ (θ_z), ως η γωνία μεταξύ της καθέτου της επιφάνειας της Γης στο σημείο P και της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η γωνία ηλιακού ύψους (a), ως η γωνία μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου (ορίζοντα) της Γης στο σημείο P και της κατεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων, η οποία είναι συμπληρωματική της γωνίας ζενιθ ($a + \theta_z = 90^\circ$). Η γωνία αυτή γίνεται μέγιστη κατά το ηλιακό μεσημέρι.
- Η γωνία ηλιακού αζιμούθιου (A_z), ως η γωνία που σχηματίζει η προβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο με τη βόρεια κατεύθυνση. Η θετική φορά της γωνίας αζιμουθίου είναι η ωρολογιακή.



Σχήμα 2.1.3: Γωνίες ηλιακού ζενιθ, ηλιακού ύψους και ηλιακού αζιμούθιου (Πηγή: Αρκούδης Γεώργιος, «Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα», 2007)

Σε κάθε δεδομένη στιγμή, και για κάθε γεωγραφικό πλάτος, όταν είναι γνωστές κάποιες από τις παραπάνω γωνίες, οι υπόλοιπες μπορούν να βρεθούν μέσω των σχέσεων^{[2],[3]}:

$$\cos \theta_z = \sin a = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.1.4)$$

$$\sin A_z = \frac{-\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos a} \quad (2.1.5)$$

$$\sin \omega = -\frac{\cos a \cdot \sin A_z}{\cos \delta} \quad (2.1.6)$$

$$\sin \omega = \frac{\sin a - \sin \delta \cdot \sin \phi}{\cos \delta \cdot \cos \phi} \quad (2.1.7)$$

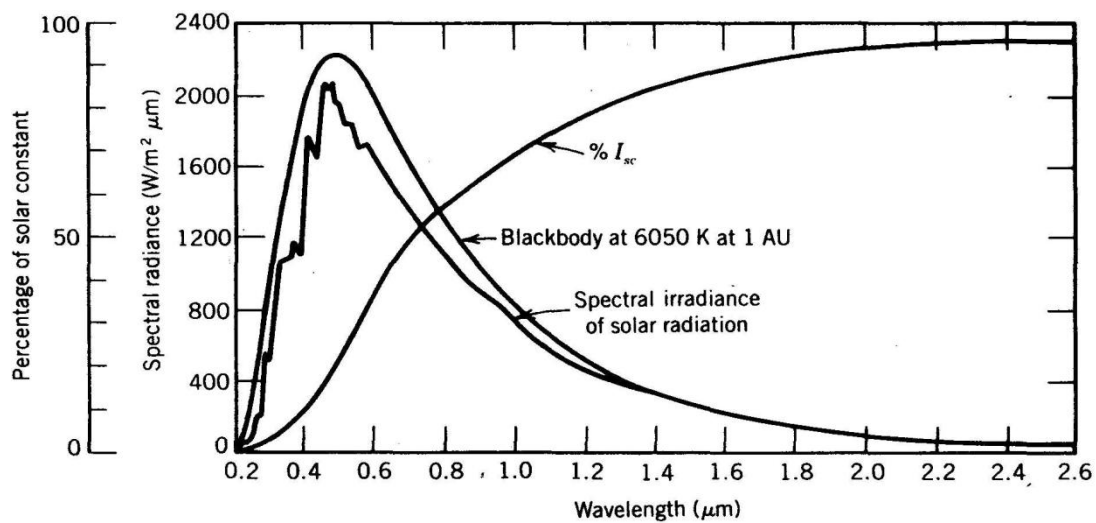
2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.2.1. ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Ο Ήλιος θεωρείται ότι εκπέμπει ενέργεια με σταθερό ρυθμό. Στην επιφάνειά του, ο ρυθμός της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας φθάνει περίπου τα $6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ ^[4]. Καθώς οι ηλιακές ακτίνες διατρέχουν το διάστημα, η ισχύς τους μειώνεται, και όταν πλέον φθάνουν στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας, θεωρούνται παράλληλες (στην πραγματικότητα η φαινόμενη γωνία που σχηματίζουν είναι $9,3 \text{ mrad}$ ή $0,553$ μοίρες).

Η *ηλιακή σταθερά* είναι η μέση ένταση ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία νοητή επιφάνεια, κάθετη στις ηλιακές ακτίνες, στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας. Η τιμή της λαμβάνεται ίση με 1367 W/m^2 . Η τιμή αυτή είναι ο ετήσιος μέσος όρος της τιμής της σταθεράς, καθώς αυτή παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά περίπου 7% κατά τη διάρκεια ενός έτους, λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της Γης, και της μεταβαλλόμενης απόστασής της από τον Ήλιο. Ακόμη όμως και αυτή η τιμή δεν είναι απολύτως ακριβής, καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά περίπου 0,25% λόγω της περιοδικής μεταβολής της ηλιακής δραστηριότητας και των ηλιακών κηλίδων^[4].

Η ηλιακή ακτινοβολία δεν εκπέμπεται με την ίδια ένταση σε όλες τις συχνότητες. Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, στα όρια της ατμόσφαιρας, παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα^[5]:



Σχήμα 2.2.1: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Στο διάγραμμα επίσης αναπαρίσταται η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος στους 6050 K (θερμοκρασία ηλιακής φλόσφαιρας). Στο ίδιο διάγραμμα, η γνησίως αύξουσα καμπύλη είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται, περίπου το 45% της ηλιακής ενέργειας εκπέμπεται σε μήκη κύματος του ορατού φάσματος (μεταξύ $0,3$ και $0,7 \mu\text{m}$), ενώ λιγότερο από το 1% σε μικρότερα μήκη κύματος (υπεριώδες και ακτίνες Χ). Το υπόλοιπο 54% της ενέργειας εκπέμπεται στο υπέρυθρο φάσμα.

Λαμβάνοντας υπόψιν την ελλειπτική τροχιά, και τη μεταβολή της απόστασης της Γης από τον Ήλιο, η τιμή της ηλιακής σταθεράς τροποποιείται μέσω της παρακάτω σχέσης, για να δώσει την ισχύ

της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες, στα όρια της ατμόσφαιρας, κάθε ημέρα του χρόνου:

$$\beta = \beta_0 \left[1 + 0,033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365} \right) \right] \quad (2.2.1.1)$$

όπου:

- β_0 : Η ηλιακή σταθερά ($\beta_0 = 1367 \text{ W/m}^2$)
 n : Η ημέρα του χρόνου ($n=1$ για την 1η Ιανουαρίου)

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι, φυσικά, πάντοτε κάθετη στην επιφάνεια της Γης. Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιφάνεια παράλληλη με τον ορίζοντα στο σημείο ενδιαφέροντος, και στα όρια της ατμόσφαιρας, η παραπάνω σχέση πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ, η οποία, όπως επιώθηκε, είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου της επιφάνειας της Γης και της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, για οποιαδήποτε οριζόντια επιφάνεια έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\beta = \beta_0 \left[1 + 0,033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365} \right) \right] \cdot \cos \theta_z \Rightarrow$$

$$\beta = \beta_0 \left[1 + 0,033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365} \right) \right] \cdot (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (2.2.1.2)$$

όπου:

- θ_z : Η ηλιακή γωνία ζενίθ
 δ : Η γωνία απόκλισης
 ϕ : Το γεωγραφικό πλάτος του σημείου ενδιαφέροντος
 ω : Η ηλιακή ωριαία γωνία

Η σχέση (2.2.1.2) περιγράφει το *φαινόμενο συνημιτόνου*, την ελάττωση δηλαδή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιφάνεια μη κάθετη στις ηλιακές ακτίνες λόγω της ελάττωσης της προβαλλόμενης επιφάνειας σε επίπεδο κάθετο σε αυτές, κατά ποσοστό ίσο με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της καθέτου της επιφάνειας και της διεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων.

Παρακάτω, με G θα συμβολίζονται οι στιγμιαίες τιμές της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (σε W/m^2), με I οι ωριαίες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (σε kWh/m^2), και με H οι ημερήσιες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (σε kWh/m^2). Οι μέσες ημερήσιες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, για κάθε μήνα του έτους, συμβολίζονται με \bar{H} .

Οι εξισώσεις που δόθηκαν παραπάνω είναι χρήσιμες για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια έξω από τα όρια της ατμόσφαιρας. Αυτή ονομάζεται *εξωγήινη ακτινοβολία* (extraterrestrial radiation), και δίνει την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας χωρίς την παρεμβολή της γήινης ατμόσφαιρας.

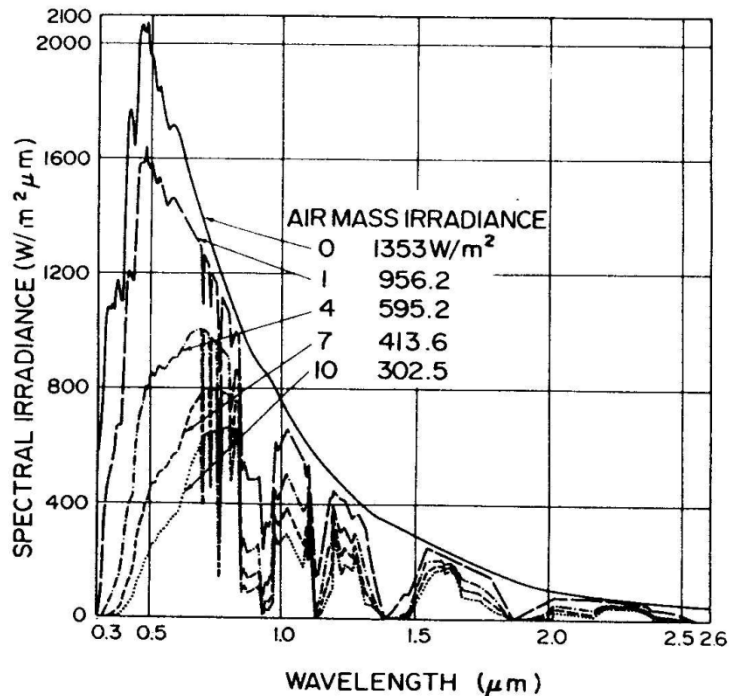
Από τη στιγμή που η ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα, αλληλεπιδρά με τα διάφορα συστατικά της, όπως είναι ο ατμός και τα συμπυκνωμένα σταγονίδια υγρασίας, το όζον, το οξυγόνο, και το διοξείδιο του άνθρακα. Κάποια από αυτά τα συστατικά απορροφούν ενέργεια ακτινοβολίας, και άλλα τη διασκορπίζουν. Σε γενικές γραμμές^[6]:

- Μόρια αερίων, υδρατμοί και αιωρούμενα σωματίδια απορροφούν περίπου το 20% της ενέργειας, με αποτέλεσμα τη θέρμανση της ατμόσφαιρας.
- Τα νέφη ανακλούν και διασκορπίζουν περίπου το 23% της εισερχόμενης ακτινοβολίας πίσω στο Διάστημα.
- Παγκοσμίως, κατά μέσο όρο, μόλις το 57% της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας φθάνει στην επιφάνεια της Γης.
- Μόλις το 27% της εισερχόμενης ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια ως άμεση ακτινοβολία (beam radiation).

Εκτός από την ποσότητα, η γήινη ατμόσφαιρα επιδρά και στη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο βαθμός σκέδασης και διάθλασης στον οποίο υπόκειται η ακτινοβολία δεν εξαρτάται μόνο από τη σύσταση της ατμόσφαιρας, αλλά και από την απόσταση που η ακτινοβολία διανύει μέσα σε αυτήν μέχρι να φθάσει στην επιφάνεια της Γης. Η τελευταία μετριέται σε *μάζες αέρα* (air mass), που είναι απλά ο λόγος της απόστασης που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία σε μία δεδομένη θέση του Ηλίου, προς αυτήν που θα διένυε αν οι ηλιακές ακτίνες ήταν κάθετες στην επιφάνεια (σε αυτή την περίπτωση η μάζα αέρα έχει την τιμή 1). Η τιμή της μάζας αέρα στο επίπεδο της θάλασσας δίνεται από την παρακάτω σχέση^[5]:

$$\text{Μάζα αέρα} = \frac{1}{\cos \theta_z + 0,50572(96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}}$$

όπου η γωνία ζενίθ θ_z εκφράζεται σε μοίρες. Κατά το ηλιοβασιλευμα ($\theta_z = 90^\circ$), η παραπάνω έκφραση δίνει την τιμή 37,92 και για το λόγο αυτό, πολύ μικρό τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της Γης την ώρα εκείνη. Η επίδραση της γήινης ατμόσφαιρας στη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα^[5]:



Σχήμα 2.2.2: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας για διαφορετικές τιμές της μάζας αέρα, σε αίθριες συνθήκες (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986).

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε μία οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια, εντός της γήινης ατμόσφαιρας έχει δύο συνιστώσες: την άμεση (beam) και τη διάχυτη (diffuse) ηλιακή ακτινοβολία^{[6],[7]}.

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή η οποία φθάνει απευθείας από τον ηλιακό δίσκο στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση Ήλιου-Γης, τη γωνία απόκλισης, το ηλιακό ύψος, το γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει, καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση που υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι το ποσό της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά την ανάκλαση ή σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα, αλλά και μετά από ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκάγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκεδάσεως (αερολυμάτων, σταγονιδίων υδρατμού κλπ) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Σημείωση: Ορισμένοι συγγραφείς^{[2],[8]} ορίζουν ανεξάρτητη συνιστώσα για το τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που προέρχεται από ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος ή σε παραπλήσιες επιφάνειες, και την ονομάζουν *ανακλώμενη* (reflected) ακτινοβολία. Επειδή οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται στις μονάδες CSP μπορούν να αξιοποιήσουν μόνο την άμεση ακτινοβολία^[8], στην παρούσα εργασία η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται ως άθροισμα δύο συνιστωσών: της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

2.2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το πυρανόμετρο και το πυρηλιόμετρο^[8]. Το πυρανόμετρο (ακρίβεια: ~1%) μετρά την ακτινοβολία με θερμοηλεκτρική στήλη ή με φωτοβολταϊκό στοιχείο που σκεπάζεται από ημισφαίριο με γυάλινα τοιχώματα. Το πυρηλιόμετρο (ακρίβεια: από 0,2% έως 2%) μετρά την ακτινοβολία επίσης με θερμοηλεκτρική στήλη, που είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος ενός κυλίνδρου, του οποίου ο άξονας διατηρείται παράλληλος με τις ηλιακές ακτίνες με βοήθεια αστροστάτη. Με το όργανο αυτό μπορεί να μετρηθεί και η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας. Ωστόσο το πυρηλιόμετρο είναι σημαντικά ακριβότερο από το πυρανόμετρο. Εκτός από τα δύο αυτά όργανα χρήσιμες πληροφορίες παρέχουν οι ηλιογράφοι, που μετρούν τη διάρκεια της ηλιοφάνειας με ακρίβεια της τάξης των 10 λεπτών της ώρας.

Οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας γίνονται κατά κανόνα σε οριζόντιο επίπεδο. Στην Ελλάδα, τέτοιες μετρήσεις πραγματοποιούνται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), η οποία καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα (hr/day), αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις την ολική ενέργεια ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (KWh/m²) για διάφορες περιοχές της χώρας μας. Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών επιλέγονται έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες και να μην επηρεάζονται από φυσικά εμπόδια ή τοπικά φαινόμενα που να αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Στον Πίνακα Α1^[7] του Παραρτήματος δίνονται μέσες τιμές για την προσπίπτουσα ενέργεια ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Πρόκειται για τιμές συνολικής μηνιαίας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας σε οριζόντιο επίπεδο (KWh/m².mo), οι οποίες υπολογίστηκαν από την επεξεργασία μετρήσεων της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (hr/mo) με χρονική διάρκεια άνω των 30 ετών.

Η συνολική μηνιαία ακτινοβολία είναι το άθροισμα των ημερήσιων ποσοτήτων ενέργειας για κάθε μήνα. Επομένως, για κάθε μήνα, η μέση ολική ημερήσια ακτινοβολία μπορεί να προκύψει από τον παρακάτω τύπο:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_N H \quad (2.2.2.1)$$

όπου:

H : Η ολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, ανά μονάδα επιφάνειας, κάθε ημέρα του εκάστοτε μήνα

N : Ο αριθμός ημερών του εκάστοτε μήνα

\bar{H} : Η μέση ολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, ανά μονάδα επιφάνειας, στον εκάστοτε μήνα

Η ολική ημερήσια ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, εκτός των ορίων της ατμόσφαιρας, βρίσκεται από την ολοκλήρωση της σχέσης (2.2.1.2) για το χρονικό διάστημα μίας ημέρας (από την ανατολή έως τη δύση του Ηλίου), η οποία δίνει^[10]:

$$H_0 = \frac{86400\beta_0}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right) \right] (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta) \quad (2.2.2.2)$$

όπου:

- H_0 : Η ολική ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία
 β_0 : Η ηλιακή σταθερά ($\beta_0=1367\text{W}/\text{m}^2$)
 n : Η ημέρα του χρόνου ($n=1$ για την 1η Ιανουαρίου)
 φ : Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (σε rad)
 δ : Η ηλιακή απόκλιση (σε rad)
 ω_s : Η γωνία δύσης Ηλίου (σε rad)

Η μηνιαία μέση ολική ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία προκύπτει από σχέση ανάλογη της (2.2.2.1), ως εξής:

$$\bar{H}_0 = \frac{1}{N} \sum_N H_0 \quad (2.2.2.3)$$

Από τις σχέσεις (2.2.2.1) και (2.2.2.3), προκύπτει ένα αδιάστατο μέγεθος που ονομάζεται *μηνιαίος μέσος δείκτης αιθριότητας*, και αποτελεί μία ένδειξη της μέσης ηλιοφάνειας και της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας του τόπου^{[9],[10]}. Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0,3 (για πολύ νεφοσκεπείς περιοχές) και 0,8 (για περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια). Ο μηνιαίος μέσος δείκτης αιθριότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2.2.2.4)$$

Υπολογισμός συνιστωσών Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου

Οι σχέσεις που προηγήθηκαν δίνουν τη μηνιαία μέση ολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, ως συνάρτηση της ακτινοβολίας σε αντίστοιχο επίπεδο στα όρια της ατμόσφαιρας και των κλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής, εκπεφρασμένων μέσω του δείκτη αιθριότητας. Όπως προαναφέρθηκε, ωστόσο, στις εφαρμογές συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας, το μέγεθος που μας ενδιαφέρει είναι η άμεση ακτινοβολία, επομένως θα πρέπει να προσδιοριστεί αυτή ως ποσοστό της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις που δίνουν το ποσοστό της μηνιαίας μέσης διάχυτης ακτινοβολίας μιας περιοχής ως συνάρτηση του δείκτη αιθριότητας. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες είναι οι σχέσεις των Erbs et al.^[11], για την εξαγωγή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν πολύμηνες μετρήσεις από 5 μετεωρολογικούς σταθμούς στις ΗΠΑ και έναν στην Αυστραλία. Οι σχέσεις αυτές δίνουν τη συσχέτιση μεταξύ διάχυτης ακτινοβολίας και δείκτη αιθριότητας, ανάλογα με την εποχή (εκπεφρασμένη ως όρια της ηλιακής γωνίας δύσης) και είναι οι παρακάτω:

Για $\omega_s \leq 1,4208$ και $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$, ισχύει:

$$\bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad (2.2.2.5)$$

Για $\omega_s > 1,4208$ και $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$, ισχύει:

$$\bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3 \quad (2.2.2.6)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, ω_s είναι η ηλιακή γωνία δύσης για τη διάμεσο του κάθε μήνα.

Συγκεκριμένα για την Ελλάδα, οι Lalas et al.^[12] προτείνουν κάποιες πρωτοβάθμιες σχέσεις που συσχετίζουν τη διάχυτη ακτινοβολία με τον δείκτη αιθριότητας, οι οποίες μάλιστα δεν έχουν εποχική εξάρτηση. Οι σχέσεις αυτές προέκυψαν από επεξεργασία μετρήσεων διάρκειας περίπου 2 ετών από 3 μετεωρολογικούς σταθμούς (συγκεκριμένα στην Αθήνα, τη Ρόδο και την Κύθνο), και είναι οι παρακάτω:

$$\text{Αθήνα: } \bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,26 - 1,41\bar{K}_T$$

$$\text{Ρόδος: } \bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,31 - 1,53\bar{K}_T \quad (2.2.2.7)$$

$$\text{Κύθνος: } \bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,23 - 1,39\bar{K}_T$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για κάθε εποχή, και για τιμές του δείκτη αιθριότητας $0,22 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

Σημείωση: Για δείκτες αιθριότητας εκτός των παραπάνω ορίων, ο λόγος \bar{K}_d παίρνει σταθερές τιμές. Συγκεκριμένα, για $\bar{K}_T < 0,22$, οι Lalas et. al.^[12] προτείνουν την τιμή $\bar{K}_d = 0,98$, ενώ για $\bar{K}_T > 0,75$, οι Liu και Jordan^[13] προτείνουν την τιμή $\bar{K}_d = 0,16$.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η *μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία* \bar{H}_d . Η *μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ακτινοβολία* \bar{H}_b προκύπτει ως διαφορά μεταξύ ολικής και διάχυτης από την σχέση:

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (2.2.2.8)$$

Υπολογισμός συνιστώσων Ημερήσιας Ηλιακής ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου

Στην προηγούμενη παράγραφο υπολογίστηκαν οι μηνιαίες μέσες ημερήσιες τιμές των συνιστώσων της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία για τις συνιστώσες της ακτινοβολίας σε ημερήσια βάση, αυτές μπορούν να προκύψουν με δύο τρόπους:

- 1) Θεωρώντας ότι κάθε μήνας αποτελείται από πανομοιότυπες ημέρες:
Κατά τη θεώρηση αυτή, κάθε ημέρα του μήνα χαρακτηρίζεται από τις ίδιες τιμές συνολικής, διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας οι οποίες είναι ίσες με τις μηνιαίες μέσες. Η λύση αυτή είναι, φυσικά, πολύ ταχύτερη υπολογιστικά καθώς αποφεύγονται οι εκτενείς υπολογισμοί, ωστόσο είναι λιγότερο ακριβής και, στην περίπτωση των μονάδων CSP, οδηγεί σε ελαφρές υπερδιαστασιολογήσεις σε ότι αφορά την απαιτούμενη έκταση του πεδίου ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή συγκεκριμένης ισχύος^[9].
- 2) Με τη δημιουργία ενός Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (Typical Meteorological Year – TMY):
Κατά τη μέθοδο αυτή γίνεται χρήση μεθοδολογιών για τη δημιουργία τεχνητών («συνθετικών») σειρών ημερήσιας ή και ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες δε διαφέρουν από τις πραγματικά μετρούμενες^[9]. Η δημιουργία αυτών των σειρών βασίζεται στη γνώση του μηνιαίου μέσου ημερήσιου δείκτη αιθριότητας \bar{K}_T , από τον οποίο προκύπτουν οι ημερήσιες τιμές του δείκτη αιθριότητας K_T για κάθε μήνα. Οι πρώτες προσεγγίσεις αυτής της μεθόδου έγιναν από τους Liu και Jordan^[13], οι οποίοι έδειξαν ότι οι μέσοι μηνιαίοι και οι ημερήσιοι δείκτες αιθριότητας συνδέονται με τη σχέση:

$$\bar{K}_T = \int_0^1 K_T dF \quad (2.2.2.9)$$

Στην παραπάνω σχέση, F είναι το ποσοστό των ημερών κάθε μήνα με τιμή για τον ημερήσιο δείκτη αιθριότητας μικρότερη από K_T , ή διαφορετικά:

$$F(K_T) = \int_0^{K_T} K_T dF \quad (2.2.2.10)$$

δηλαδή η F είναι η *συνάρτηση κατανομής* των ημερήσιων δεικτών K_T .

Η πρώτη προσπάθεια αναλυτικής έκφρασης της συνάρτησης κατανομής F έγινε από τους Bendt et al.^[14] οι οποίοι, χρησιμοποιώντας μετρήσεις από 90 τοποθεσίες στις ΗΠΑ για μία περίοδο 20 ετών, πρότειναν τη συνάρτηση:

$$F(K_T) = \frac{\exp(\gamma K_{T,\min}) - \exp(\gamma K_T)}{\exp(\gamma K_{T,\min}) - \exp(\gamma K_{T,\max})} \quad (2.2.2.11)$$

Στην παραπάνω σχέση:

γ : Χαρακτηριστική τιμή της συγκεκριμένης εκθετικής κατανομής
 $K_{T,min}, K_{T,max}$: Η ελάχιστη και μέγιστη τιμή αντίστοιχα των ημερήσιων δεικτών αιθριότητας στον εκάστοτε μήνα.

Για την τιμή γ , ο Herzog^[15] έδωσε την παρακάτω αναλυτική έκφραση:

$$\gamma = -1,498 + \frac{1,184 \frac{K_{T,min} - K_{T,max}}{K_{T,min} - K_T} - 27,182 \exp\left(-1,5 \frac{K_{T,min} - K_{T,max}}{K_{T,min} - K_T}\right)}{K_{T,min} - K_{T,max}} \quad (2.2.2.12)$$

Για τις ακραίες τιμές του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας, οι Aguiar και Collares-Pereira^[16] πρότειναν την τιμή 0,05 για την $K_{T,min}$ (σταθερή και ανεξάρτητη τοποθεσίας), ενώ για την $K_{T,max}$ υπέθεσαν την τιμή 0,864.

Αργότερα, οι Hollands και Huges^[17], συσχέτισαν τη μέγιστη τιμή του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας $K_{T,max}$ με τη μηνιαία μέση τιμή \bar{K}_T , μέσω της σχέσης:

$$K_{T,max} = 0,6313 + 0,267\bar{K}_T - 11,9(\bar{K}_T - 0,75)^8 \quad (2.2.2.13)$$

Από τις εξισώσεις (2.2.2.11) έως (2.2.2.13) μπορεί κανείς να υπολογίσει τιμές για τον ημερήσιο δείκτη αιθριότητας K_T , και επομένως τιμές για τη συνολική ακτινοβολία H κάθε ημέρας του χρόνου, έχοντας ως δεδομένο την μηνιαία μέση τιμή του δείκτη αιθριότητας \bar{K}_T . Η σύνθεση του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους γίνεται μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης^[18], ωστόσο έχειδειχθεί ότι η σειρά κατάταξης των ημερών κάθε μήνα όσον αφορά στην ηλιοφάνειά τους δεν έχει κάποια επίπτωση στους υπολογισμούς της ημερήσιας αξιοποιησιμότητας των μονάδων CSP^[9].

Σημείωση: Στην παρούσα εργασία, ως πρώτη προσέγγιση και για λόγους οικονομίας χρόνου και υπολογισμών, θα υιοθετηθεί ο πρώτος τρόπος υπολογισμού των συνιστωσών της ημερήσιας ακτινοβολίας (ο κάθε μήνας θα θεωρηθεί ότι αποτελείται από πανομοιότυπες ημέρες, ολικής ακτινοβολίας ίσης με τη μέση μηνιαία)

Υπολογισμός συνιστωσών Ωριαίας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου

Γνωρίζοντας την ημερήσια ολική ακτινοβολία H (θεωρούμενη ίση με τη μηνιαία μέση, και υπολογιζόμενη από τη σχέση 2.2.2.4), η *ωριαία ολική ακτινοβολία*, για κάθε ώρα της ημέρας, υπολογίζεται από το λόγο r_t της ωριαίας ολικής προς την ημερήσια ολική ακτινοβολία, ο οποίος δίνεται από τη σχέση^{[9],[19]}:

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)} \quad (2.2.2.14)$$

(γωνίες σε rad)

και οι συντελεστές a, b δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$$

(γωνίες σε rad)

Η *ωριαία διάχυτη ακτινοβολία* δίνεται από αντίστοιχη σχέση^{[9],[19]}:

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)} \quad (2.2.2.15)$$

(γωνίες σε rad)

ενώ η *ωριαία άμεση ακτινοβολία* προκύπτει ως διαφορά της ολικής από τη διάχυτη:

$$I_b = I - I_d \quad (2.2.2.16)$$

Σημείωση: Θεωρούμε πως, στη διάρκεια μίας ώρας, η ηλιακή ακτινοβολία και οι συνιστώσες της έχουν σταθερή τιμή. Αυτό αφενός διευκολύνει τους υπολογισμούς, καθώς η στιγμιαία ισχύς της ακτινοβολίας G (W/m^2) έχει την ίδια αριθμητική τιμή με την ωριαία τιμή της ενέργειας ακτινοβολίας I (kWh/m^2), και αφετέρου δεν υπάρχουν διαθέσιμες αναλυτικές σχέσεις που να δίνουν τη μεταβολή της τιμής της ενέργειας ακτινοβολίας σε διαστήματα μικρότερα της ώρας.

Υπολογισμός Ωριαίας Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Επίπεδο Κάθετο στις Ηλιακές Ακτίνες

Οι σχέσεις που προηγήθηκαν δίνουν τις συνιστώσες (άμεση και διάχυτη) της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, σε επίπεδο δηλαδή παράλληλο στο έδαφος. Όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο, τα κάτοπτρα των διατάξεων CSP έχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης σε ένα ή δύο άξονες, επομένως ο προσανατολισμός τους διαφέρει από τον οριζόντιο, και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για το λόγο αυτό, στη μελέτη των διατάξεων CSP, ως είσοδος για την τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας δε χρησιμοποιούνται οι τιμές οριζοντίου επιπέδου, αλλά οι τιμές της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες. Ο προσανατολισμός του επιπέδου αυτού μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της ηλιακής κίνησης.

Στην παράγραφο αυτή, θα γίνει ο υπολογισμός της τιμής της άμεσης ακτινοβολίας, σε επίπεδο κάθετο σε αυτή, σε ωριαία βάση. Η ανάλυση θα μπορούσε να ακολουθήσει τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω για τις τιμές οριζοντίου επιπέδου (ξεκινώντας δηλαδή από την εξωγήινη ακτινοβολία, τη διάκριση της ακτινοβολίας σε συνιστώσες κλπ), ωστόσο κάτι δεν είναι δυνατό καθώς οι δείκτες αιθριότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ανάλυση, και οι σχέσεις που τους συνδέουν, έχουν οριστεί βάσει μετρήσεων ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου. Για το λόγο αυτό, η ωριαία τιμή της άμεσης ακτινοβολίας σε κάθετο επίπεδο ($I_{b,n}$) θα προκύψει από την τιμή της αντίστοιχης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (I_b) μέσω της σχέσης (2.2.1.2), αντικαθιστώντας την ισχύ β με την ενέργεια I (όπως αναφέρθηκε, οι δύο είναι αριθμητικά ίσες).

$$I_b = I_{b,n} \cdot \cos \theta_z \Rightarrow I_{b,n} = \frac{I_b}{\cos \theta_z} \quad (2.2.2.17)$$

όπου:

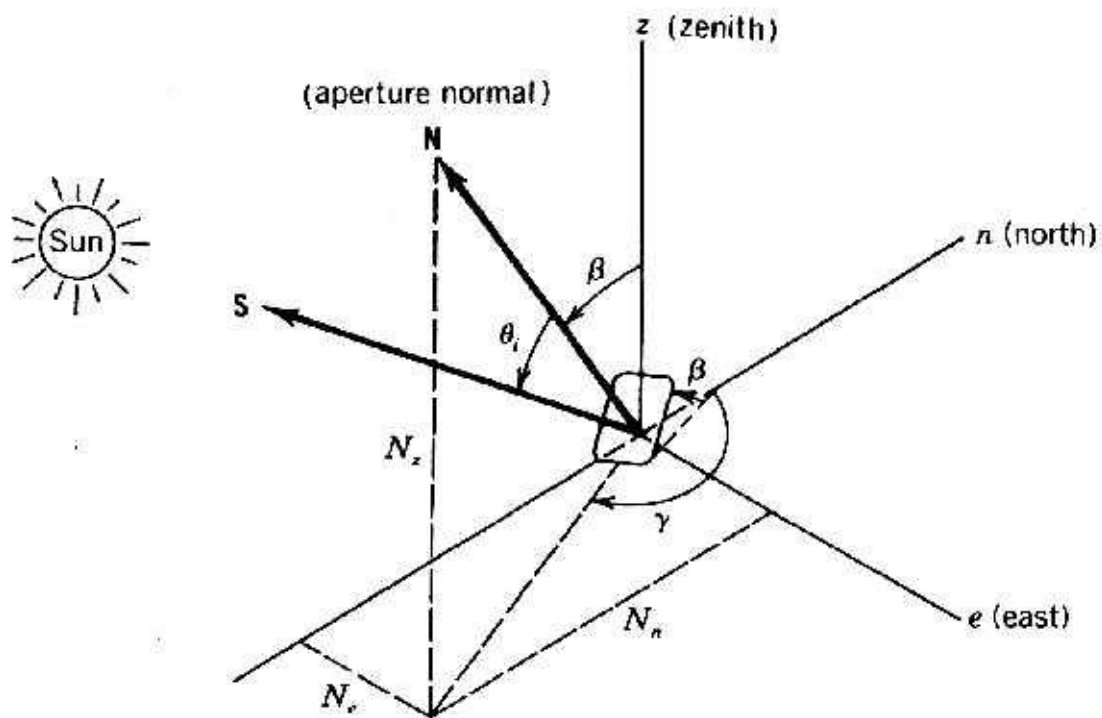
$\cos \theta_z$ το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ, όπως αυτό δίνεται από τη σχέση (2.1.4)

Η τιμή της ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες (G_n) είναι αριθμητικά ίση με την τιμή $I_{b,n}$ καθώς, όπως ειπώθηκε, θεωρούμε πως η τιμή της ακτινοβολίας παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια μίας ώρας.

2.2.3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΝΗΜΙΤΟΝΟΥ

Από τη σχέση (2.2.1.17) προκύπτει ότι η ποσότητα ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια, της οποίας η κάθετος δε συμπίπτει με τη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι μειωμένη σε σχέση με εκείνη που θα προσέπιπτε σε κάθετο στην ακτινοβολία επίπεδο, κατά παράγοντα ίσο με το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζουν η διεύθυνση της ακτινοβολίας και η κάθετος στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό, η μείωση δηλαδή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιφάνειας με κλίση προς αυτήν, ονομάζεται *φαινόμενο συνημιτόνου*.

Εύλογα προκύπτει πως για την εκμετάλλευση της κατά το δυνατόν μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας η επιφάνεια του συλλέκτη, ή του κατόπτρου στην περίπτωση των συστημάτων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, θα πρέπει να προσανατολίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη παραλληλότητα της καθέτου της με τη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το διάνυσμα διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας εκφράζεται ως προς σύστημα συντεταγμένων στην επιφάνεια της Γης με χρήση των γωνιών α , θ_z και A_z , όπως έχει αναλυθεί στα προηγούμενα. Αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων μπορεί να οριστεί και για την επιφάνεια συλλέκτη τυχαίου προσανατολισμού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2.3: Διάνυσμα διεύθυνσης της καθέτου επιφάνειας τυχαίου προσανατολισμού N , ως προς σύστημα συντεταγμένων $Oxyz$, με τις γωνίες κλίσης β και αζιμουθίου γ ((Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986).

Το διάνυσμα N της καθέτου στην επιφάνεια ορίζεται ως προς το σύστημα συντεταγμένων από τη σχέση:

$$N = N_z \mathbf{i} + N_e \mathbf{j} + N_n \mathbf{k} \quad (2.2.3.1)$$

όπου:

i, j, k : Τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες z (κάθετος στην επιφάνεια της Γης), e (ανατολική κατεύθυνση) και n (βόρεια κατεύθυνση) αντίστοιχα.

Από το σχήμα προκύπτει ότι οι συνιστώσες N_z, N_e, N_n δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} N_z &= \cos \beta \\ N_e &= \sin \beta \cdot \sin \gamma \\ N_n &= \sin \beta \cdot \cos \gamma \end{aligned} \quad (2.2.3.2)$$

όπου:

β : Η γωνία κλίσης της επιφάνειας ως προς τον κατακόρυφο άξονα
 γ : Η γωνία αζιμουθίου της επιφάνειας ως προς τη βόρεια κατεύθυνση

Οι συνιστώσες του διανύσματος διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας S , αντίστοιχα, είναι:

$$S = S_z \mathbf{i} + S_e \mathbf{j} + S_n \mathbf{k} \quad (2.2.3.3)$$

όπου οι συνιστώσες S_z, S_e, S_n δίνονται ως συνάρτηση των γνωστών γωνιών ηλιακού ύψους a , ζενιθ θ_z και ηλιακού αζιμουθίου A_z από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} S_z &= \sin a \\ S_e &= \cos a \cdot \sin A_z \\ S_n &= \cos a \cdot \cos A_z \end{aligned} \quad (2.2.3.4)$$

Το **συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης** θ_i , της γωνίας δηλαδή που σχηματίζει η κάθετος της επιφάνειας με τη διεύθυνση της ακτινοβολίας μπορεί να βρεθεί από το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων S και N , δηλαδή από τη σχέση:

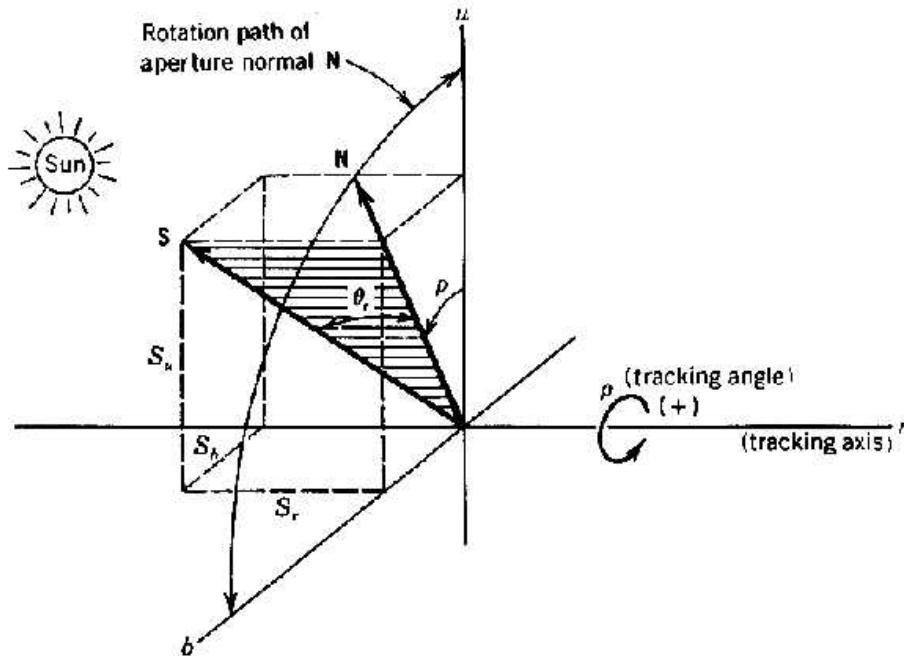
$$\begin{aligned} \cos \theta_i &= \mathbf{S} \cdot \mathbf{N} \\ &= \sin a \cdot \cos \beta + \cos a \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma - A_z) \end{aligned} \quad (2.2.3.5)$$

Τα κάτοπτρα των συστημάτων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας έχουν τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από έναν ή δύο άξονες, ώστε να παρακολουθούν την ηλιακή κίνηση. Στη συνέχεια της παραγράφου θα δούμε πώς υπολογίζεται το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης την

περίπτωση της κίνησης γύρω από έναν άξονα. Όταν η ηλιακή κίνηση παρακολουθείται γύρω από δύο άξονες, τότε τα διανύσματα N και S συμπίπτουν, και ισχύει $\cos\theta_i=1$.

Περιστροφή γύρω από έναν άξονα

Σε αυτή την περίπτωση το κάτοπτρο έχει τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από έναν άξονα, έτσι ώστε, κάθε στιγμή, η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας να βρίσκεται στο επίπεδο που σχηματίζουν η κάθετος στην επιφάνεια και ο άξονας περιστροφής. Προκειμένου να βρεθούν σχέσεις μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας, θα πρέπει η τελευταία να αναλυθεί σε συνιστώσες παράλληλες με σύστημα συντεταγμένων που να περιέχει τον άξονα περιστροφής του κατόπτρου. Οι άλλοι δύο άξονες είναι προσανατολισμένοι έτσι ώστε ο ένας να είναι παράλληλος με το έδαφος, ενώ ο άλλος κάθετος σε αυτόν. Οι συνιστώσες του διανύσματος διεύθυνσης S της ηλιακής ακτινοβολίας σε τέτοιο σύστημα αξόνων φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.2.4: Ανάλυση του διανύσματος S της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων. (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Στο παραπάνω σχήμα, r είναι ο άξονας περιστροφής του κατόπτρου, και είναι παράλληλος με το έδαφος, b είναι άξονας κάθετος στον r και επίσης παράλληλος στο έδαφος, ενώ u είναι ο τρίτος άξονας που προκύπτει από δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων, κάθετος στο επίπεδο rb .

Η γωνία ρ είναι η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας (αλλά και η κάθετος της επιφάνειας, εφόσον είναι συνεπίπεδή της) με τον άξονα u , και δίνεται από τη σχέση:

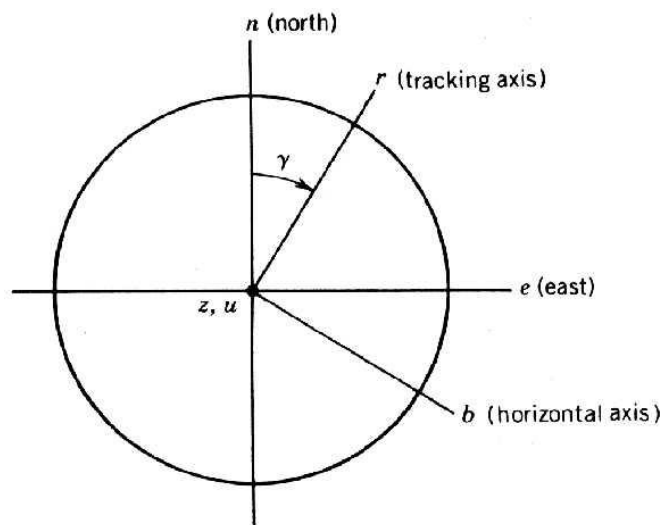
$$\tan \rho = \frac{S_b}{S_u} \quad (2.2.3.6)$$

όπου S_b και S_u οι συνιστώσες του διανύσματος διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας στους άξονες b και u αντίστοιχα.

Το συνημίτιο της γωνίας πρόσπτωσης θ_i προκύπτει από το γραμμοσκιασμένο τρίγωνο του σχήματος 2.2.4 ως (το διάνυσμα S είναι μοναδιαίο):

$$\cos \theta_i = \begin{cases} \sqrt{S_b^2 + S_u^2} \\ \eta' \\ \sqrt{1 - S_r^2} \end{cases} \quad (2.2.3.7)$$

Όταν ο άξονας περιστροφής r είναι παράλληλος με το έδαφος (όπως και ο b), τότε προκύπτει ότι ο άξονας u είναι κατακόρυφος και συμπίπτει με τον άξονα z . Επομένως, το σύστημα συντεταγμένων $Orbu$ είναι στραμμένο ως προς το σύστημα $Onez$ γύρω από τον άξονα $z=u$ κατά γωνία γ , δηλαδή τη γωνία αζιμουθίου του κατόπτρου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2.5: Γεωμετρική σχέση μεταξύ των συστημάτων συντεταγμένων $Orbu$ και $Onez$ (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Επομένως, το διάνυσμα διεύθυνσης S της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα $Orbu$ εκφράζεται ως προς αυτό στο σύστημα $Onez$ μέσω του μητρώου μετασχηματισμού:

$$\begin{Bmatrix} S_u \\ S_b \\ S_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} S_z \\ S_e \\ S_n \end{Bmatrix} \quad (2.2.3.8)$$

Σημείωση: Όταν ο άξονας περιστροφής του κατόπτρου είναι προσανατολισμένος στη διεύθυνση Βορρά-Νότου (όπως συχνά συμβαίνει στα συστήματα CSP), τότε $\gamma=0^\circ$, και από τη σχέση (2.2.3.8) προκύπτει ότι οι συνιστώσες του διανύσματος διεύθυνσης S της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα $Orbu$ συμπίπτουν με αυτές του συστήματος $Onez$, όπως αυτές δίνονται από τις σχέσεις (2.2.3.4). Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, εκ της δευτέρας των σχέσεων (2.2.3.7) προκύπτει ότι:

$$\cos \theta_i = \sqrt{1 - S_n^2} = \sqrt{1 - \cos^2(a) \cdot \cos^2(A_z)} \quad (2.2.3.9)$$

2.3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] "The Sun as a source of energy, Part 1: Solar Astronomy". www.itacanet.org
- [2] Αρκούδης Γεώργιος, Διπλωματική Εργασία. «Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [3] "The Sun as a source of energy, Part 3: Calculating Solar Angles". www.itacanet.org
- [4] "The Sun as a source of energy, Part 2: Solar energy reaching the Earth's surface". www.itacanet.org
- [5] W.B.Stine, R.W.Harrigan. "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986. Revised and updated version by William Stine and Michael Geyer. Found in <http://www.powerfromthesun.net/>
- [6] K. Scharmer, J. Greif. "The European Solar Radiation Atlas, Vol.1: Fundamentals and Maps". Les Presses de l'École des Mines, Paris, 2000.
- [7] «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών». Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Α' Έκδοση, Ιούνιος 2010.
- [8] Ηρακλής Π. Κακούρης, Διπλωματική Εργασία. «Οικονομοτεχνική Μελέτη Εγκατάστασης Ηλιακών Συλλεκτών σε Νοσοκομεία». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2003.
- [9] Teresita Larrain, Rodrigo Escobar, Julio Vergara. "Performance model to assist solar thermal power plant siting in northern Chile based on backup fuel consumption". Renewable Energy 35 (2010) 1632-1643.
- [10] "Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook, Photovoltaic Project Analysis Chapter". RETScreen® International, Clean Energy Decision Support Centre. www.retscreen.net.
- [11] D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie. "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation". Solar Energy Vol.28, No.4, pp. 293-302, 1982.
- [12] D.P. Lalas, M. Petrakis, C. Papadopoulos. "Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece". Solar Energy Vol.39, No.5, pp. 455-458, 1987.
- [13] Benjamin Y.H. Liu, Richard C. Jordan. "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation".
- [14] Bendt P, Collares-Pereira M, Rabl A. "The frequency distribution of daily insolation values". Solar Energy Vol.27, pp.1-5, 1981.
- [15] Herzog ME. Thesis. "Estimation of hourly and monthly average daily insolation on tilted surfaces". Trinity University, 1985.
- [16] Aguiar R, Collares-Pereira M. "TAG: a time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation". Solar Energy Vol. 49, No. 3, pp. 167-174, 1992.
- [17] K.G.T. Hollands, R.G. Huget. "A probability density function for the clearness index, with applications". Solar Energy 30; 3, pp.195-209, 1983.
- [18] J.M. Santos, J.M. Pinazo, J. Canada. "Methodology for generating daily clearness index values K_t starting from the monthly average daily value \bar{K}_t . Determining the daily sequence using stochastic models". Renewable Energy 28 (2003) 1523-1544.
- [19] Manuel Collares-Pereira, Ari Rabl. "The average distribution of solar radiation – Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". Solar Energy Vol. 22, pp. 155-164.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Σε προηγούμενο κεφάλαιο ειπώθηκε ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Με χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ (όπως π.χ. στα φωτοβολταϊκά πάρκα)
- Με συγκέντρωση (εστίαση) της ηλιακής ακτινοβολίας, και χρήση της ηλιακής ενέργειας ως πηγή θερμότητας για την εκτέλεση κάποιου θερμοδυναμικού κύκλου ισχύος, την παραγωγή έργου από κάποια θερμική μηχανή και τη μετατροπή του μηχανικού έργου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας.

Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία ονομάζονται ηλιοθερμικές μονάδες. Στη συνέχεια, και για λόγους συντομίας, θα αναφέρονται ως μονάδες CSP (Concentrated Solar Power). Στις μονάδες αυτές, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την πραγματοποίηση ενός θερμοδυναμικού κύκλου από κάποιο ρευστό λειτουργίας. Υπό την έννοια αυτή, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ως «καύσιμο», υποκαθιστώντας τα συμβατικά καύσιμα στις μονάδες αυτές. Το προφανές πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς ρύπους, αξιοποιώντας ώριμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, οι μονάδες CSP διαθέτουν ευελιξία εφαρμογών, καθώς μπορούν να σχεδιαστούν ως αυτόνομες μονάδες, συμπεριλαμβάνοντας υποσυστήματα αποθήκευσης για παρατεταμένη παροχή θερμότητας και κατά τη διάρκεια της νύχτας, ως μονάδες για την κάλυψη της ζήτησης κατά της περιόδους αιχμής, ή ως συμπληρωματικές διατάξεις για εξοικονόμηση καυσίμου σε ήδη υπάρχοντες θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (ατμοηλεκτρικές μονάδες ή αεριοστρόβιλους), λόγω της ικανότητάς τους να συνδυάζονται με οποιαδήποτε θερμική μηχανή εξωτερικής καύσης και να λειτουργούν ως πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας κατά την εκτέλεση του κύκλου ισχύος.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η συστηματική προσέγγιση των τριών τύπων διατάξεων CSP με την ευρύτερη απήχηση και εμπορική εφαρμογή (παραβολικής σκάφης, ηλιακών πύργων και δίσκων Stirling), και η μαθηματική ανάλυση και περιγραφή των υποσυστημάτων τους, όπως αυτά ορίστηκαν στην παράγραφο 1.2.3 και παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 1.2.3.2 (δηλαδή του υποσυστήματος παραγωγής ισχύος και του υποσυστήματος συλλογής και εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας), καθώς και ενεργειακών μετατροπών και φαινομένων μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα σε αυτά.

3.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

i) Επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών

Οι μονάδες CSP χρησιμοποιούν θερμικές μηχανές για την παραγωγή έργου. Όπως είναι γνωστό, η δυνατότητα παραγωγής έργου των θερμικών μηχανών αυξάνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, όταν η δεξαμενή αποβολής θερμότητας (σε αυτή την περίπτωση το περιβάλλον) διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Επομένως, η μέγιστη δυνατή απόδοση κατά το θερμοδυναμικό κύκλο γίνεται μεγαλύτερη, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας. Οι κοινοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση νερού μπορούν να επιτύχουν θερμοκρασίες έως και 70°C ^[2]. Μία αντιστρεπτή θερμική μηχανή που θα λειτουργούσε μεταξύ αυτής της θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (έστω 25°C) θα είχε μέγιστη απόδοση περίπου 13%, σύμφωνα με το 2^ο θερμοδυναμικό νόμο. Η απόδοση μιας πραγματικής θερμικής μηχανής θα ήταν σημαντικά μικρότερη. Είναι επομένως σαφές ότι για την αύξηση της απόδοσης οποιασδήποτε θερμικής μηχανής απαιτούνται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Τέτοιες θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν με την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας.

ii) Μειωμένες θερμικές απώλειες

Οι υψηλές θερμοκρασίες σε μία επιφάνεια συνοδεύονται και από αύξηση των θερμικών απωλειών στην επιφάνεια λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Το μέγεθος των απωλειών είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια. Με την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας από μία μεγάλη επιφάνεια (την επιφάνεια των ηλιακών κατοπτρών) σε μία μικρότερη (την επιφάνεια του δέκτη) επιτυγχάνεται ταυτόχρονα επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών και σχετική μείωση των θερμικών απωλειών.

iii) Μείωση κόστους συλλεκτών

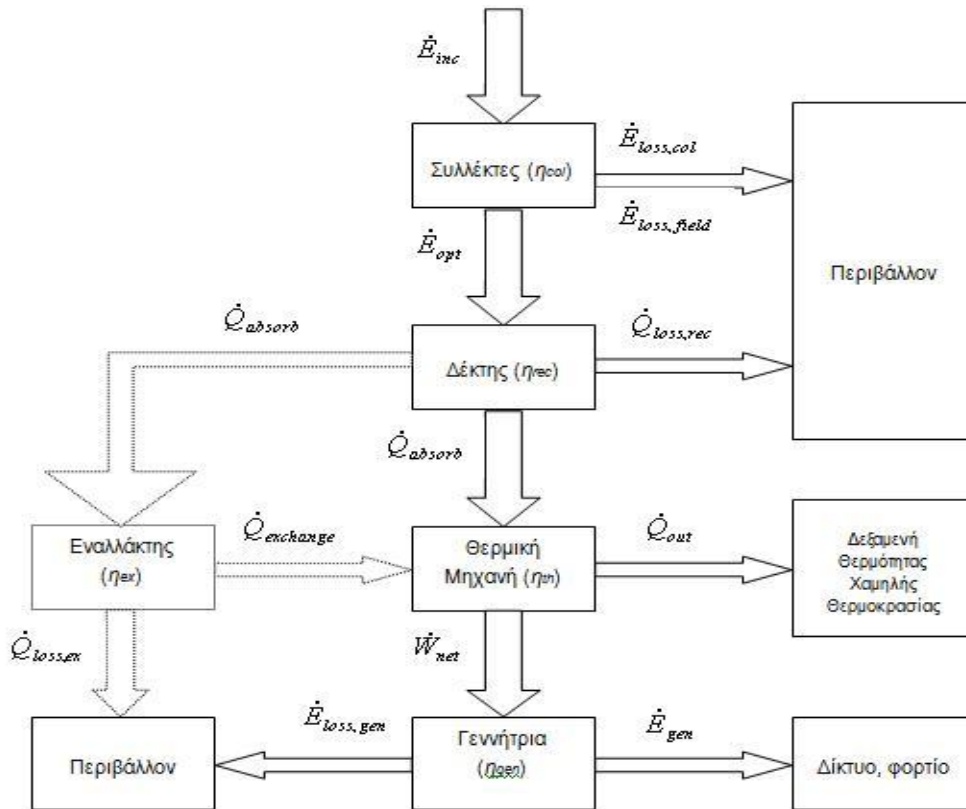
Οι ανακλαστικές επιφάνειες είναι κατά κανόνα φθηνότερες από τις απορροφητικές, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς συλλέκτες. Έτσι, μπορούν να καλυφθούν μεγάλες εκτάσεις με φθηνά κάτοπτρα, τα οποία ανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μικρότερες επιφάνειες απορρόφησης (στον δέκτη). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η ενσωμάτωση συστημάτων παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης στους φορείς των κατοπτρών αυξάνει το συνολικό κόστος της διάταξης.

3.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση του κάθε τύπου μονάδας CSP, όλες οι ηλιοθερμικές μονάδες χαρακτηρίζονται από την ίδια, κοινή διαδρομή ενέργειας. Όλες οι μονάδες χρησιμοποιούν κάποιας μορφής ηλιακό συλλέκτη (collector), ή πεδίο συλλεκτών, για την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μεταφορά της ηλιακής ενέργειας σε κάποιο δέκτη (receiver), όπου και δεσμεύεται από την επιφάνεια απορρόφησης (absorber) του δέκτη. Η επιφάνεια απορρόφησης

του δέκτη αποτελεί την πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας για τον κύκλο ισχύος της μονάδας, είτε με απευθείας μεταφορά θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου, είτε με μεταφορά θερμότητας σε κάποιο κατάλληλο ρευστό μεταφοράς (Heat Transfer Fluid – HTF) και από αυτό στο ρευστό λειτουργίας μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Ο κύκλος ισχύος χρησιμοποιεί την θερμότητα που προστίθεται στο ρευστό λειτουργίας για την παραγωγή μηχανικού έργου σε κατάλληλη θερμική μηχανή, ενώ αποβάλλει την περίσσεια θερμότητας σε δεξαμενή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Τέλος, το μηχανικό έργο της μηχανής αποτελεί ενεργειακή είσοδο σε ηλεκτρική γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όλες οι παραπάνω διεργασίες εμπεριέχουν μεταφορά θερμότητας και ενεργειακές μετατροπές, επομένως χαρακτηρίζονται από αναντιστρεπτότητες, απώλειες θερμότητας και βαθμό απόδοσης. Σχηματικά, η ροή ενέργειας κατά τη λειτουργία μίας μονάδας CSP και ο βαθμός απόδοσης που χαρακτηρίζει κάθε μεταφορά ενέργειας στη μονάδα παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα:



Στο παραπάνω διάγραμμα, οι συμβολισμοί είναι:

- \dot{E}_{inc} : Η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην ανηγμένη επιφάνεια (aperture) του συλλέκτη (ή στη συνολική επιφάνεια του πεδίου συλλεκτών). Με τον όρο ανηγμένη επιφάνεια ορίζεται η επιφάνεια που είναι κάθετη στην ηλιακή ακτινοβολία.
- $\dot{E}_{loss,col}, \dot{E}_{loss,field}$: Ο ρυθμός απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλιακής ενέργειας από το συλλέκτη (ή το πεδίο συλλεκτών) στο δέκτη.
- \dot{E}_{opt} : Ο ρυθμός με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια φθάνει στο δέκτη.

$\dot{Q}_{loss,rec}$:	Ο ρυθμός απωλειών θερμότητας από την επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη.
\dot{Q}_{absorb} :	Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη στο ρευστό λειτουργίας ή το ρευστό μεταφοράς θερμότητας.
$\dot{Q}_{loss,ex}$:	Ο ρυθμός απωλειών θερμότητας στον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ ρευστού μεταφοράς θερμότητας και ρευστού λειτουργίας του κύκλου ισχύος.
$\dot{Q}_{exchange}$:	Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου ισχύος.
\dot{Q}_{out} :	Ο ρυθμός απόρριψης θερμότητας από τη θερμική μηχανή στη δεξαμενή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.
\dot{W}_{net} :	Η καθαρή ισχύς που παράγει η θερμική μηχανή
$\dot{E}_{loss,gen}$:	Ο ρυθμός ενεργειακών απωλειών στη γεννήτρια.
\dot{E}_{gen} :	Η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η γεννήτρια.

Κάθε μία από τις παραπάνω ενεργειακές διεργασίες μπορεί να χαρακτηριστεί από τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της επιθυμητής εξόδου προς την απαιτούμενη είσοδο για κάθε διεργασία. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ορίζονται:

- Η **οπτική απόδοση** η_{opt} ως: $\eta_{opt} = \frac{\dot{E}_{opt}}{\dot{E}_{inc}}$, η οποία χαρακτηρίζει τη μεταφορά ενέργειας από τα κάτοπτρα (συλλέκτες) στο δέκτη.
- Η **απόδοση του δέκτη** η_{rec} ως: $\eta_{rec} = \frac{\dot{Q}_{absorb}}{\dot{E}_{opt}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{loss,rec}}{\dot{E}_{opt}}$, η οποία χαρακτηρίζει τη μεταφορά θερμότητας από το δέκτη στο ρευστό μεταφοράς ή το ρευστό λειτουργίας.
- Η **απόδοση του κύκλου ισχύος** η_{th} : $\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{absorb}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{absorb}}$, που χαρακτηρίζει τη λειτουργία της θερμικής μηχανής (στην περίπτωση που υπάρχει ενδιάμεσο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, η ποσότητα \dot{Q}_{absorb} αντικαθίσταται από την $\dot{Q}_{exchange}$).
- Η **απόδοση του εναλλάκτη** η_{ex} : $\eta_{ex} = \frac{\dot{Q}_{exchange}}{\dot{Q}_{absorb}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{loss,ex}}{\dot{Q}_{absorb}}$
- Η **απόδοση της γεννήτριας** η_{gen} : $\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{gen}}{\dot{W}_{net}}$, που χαρακτηρίζει την αποτελεσματική μετατροπή του μηχανικού έργου του κύκλου ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια.

Από τις προηγούμενες σχέσεις προκύπτει ο **συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας** ως γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επιμέρους υποσυστημάτων της, ως:

$$\eta_{tot} = \eta_{opt} \cdot \eta_{rec} \cdot (\eta_{ex}) \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{gen} = \frac{\dot{E}_{gen}}{\dot{E}_{inc}} \quad (3.2.1)$$

3.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΛΟΓΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Με το λόγο συγκέντρωσης προσδιορίζεται ο βαθμός εστίασης που μπορεί να επιτευχθεί από μία διάταξη κατόπτρων-δέκτη. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί ορισμοί^[1]:

Οπτικός Λόγος Συγκέντρωσης

$$CR_o = \frac{\frac{1}{A_r} \cdot \int I_r dA_r}{I_a} \quad (3.3.1)$$

όπου:

A_r : Η επιφάνεια του δέκτη (m^2)

I_a : Η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, στην ανηγμένη επιφάνεια (aperture) των κατόπτρων (W/m^2)

Γεωμετρικός Λόγος Συγκέντρωσης

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.3.2)$$

όπου:

A_a : Η συνολική ανηγμένη επιφάνεια των κατόπτρων (m^2)

A_r : Η επιφάνεια του δέκτη (m^2)

Ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης χρησιμοποιείται συνηθέστερα διότι μπορεί να συσχετιστεί ευκολότερα με τις θερμικές απώλειες στο δέκτη, οι οποίες είναι ανάλογες της επιφάνειάς του, καθώς περιλαμβάνει τον όρο A_r .

3.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει η παρουσίαση και θερμοδυναμική ανάλυση των συστημάτων παραγωγής ισχύος των μονάδων CSP, και της μηχανικής τους διαμόρφωσης. Η κατηγοριοποίηση των διαφόρων συστημάτων γίνεται βάσει των κύκλων ισχύος που χρησιμοποιούνται στις θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής, είτε αυτές χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα, είτε ηλιακή ενέργεια ή συνδυασμό αυτών για την παραγωγή θερμότητας. Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου, η τεχνολογία της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί για την παροχή θερμότητας σε οποιαδήποτε μηχανή εξωτερικής καύσης, ενώ κάποιες διατάξεις είναι καταλληλότερες για χρήση σε συνδυασμό με συγκεκριμένους κύκλους από άλλες.

Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν στους κύκλους αερίου και στους κύκλους ατμού ανάλογα με την κατάσταση (φάση) στην οποία βρίσκεται το ρευστό λειτουργίας^[2]. Στους κύκλους αερίων, το ρευστό λειτουργίας διατηρείται στην αέρια φάση καθ' όλη τη διάρκεια του

κύκλου, ενώ στους κύκλους ατμού το ρευστό λειτουργίας βρίσκεται σε ένα στάδιο του κύκλου στην κατάσταση ατμού, και κατά τη διάρκεια ενός άλλου σταδίου του κύκλου σε υγρή κατάσταση.

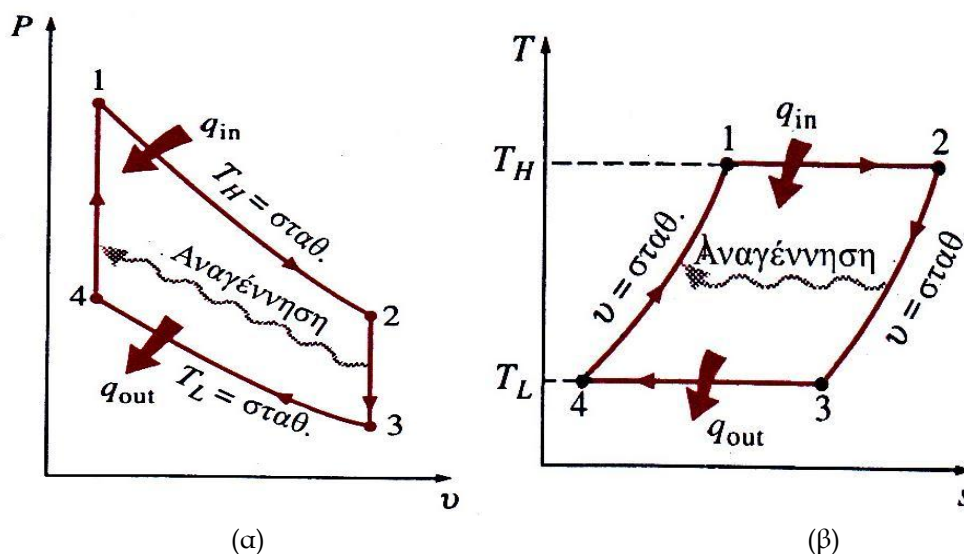
Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι ισχύος μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε κλειστούς και ανοιχτούς κύκλους^[2]. Στους κλειστούς κύκλους, το ρευστό λειτουργίας επανέρχεται στο τέλος του κύκλου στην αρχική του κατάσταση και επανακυκλοφορεί. Στους ανοιχτούς κύκλους το ρευστό λειτουργίας ανανεώνεται στο τέλος κάθε κύκλου.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι κύκλοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια αποτελούν εξιδανικεύσεις των πραγματικών κύκλων που πραγματοποιούνται στις θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής. Για το λόγο αυτό, ονομάζονται ιδανικοί κύκλοι, και αποτελούν το πρότυπο, βάσει του οποίου συγκρίνεται η απόδοση των πραγματικών κύκλων. Σε σχέση με τους ιδανικούς κύκλους, οι πραγματικοί περιλαμβάνουν πολλές εστίες αναντιστρεπτότητας, με αποτέλεσμα η απόδοσή τους να είναι μικρότερη της θεωρητικής. Μερικές από τις αιτίες αναντιστρεπτότητας στους πραγματικούς κύκλους είναι οι παρακάτω:

- Τριβές που προκαλούν πτώση πίεσης και αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού κατά τη ροή του σε σωληνώσεις ή συσκευές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας.
- Αναντίστρεπτες μεταφορές θερμότητας κατά μήκος πεπερασμένων θερμοκρασιακών διαφορών.
- Διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης σε κατάσταση ανισορροπίας των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων στον όγκο του ρευστού.

3.4.1. ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ STIRLING

Ο κύκλος Stirling ανήκει στους κύκλους αερίου, και αποτελεί τον κύκλο με την υψηλότερη θερμική απόδοση μεταξύ των κύκλων που εκτελούνται από εμβολοφόρες μηχανές. Τα διαγράμματα πίεσης-ειδικού όγκου (P-v) και θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) του κύκλου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα^[2]:



Σχήμα 3.4.1: (α) Διάγραμμα P-v ιδανικού κύκλου Stirling, (β) Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Stirling (Πηγή: Y.A. Cengel, M.A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

Περιγραφή του κύκλου Stirling

Ο ιδανικός κύκλος Stirling αποτελείται από τις εξής τέσσερις ολικά αντιστρεπτές διεργασίες:

- 1-2 Ισόθερμη εκτόνωση (Προσθήκη θερμότητας από εξωτερική πηγή υπό σταθερή θερμοκρασία)
- 2-3 Ισόχωρη προθέρμανση (Εσωτερική μεταφορά θερμότητας από το ρευστό λειτουργίας στον αναγεννητήρα υπό σταθερό όγκο)
- 3-4 Ισόθερμη συμπίεση (Απόρριψη θερμότητας σε εξωτερική δεξαμενή υπό σταθερή θερμοκρασία)
- 4-1 Ισόχωρη αναγέννηση (Εσωτερική μεταφορά θερμότητας από τον αναγεννητήρα πίσω στο ρευστό λειτουργίας υπό σταθερό όγκο)

Η προθέρμανση (αναγέννηση) είναι μία διεργασία με τη βοήθεια της οποίας, στη διάρκεια ενός τμήματος του κύκλου, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας σε μία συσκευή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (προθερμαντήρας ή αναγεννητήρας) και κατά τη διάρκεια ενός άλλου τμήματος του κύκλου επαναφορά της θερμικής αυτής ενέργειας στο ρευστό λειτουργίας.

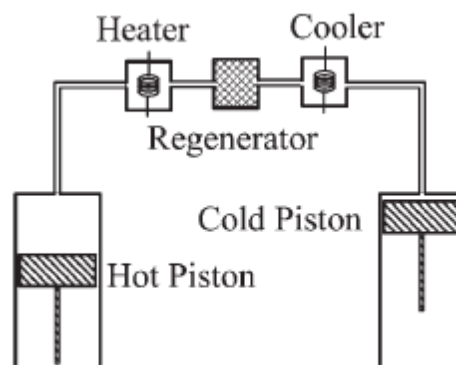
Ο ιδανικός κύκλος Stirling είναι ολικά (εσωτερικά και εξωτερικά) αντιστρεπτός κύκλος, καθώς η προσθήκη και αποβολή θερμότητας προς και από το ρευστό λειτουργίας λαμβάνει χώρα υπό σταθερή θερμοκρασία. Η απόδοση του ιδανικού κύκλου Stirling είναι κοινή με εκείνη του κύκλου Carnot, και επομένως ίση με τη μέγιστη δυνατή για οποιαδήποτε θερμική μηχανή που πραγματοποιεί κύκλο μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων. Ο κύκλος Stirling παρουσιάζει τα παρακάτω *πλεονεκτήματα*^[3]:

1. Κατά τις διεργασίες μεταφοράς θερμότητας, ο αναγεννητής μεταφέρει και απορροφά θερμότητα με ταχύ ρυθμό από το ρευστό λειτουργίας που τον διαρρέει. Αυτή διαδικασία μειώνει την απαιτούμενη θερμότητα από την πηγή υψηλής θερμοκρασίας, γεγονός που αυξάνει τη θερμική απόδοση της μηχανής.
2. Οι δύο ισοτροπικές διεργασίες του κύκλου Carnot, αντικαθίστανται στον κύκλο Stirling από δύο ισόχωρες. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του περικλειόμενου εμβαδού στο διάγραμμα P-u του κύκλου Stirling, χωρίς την ανάγκη υπέρμετρα υψηλών πιέσεων ή μεταβολών όγκου, όπως στον κύκλο Carnot. Το εμβαδό που περιέχεται στο διάγραμμα P-u ενός κύκλου, ισούται με το καθαρό έργο που παράγει ο κύκλος ισχύος, επομένως γίνεται προφανές ότι ο κύκλος Stirling παράγει περισσότερο καθαρό έργο από τον κύκλο Carnot που πραγματοποιείται μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων (κατά το ίδιο ποσό, φυσικά, αυξάνεται και η απαιτούμενη θερμότητα εφόσον η θερμική απόδοση των ίδιων κύκλων είναι κοινή).
3. Ο κύκλος Stirling είναι ο κύκλος με τη μεγαλύτερη θερμική απόδοση μεταξύ των κύκλων που πραγματοποιούνται σε παλινδρομικές εμβολοφόρες μηχανές (όπως οι κύκλοι Otto και Diesel), μεταξύ κοινών ορίων θερμοκρασίας, κοινών λόγων συμπίεσης, μάζας ρευστού λειτουργίας και εξωτερικής πίεσης.

Μηχανές Stirling

Οι μηχανές Stirling είναι μηχανές εξωτερικής καύσης (που σημαίνει ότι η πηγή θερμότητας βρίσκεται εκτός των ορίων του συστήματος), κλειστού κύκλου, οι οποίες χρησιμοποιούν αέρια ως ρευστά λειτουργίας. Για τη μεταφορά θερμότητας προς και από το ρευστό λειτουργίας χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας (θερμαντής για την ισόθερμη εκτόνωση, αναγεννητής για την ισόχωρη προθέρμανση και αναγέννηση και ψύκτης για την ισόθερμη συμπίεση). Η απόδοση των μηχανών Stirling κυμαίνεται μεταξύ 30 και 40%^{[3],[4]}, ενώ τυπικές συνθήκες λειτουργίας είναι θερμοκρασίες 650 έως 800°C και ταχύτητες μεταξύ 2000-4000 σαλ^[4]. Για την πραγματοποίηση του κύκλου Stirling από τις πραγματικές μηχανές, έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις διαφορετικές μηχανικές διαμορφώσεις^[4]:

- i. Στην *άλφα διαμόρφωση*, η μηχανή αποτελείται από δύο έμβολα σε ξεχωριστούς κυλίνδρους (συντά σε διάταξη V), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα έμβολα συνδέονται μέσω στροφαλοφόρου άξονα. Οι κύλινδροι διατηρούνται σε σταθερή θερμοκρασία (ο ένας στη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, και ο άλλος στην ελάχιστη).

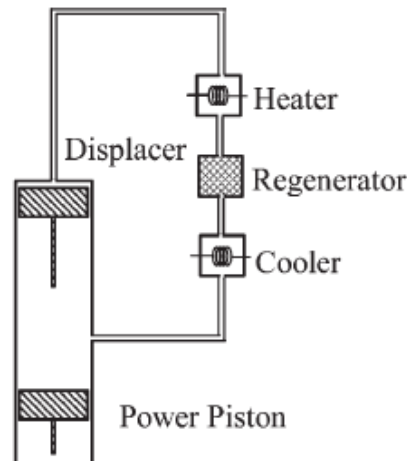


Σχήμα 3.4.2: Μηχανή Stirling άλφα διαμόρφωσης (Πηγή: B. Kongtragool, S. Wongwises. "A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines", 2003)

Αρχικά, όλη η ποσότητα του ρευστού λειτουργίας βρίσκεται στο θερμό κύλινδρο, σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (Κατάσταση 1 στο διάγραμμα 3.4.1). Κατά τη διάρκεια της ισόθερμης εκτόνωσης, μεταφέρεται θερμότητα από το θερμαντή (heater στο σχήμα) στο ρευστό, προκαλώντας τη μετατόπιση του θερμού εμβόλου (hot piston) και την παραγωγή έργου από τη μηχανή (Διεργασία 1-2). Στη συνέχεια, τα δύο έμβολα μετατοπίζονται ισοταχώς, έτσι ώστε ο όγκος του ρευστού να παραμένει σταθερός και να μεταφερθεί από τον θερμό στον ψυχρό κύλινδρο, περνώντας μέσα από τον αναγεννητή, ο οποίος δεσμεύει και αποθηκεύει τη θερμική ενέργεια του ρευστού (Διεργασία 2-3). Όταν ολόκληρος ο όγκος του ρευστού βρίσκεται στον ψυχρό κύλινδρο, πραγματοποιείται συμπίεση μέσω του ψυχρού εμβόλου και αποβολή θερμότητας στο περιβάλλον μέσω του ψύκτη κατά τρόπο τέτοιο ώστε η θερμοκρασία του ρευστού να παραμένει σταθερή (Διεργασία 3-4). Στη συνέχεια, τα δύο έμβολα κινούνται και πάλι ισοταχώς προς την αντίθετη αυτή τη φορά κατεύθυνση, έτσι ώστε ο όγκος του ρευστού να παραμένει σταθερός καθώς αυτό περνά από τον ψυχρό στο θερμό κύλινδρο διαμέσου του

αναγεννητή, όπου και ανακτά ποσό θερμότητας ίσο με αυτό που έχασε κατά την αντίστροφη διεργασία (Διεργασία 4-1), και ο κύκλος ολοκληρώνεται.

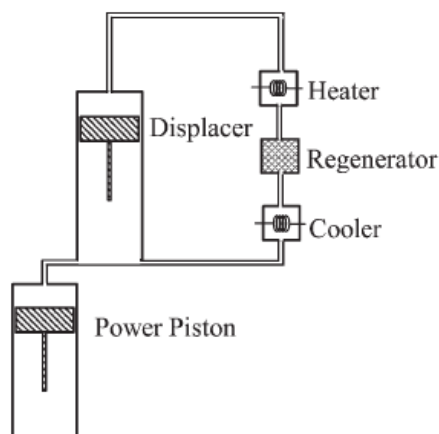
- ii. Στη *βήτα διαμόρφωση*, η μηχανή Stirling αποτελείται από έναν μόνο κύλινδρο, στον οποίο παλινδρομούν δύο έμβολα, συνδεδεμένα σε στροφαλοφόρο άξονα με κοινό στρόφαλο: το έμβολο ισχύος (power piston), και το έμβολο εκτοπισμού (displacer), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.4.3: Μηχανή Stirling βήτα διαμόρφωσης (Πηγή: B. Kongtragool, S. Wongwises. "A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines", 2003)

Η εκτέλεση των διεργασιών του κύκλου είναι όμοια με αυτήν της άλφα διαμόρφωσης με τη διαφορά ότι το ένα άκρο του κυλίνδρου διατηρείται στην υψηλή θερμοκρασία, και το άλλο στη χαμηλή. Το έμβολο εκτοπισμού είναι ελαφρά μικρότερης διαμέτρου από αυτή του κυλίνδρου, επομένως δε μπορεί να μεταβάλλει τον όγκο του ρευστού στον κύλινδρο και δεν παράγει έργο. Η λειτουργία του περιορίζεται στη μεταφορά (εκτοπισμό) του όγκου του ρευστού από το ένα άκρο του κυλίνδρου στο άλλο.

- iii. Η *γάμμα διαμόρφωση* χρησιμοποιεί δύο κυλίνδρους, αλλά μόνο ένα έμβολο ισχύος. Στο δεύτερο κύλινδρο παλινδρομεί έμβολο εκτοπισμού, το οποίο μετατοπίζει το ρευστό από το θερμό άκρο του κυλίνδρου εκτοπισμού στο ψυχρό. Τα δύο έμβολα συνδέονται στον ίδιο στροφαλοφόρο, ενώ το ρευστό μπορεί να κινείται ελεύθερα μεταξύ των δύο κυλίνδρων. Το έμβολο ισχύος πραγματοποιεί τόσο τη συμπίεση όσο και την εκτόνωση του ρευστού λειτουργίας. Το διάγραμμα της μηχανής Stirling γάμμα διαμόρφωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.4.4: Μηχανή Stirling γάμα διαμόρφωσης (Πηγή: B. Kongtragool, S. Wongwises. "A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines", 2003)

Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Stirling

Η ανάλυση των διεργασιών και οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας που εφαρμόζονται κατά την ανάλυση του κύκλου βασίζονται στη θεώρηση της μηχανής Stirling ως κλειστού συστήματος. Ως σύστημα δηλαδή, μέσω των ορίων του οποίου δεν υπάρχει ροή μάζας. Επίσης, το ρευστό λειτουργίας θεωρείται ιδανικό αέριο για το συσχετισμό μεταξύ των ιδιοτήτων του. Δηλαδή, για το αέριο ισχύει η καταστατική σχέση: $PV = mRT$, όπου P η πίεση, V ο όγκος, m η μάζα, T η θερμοκρασία και R η σταθερά του αερίου.

- Διεργασία 1-2 (Ισόθερμη εκτόνωση):

Κατά τη διεργασία αυτή προστίθεται θερμότητα στο ρευστό, ενώ αυτό παράγει έργο κατά την εκτόνωσή του. Εφόσον η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή κατά τη διεργασία, έπεται ότι και η εσωτερική του ενέργεια U παραμένει σταθερή, εφόσον προκειται για ιδανικό αέριο [για τα ιδανικά αέρια ισχύει $U=U(T)$]. Εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στο ρευστό δίνει:

$$Q_{12} - W_{12} = 0 \Rightarrow Q_{12} = W_{12} \quad (3.4.1.1)$$

όπου:

$$W_{12} = \int_1^2 PdV = \int_1^2 mRT \frac{1}{V} dV \stackrel{T_1=T_2}{\Rightarrow} W_{12} = mRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.4.1.2)$$

- Διεργασία 2-3 (Ισόχωρη προθέρμανση):

Κατά τη διεργασία αυτή αφαιρείται θερμότητα από το ρευστό, η οποία μεταφέρεται στον αναγεννητήρα. Δεν παράγεται έργο από το ρευστό. Εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στο ρευστό δίνει:

$$Q_{23} = \Delta U_{23} \quad (3.4.1.3)$$

- Διεργασία 3-4 (Ισόθερμη συμπίεση):

Κατά τη διεργασία αυτή αφαιρείται θερμότητα από το ρευστό, ενώ καταναλίσκεται έργο για τη συμπίεσή του. Εφόσον η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή κατά τη διεργασία, έπεται ότι και η εσωτερική του ενέργεια U παραμένει σταθερή, εφόσον προκειται για ιδανικό αέριο [για τα ιδανικά αέρια ισχύει $U=U(T)$]. Εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στο ρευστό δίνει:

$$W_{34} - Q_{34} = 0 \Rightarrow Q_{34} = W_{34} \quad (3.4.1.4)$$

όπου:

$$W_{34} = \int_3^4 P dV = \int_3^4 mRT \frac{1}{V} dV \stackrel{T_3=T_4}{\Rightarrow} W_{34} = mRT_3 \ln \frac{V_4}{V_3} = P_3 V_3 \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (3.4.1.5)$$

- Διεργασία 4-1 (Ισόχωρη αναγέννηση):

Κατά τη διεργασία αυτή παρέχεται θερμότητα στο ρευστό από τον αναγεννητήρα. Δεν παράγεται έργο από το ρευστό. Εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στο ρευστό δίνει:

$$Q_{41} = \Delta U_{41} \quad (3.4.1.6)$$

Βαθμός απόδοσης ιδανικού κύκλου Stirling

Υποθέτοντας ιδανική αναγέννηση στον κύκλο, δηλαδή ότι τα ποσά θερμότητας Q_{23} και Q_{41} είναι ίσα, τότε τα μόνα ποσά θερμότητας που προστίθενται και αφαιρούνται στο και από το ρευστό είναι τα Q_{12} και Q_{34} αντιστοίχα. Ο βαθμός απόδοσης του ιδανικού κύκλου Stirling δίνεται επομένως από τη σχέση:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{34}}{Q_{12}} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{P_3 V_3 \ln \frac{V_4}{V_3} \stackrel{V_2=V_4}{\Rightarrow}}{P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \stackrel{V_1=V_3}{\Rightarrow}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{P_3 V_3 \stackrel{PV=mRT}{\Rightarrow}}{P_1 V_1}$$

$$\boxed{\eta_{th} = 1 - \frac{T_3}{T_1}} \quad (3.4.1.7)$$

Ρευστά λειτουργίας

Συνηθέστερα ρευστά λειτουργίας στον κύκλο Stirling είναι ο αέρας, το ήλιο, το υδρογόνο και το άζωτο^{[3],[4]}. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των παραπάνω ρευστών:

Ρευστό	Μοριακό Βάρος (kg/kmol)	Σταθερά Αερίου R (kJ/kg.K)	Ιδιότητες Κρίσιμου Σημείου			Θερμοχωρητικότητα (T=300K)		
			Θερμοκρασία (K)	Πίεση (MPa)	Ειδικός όγκος (m ³ /kmol)	C _p (kJ/kg.K)	C _v (kJ/kg.K)	k
Αέρας	28,97	0,287	132,5	3,77	0,0883	1,005	0,718	1,400
Υδρογόνο	2,016	4,124	33,3	1,3	0,0649	14,307	10,183	1,405
Ήλιο	4,003	2,0769	5,3	0,23	0,0578	5,1926	3,1156	1,667
Άζωτο	28,013	0,2968	126,2	3,39	0,0899	1,039	0,743	1,400

Πίνακας 3.4.1: Χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες αερίων λειτουργίας κύκλου Stirling (Πηγή: Y.A. Cengel, M.A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

Μεταξύ αυτών, στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται το ήλιο και το υδρογόνο. Το υδρογόνο διαθέτει καλύτερες θερμοδυναμικές ιδιότητες, αλλά το ήλιο είναι γενικότερα πιο αδρανές και παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια κατά τη λειτουργία^[3].

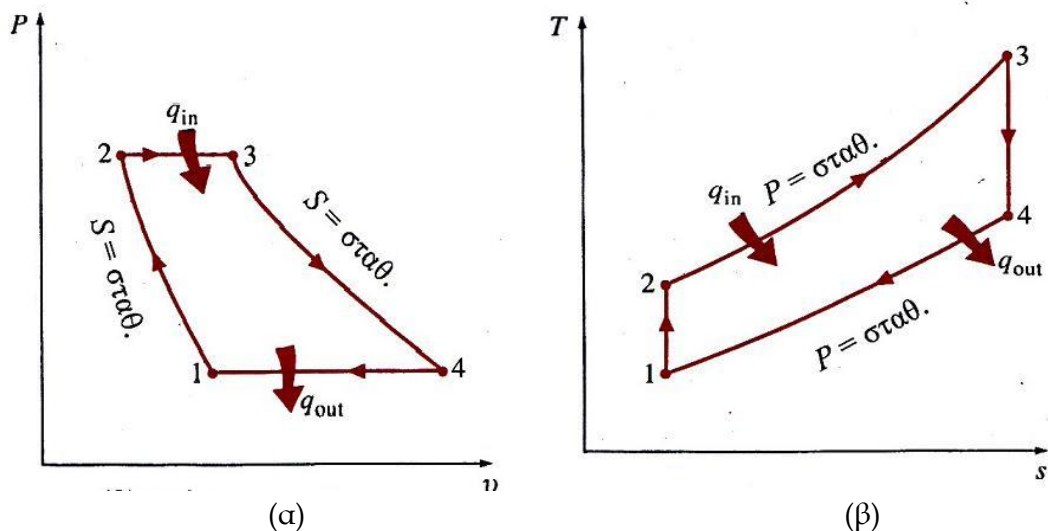
Αποκλίσεις της λειτουργίας των πραγματικών μηχανών Stirling από τον ιδανικό κύκλο

Πρέπει να τονιστεί ότι ο κύκλος που πραγματοποιείται στις πραγματικές μηχανές αποτελεί μόνο προσέγγιση του ιδανικού κύκλου Stirling. Στην πραγματικότητα, μια σειρά από τεχνικούς και φυσικούς περιορισμούς προκαλούν αποκλίσεις του πραγματοποιούμενου κύκλου από τον ιδανικό. Για παράδειγμα:

- Οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας δεν πραγματοποιούνται ισοθερμοκρασιακά. Αυτό θα απαιτούσε πολύ μεγάλες επιφάνειες και άπειρο χρόνο για την πραγματοποίηση της μεταφοράς. Αυτό προφανώς δεν είναι εφικτό σε μία μηχανή που περιστρέφεται με 3000 σαλ.
- Η αναγέννηση δεν είναι ιδανική. Ένας ιδανικός αναγεννητήρας θα δέσμευε και θα αποδέσμευε ίσες ποσότητες θερμικής ενέργειας, ενώ η θερμοκρασία του θα ήταν κάθε φορά ίση με τη θερμοκρασία του ρευστού. Στην πραγματικότητα, ο αναγεννητήρας παρουσιάζει απώλειες θερμότητας, ενώ και η θερμοκρασία του κατά τη διέλευση του ρευστού βρίσκεται σε κάποια ενδιάμεση τιμή μεταξύ της υψηλότερης και χαμηλότερης θερμοκρασίας του κύκλου.
- Λόγω της κινηματικής των μηχανών και τη χρήση στροφαλοφόρου άξονα για τη σύνδεση των εμβόλων, οι διεργασίες της προθέρμανσης και συμπίεσης, και αυτές της αναγέννησης και εκτόνωσης δεν εκτελούνται διαδοχικά, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του κύκλου, αλλά παρουσιάζουν κάποια χρονική αλληλοεπικάλυψη.

3.4.2. ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON

Ο κύκλος Brayton ανήκει στους κύκλους αερίου, και αποτελεί τον ιδανικό κύκλο προς σύγκριση, για την αξιολόγηση της απόδοσης των αεριοστροβίλων. Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι αεριοστροβίλοι χρησιμοποιούνται κυρίως ως εφεδρικές μονάδες για την κάλυψη της παραγωγής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, ή ως μονάδες αιχμής σε περιόδους υψηλής ζήτησης, λόγω της γρήγορης απόκρισής τους και του σχετικά χαμηλού τους κόστους. Τα διαγράμματα πίεσης-ειδικού όγκου (P-v) και θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) του κύκλου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα^[2]:



Σχήμα 3.4.5: (α) Διάγραμμα P-v ιδανικού κύκλου Brayton, (β) Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Brayton (Πηγή: Y.A. Cengel, M.A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

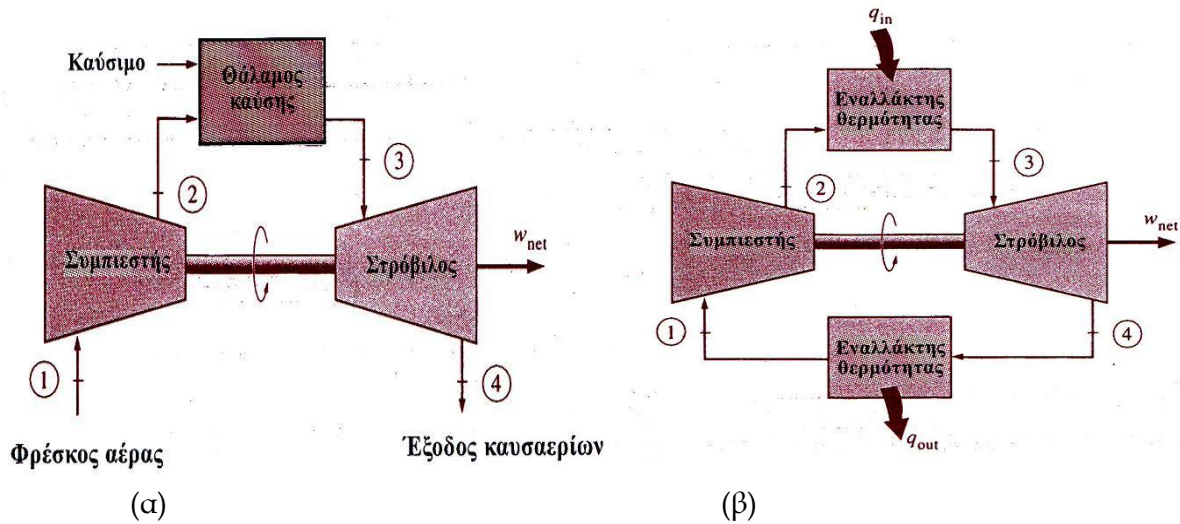
Περιγραφή του κύκλου Brayton

Ο ιδανικός κύκλος Brayton αποτελείται από τις εξής τέσσερις εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες:

- 1-2 Ισεντροπική συμπίεση (Στο συμπιεστή)
- 2-3 Ισοβαρή προσθήκη θερμότητας (Σταθερή πίεση)
- 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (Στο στρόβιλο)
- 4-1 Ισοβαρή απόρριψη θερμότητας (Σταθερή πίεση)

Ο κύκλος Brayton μπορεί να πραγματοποιηθεί σαν ανοιχτός ή κλειστός κύκλος. Στην περίπτωση του ανοιχτού κύκλου, η προσθήκη θερμότητας γίνεται μέσω εξωτερικής καύσης σε θάλαμο καύσης και η απόρριψη θερμότητας γίνεται με την αποβολή των καυσαερίων από το στρόβιλο. Στην περίπτωση του κλειστού κύκλου, η προσθήκη και η αποβολή της θερμότητας γίνονται μέσω εναλλακτών θερμότητας. Ο κλειστός κύκλος Brayton έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται οξυγόνο για την καύση του καυσίμου, επομένως ως ρευστό λειτουργίας του κύκλου

μπορεί να επιλεγεί οποιοδήποτε αέριο διαθέτει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (όπως π.χ. το ήλιο). Οι δύο δυνατές υλοποιήσεις του κύκλου Brayton ως ανοιχτού και κλειστού κύκλου αντίστοιχα, παριστάνονται διαγραμματικά στο επόμενο σχήμα^[2]:



Σχήμα 3.4.6: (α) Ανοιχτός κύκλος Brayton, (β) Κλειστός κύκλος Brayton (Πηγή: Υ.Α. Cengel, Μ.Α.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Brayton

Για το σκοπό της ενεργειακής ανάλυσης του κύκλου, ο όγκος κάθε συσκευής του κύκλου (συμπιεστή, αντλίας, εναλλάκτης θερμότητας) θεωρείται ως όγκος ελέγχου, στον οποίο εισέρχεται και από τον οποίο εξέρχεται μάζα ρευστού με σταθερό ρυθμό. Οι διεργασίες που εκτελούνται στους όγκους αυτούς, όπως παριστάνονται στο σχήμα 3.4.6 θεωρούνται διεργασίες σταθεροποιημένης ροής, που σημαίνει ότι οι ιδιότητες του ρευστού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στις εισόδους και εξόδους των όγκων ελέγχου, παραμένουν αμετάβλητες με το χρόνο. Αμετάβλητες με το χρόνο παραμένουν επίσης οι αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, γεγονός που σημαίνει ότι η ισχύς, και οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας παραμένουν σταθεροί. Επίσης, το ρευστό λειτουργίας θεωρείται ιδανικό αέριο, και ισχύουν για αυτό οι εξισώσεις και παραδοχές που περιγράψαμε στην ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Stirling. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, η εφαρμογή των αρχών διατήρησης μάζας και ενέργειας για κάθε διεργασία δίνει:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m} \quad (\text{kg/s})$$

$$(\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}) + (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (\text{kJ/s})$$

Δηλαδή οι ροές μάζας εντός και εκτός του όγκου ελέγχου είναι ίσες (εφόσον δεν υπάρχει μεταβολή της συνολικής μάζας εντός του όγκου ελέγχου), ενώ ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας του ρευστού [όρος $\dot{m}(h_{out} - h_{in})$] είναι ίσος με τον ρυθμό καθαρής προσθήκης θερμότητας και έργου στο ρευστό.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης ενέργειας σε κάθε διεργασία του κύκλου, παίρνουμε τις παρακάτω σχέσεις:

- 1-2 (Συμπίεση, $\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} = 0$): $\dot{W}_{comp,in} = \dot{m}(h_2 - h_1)$ (3.4.2.1)

- 2-3 (Εναλλάκτης, $\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$): $\dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_3 - h_2) = \dot{m}C_p(T_3 - T_2)$ (3.4.2.2)

- 3-4 (Στρόβιλος, $\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} = 0$): $\dot{W}_{urb,out} = \dot{m}(h_3 - h_4)$ (3.4.2.3)

- 4-1 (Εναλλάκτης, $\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$): $\dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_4 - h_1) = \dot{m}C_p(T_4 - T_1)$ (3.4.2.4)

Οι διεργασίες 1-2 και 3-4 είναι ισεντροπικές και το αέριο ιδανικό, που σημαίνει ότι ισχύει η σχέση:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \stackrel{P_2=P_3}{=} \stackrel{P_1=P_4}{=} \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (3.4.2.5)$$

Ο βαθμός θερμικής απόδοσης του κύκλου Brayton δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{m}C_p(T_4 - T_1)}{\dot{m}C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \Rightarrow$$

$$\boxed{\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}} \quad (3.4.2.6)$$

όπου:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1}: \quad \text{Ο λόγος των πιέσεων στην έξοδο και την είσοδο του συμπεσθή αντίστοιχα.}$$

$$k = \frac{C_p}{C_v}: \quad \text{Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων του αερίου λειτουργίας του κύκλου.}$$

Η πίεση στον κύκλο είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, και η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί στον κύκλο περιορίζεται από τη θερμική αντοχή των περυγίων του στρόβιλου.

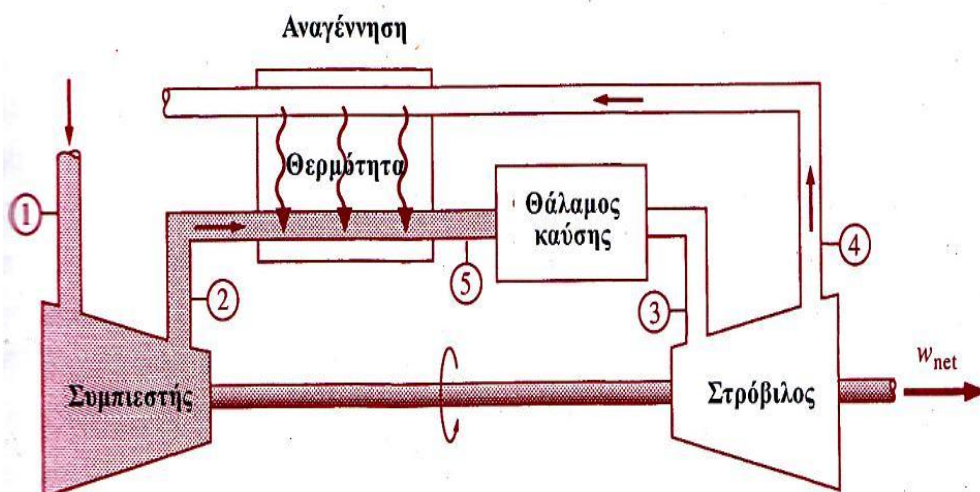
Ρευστά λειτουργίας

Ως κύκλος αερίου, στον κύκλο Brayton μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα ρευστά που αναφέρθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα για τον κύκλο Stirling.

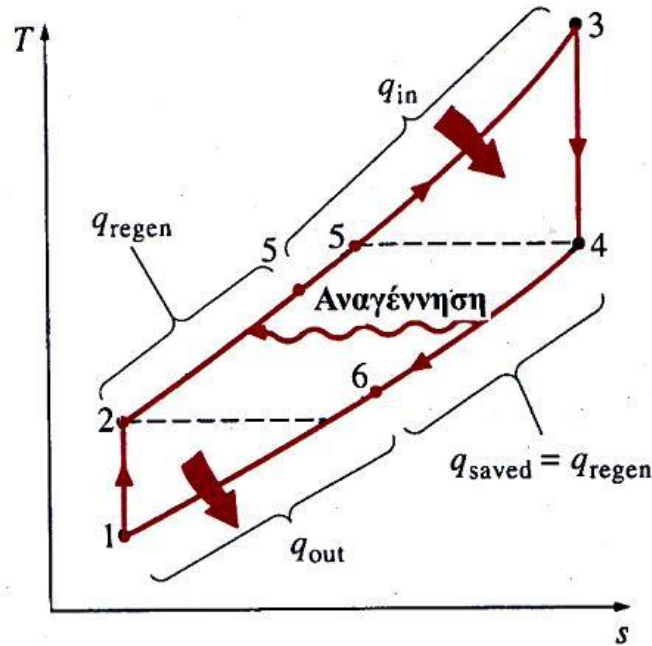
Αύξηση της απόδοσης του ιδανικού κύκλου Brayton

Η απόδοση του απλού κύκλου Brayton μπορεί να αυξηθεί με διάφορους τρόπους, μεταξύ των οποίων και οι παρακάτω:

1. Αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο του στρόβιλου. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ανώτερη θερμοκρασία του κύκλου, και επομένως και η θερμική του απόδοση. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί με χρήση κεραμικών υλικών, ανθεκτικών στις υψηλές θερμοκρασίες, στα περύγια του στρόβιλου, καθώς και τεχνικών ψύξης για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε λειτουργικά επίπεδα.
2. Αύξηση των αποδόσεων των συστατικών στοιχείων της μηχανής. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται ο στρόβιλος και ο συμπιεστής. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί στην ανάπτυξη υπολογιστικών πακέτων για το σχεδιασμό και την προσομοίωση αυτών των μηχανών, έχει επιτρέψει την ελαχιστοποίηση των παραγόντων αναντιστοιχίας, με τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των περυγίων τους. Επίσης, η αποτελεσματική μόνωση για την όσο το δυνατόν αδιαβατική εκτόνωση και συμπίεση του ρευστού λειτουργίας, και την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών, μπορεί επίσης να αυξήσει τη συνολική απόδοση της μηχανής.
3. Επιπρόσθετες τροποποιήσεις στο βασικό κύκλο. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η αναγέννηση (προθέρμανση), καθώς και οι πολυβάθμιοι συμπιεστές και στρόβιλοι με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση μεταξύ των βαθμίδων αντίστοιχα. Παραδείγματα τέτοιων κύκλων, και των αντίστοιχων διατάξεων που τους πραγματοποιούν παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 3.4.7: Μηχανή αεριοστρόβιλου με αναγεννητήρα (προθερμαντήρα) (Πηγή: Y.A. Cengel, M.A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)



Σχήμα 3.4.8: Διάγραμμα T-s κύκλου Brayton με αναγέννηση (προθέρμανση)
(Πηγή: Y.A. Cengel, M.A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

Η θερμική απόδοση του κύκλου Brayton αυξάνεται με την εφαρμογή της προθέρμανσης, εφόσον το μέρος της ενέργειας των καυσαερίων (ή του ρευστού στην έξοδο του στροβίλου, στην περίπτωση του κλειστού κύκλου) που κανονικά απορριπτόταν στο περιβάλλον, χρησιμεύει πλέον για την προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης (ή στον εναλλάκτη προσθήκης θερμότητας στον κλειστό κύκλο). Η προθέρμανση μειώνει τις απαιτήσεις θερμότητας εισόδου (άρα και καυσίμου) για το ίδιο καθαρό έργο εξόδου. Ωστόσο, η προθέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση που η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή. Η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton με προθέρμανση δίνεται από τη σχέση^[2]:

$$\eta_{th,regen} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) \cdot r_p^{(k-1)/k} \quad (3.4.2.7)$$

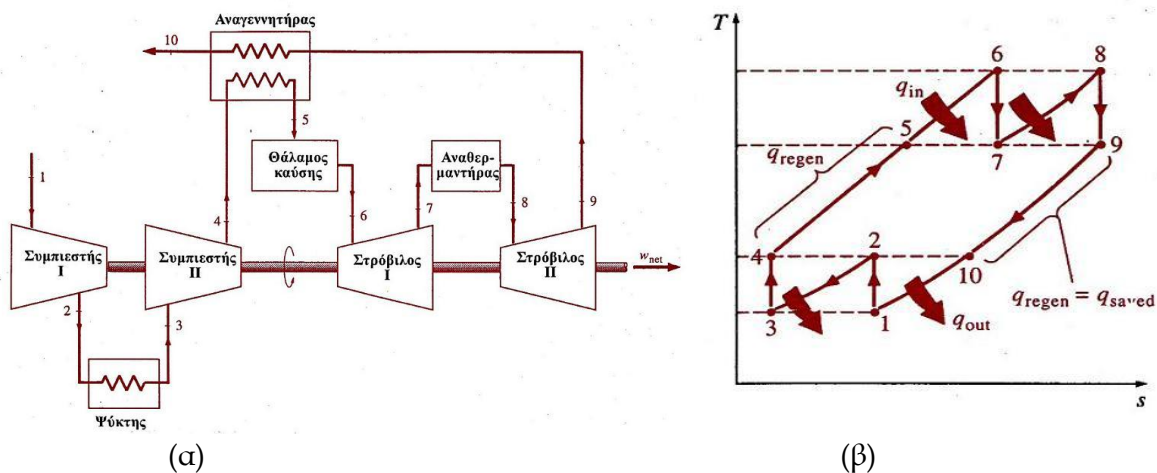
όπου:

T_1, T_3 : Οι θερμοκρασίες στην είσοδο του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα

r_p : Ο λόγος πιέσεων

k : Ο λόγος ειδικών θερμοτήτων του αερίου λειτουργίας

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται μια πολυβάθμια (συγκεκριμένα με δύο βαθμίδες συμπίεσης και εκτόνωσης) διάταξη αεριοστροβίλου, καθώς και το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας που αντιστοιχεί στον κύκλο της.



Σχήμα 3.4.9: (α) Μηχανή αεροστροβίλου με δύο στάδια συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη και δύο βαθμίδες εκτόνωσης, με αναθέρμανση και προθέρμανση, (β) Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου αεροστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη αναθέρμανση και αναγέννηση (Πηγή: Y.A. Cengel, M.A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

Μπορεί να αποδειχθεί^[2] ότι το έργο που απαιτείται για τη συμπίεση ενός αερίου μεταξύ δύο τιμών πίεσης γίνεται ελάχιστο όταν η συμπίεση πραγματοποιείται ισόθερμα. Αντίστοιχα, το έργο που παράγεται από την εκτόνωση του ίδιου αερίου μεγιστοποιείται όταν η εκτόνωση γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει επειδή τόσο το έργο συμπίεσης όσο και αυτό της εκτόνωσης είναι ανάλογα του ειδικού όγκου του ρευστού, ο οποίος είναι ανάλογος της θερμοκρασίας. Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος στους αεροστροβίλους είναι ομοαξονικοί, γεγονός που σημαίνει ότι για την κίνηση του συμπιεστή καταναλώνεται μέρος του παραγόμενου έργου από το στρόβιλο. Ο λόγος του έργου του συμπιεστή προς το έργο του στροβίλου ονομάζεται λόγος επιστροφής έργου, και πρέπει να διατηρείται χαμηλός αφού μειώνει το ωφέλιμο παραγόμενο έργο. Επομένως, η απαιτούμενη ενέργεια για τη συμπίεση του αερίου θα πρέπει να διατηρείται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα, ενώ αντίθετα το έργο εκτόνωσης πρέπει να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή. Άρα, κατά τη συμπίεση η θερμοκρασία θα πρέπει να διατηρείται χαμηλή και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τιμή της θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή, ενώ κατά την εκτόνωση, η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται υψηλή, και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τιμή της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου. Αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με την προσθήκη πολλαπλών βαθμίδων (σταδίων) συμπίεσης και εκτόνωσης, την ψύξη του αερίου μεταξύ των βαθμίδων συμπίεσης, και την αναθέρμανσή του μεταξύ των βαθμίδων εκτόνωσης αντίστοιχα. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση μειώνουν το λόγο επιστροφής έργου, αλλά μειώνουν επίσης και τη θερμική απόδοση του θερμικού κύκλου, αφού η ενδιάμεση ψύξη μειώνει τη μέση θερμοκρασία προσθήκης θερμότητας, ενώ η ενδιάμεση αναθέρμανση αυξάνει τη μέση θερμοκρασία απόρριψής της. Για το λόγο αυτό, στις μονάδες παραγωγής ισχύος με αεροστροβίλο, οι πολυβάθμιες διατάξεις συμπεριλαμβάνουν πάντα σύστημα προθέρμανσης (αναγέννησης) του αερίου.

Αποκλίσεις της λειτουργίας των πραγματικών αεριοστροβίλων από τον ιδανικό κύκλο Brayton

Η συμπεριφορά των πραγματικών αεριοστροβίλων διαφέρει από εκείνη του ιδανικού κύκλου Brayton, λόγω των εστίων αναντιστρεπτότητας που παρουσιάζονται στις πραγματικές μηχανές. Μεταξύ των κυριότερων παραγόντων αναντιστρεπτότητας είναι οι τριβή του ρευστού λειτουργίας, που προκαλεί πτώσεις πίεσης κατά τη διαδρομή του στον κύκλο, και οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, οι διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης (στο στρόβιλο και το συμπιεστή αντίστοιχα) δεν είναι πραγματικά ισεντροπικές. Οι αποκλίσεις των πραγματικών συμπιεστών και στροβίλων από τις αντίστοιχες ιδανικές συσκευές, μπορεί να εκφραστεί μέσω της αδιαβατικής απόδοσης, η οποία ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta_{comp} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (\text{Συμπιεστής}) \quad (3.4.2.8)$$

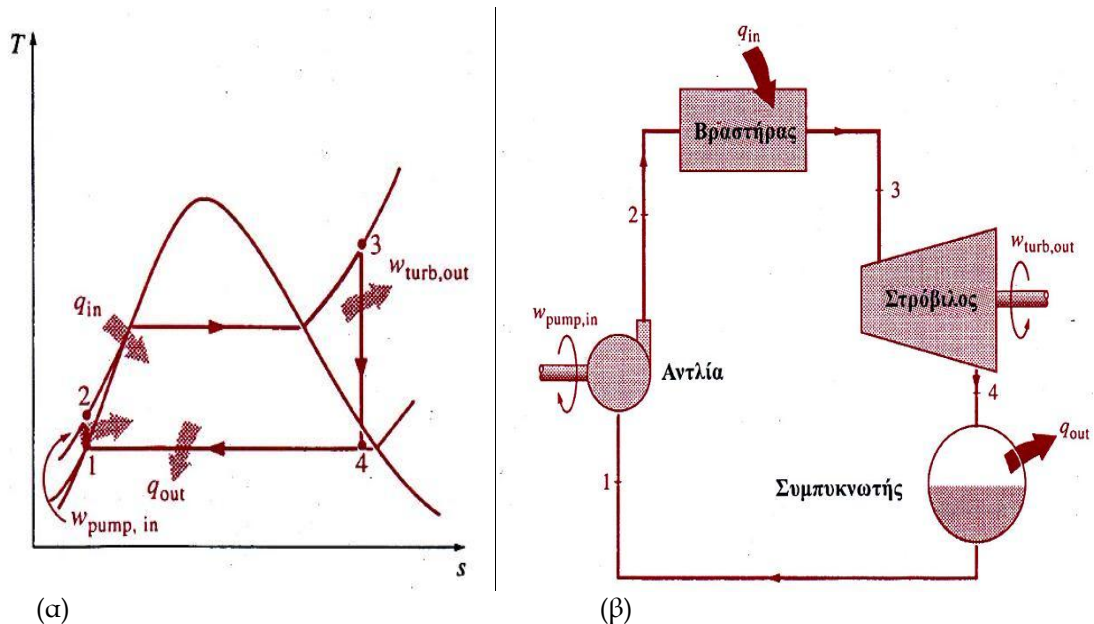
$$\eta_{turb} = \frac{\dot{W}_a}{\dot{W}_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (\text{Στρόβιλος}) \quad (3.4.2.9)$$

όπου:

η_{pump}, η_{turb} : Αδιαβατικές αποδόσεις αντλίας και στροβίλου αντίστοιχα
 \dot{W}_a, \dot{W}_s : Πραγματική ισχύς και ισχύς για ισεντροπική διεργασία αντίστοιχα
 h_i : Ενθαλπία του ρευστού στην κατάσταση i του ιδανικού κύκλου

3.4.3. ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

Ο κύκλος Rankine ανήκει στους κύκλους ατμού, και αποτελεί τον ιδανικό κύκλο προς σύγκριση, για την αξιολόγηση της απόδοσης των ατμοστροβίλων. Το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) του κύκλου, καθώς και η διάταξη που χρησιμοποιείται για την εκτέλεσή του φαίνονται στο παρακάτω σχήμα^[2]:



Σχήμα 3.4.10: (α) Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine, (β) Ατμοστρόβιλος Rankine. (Πηγή: Υ.Α. Cengel, Μ.Α.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

Περιγραφή του κύκλου Rankine

Ο ιδανικός κύκλος Rankine αποτελείται από τις ακόλουθες τέσσερις ολικά αντιστρεπτές διεργασίες:

- 1-2 Ισεντροπική συμπίεση (Στην αντλία)
- 2-3 Ισοβαρή προσθήκη θερμότητας στο βραστήρα (Σταθερή πίεση)
- 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (Στο στρόβιλο)
- 4-1 Ισοβαρή απόρριψη θερμότητας στο συμπυκνωτή (Σταθερή πίεση)

Το ρευστό λειτουργίας εισέρχεται στην αντλία στην κατάσταση 1 με τη μορφή κορεσμένου υγρού και συμπιέζεται ισεντροπικά στην πίεση λειτουργίας του βραστήρα. Η θερμοκρασία του ρευστού, κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, αυξάνεται ελαφρά λόγω της ελαφράς μείωσης του ειδικού του όγκου. Στη συνέχεια, το ρευστό εισέρχεται στο βραστήρα στην κατάσταση του κορεσμένου υγρού, όπου θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση και εξέρχεται ως υπέρθερμος ατμός. Στην κατάσταση 3, μετά την έξοδο από το βραστήρα, το ρευστό εισέρχεται στο στρόβιλο, όπου εκτονώνεται ισεντροπικά και παράγει έργο. Κατά τη διεργασία αυτή, η πίεση και η θερμοκρασία των ατμών του ρευστού μειώνονται στις τιμές της κατάστασης 4, στην οποία οι ατμοί εισέρχονται στο συμπυκνωτή. Στην κατάσταση αυτή, το ρευστό βρίσκεται συνήθως στην κατάσταση μίγματος κορεσμένου υγρού-ατμού,

με υψηλή ποιότητα. Το μίγμα συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή, υπό σταθερή πίεση, απορρίπτοντας θερμότητα σε ένα ψυκτικό μέσο, μέχρι την κατάσταση 1 του κορεσμένου υγρού και την ολοκλήρωση του κύκλου.

Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου Rankine

Για το σκοπό της ενεργειακής ανάλυσης του κύκλου, ο όγκος κάθε συσκευής του κύκλου (αντλίας, βραστήρα, στρόβιλου και συμπυκνωτή) θεωρείται ως όγκος ελέγχου, στον οποίο εισέρχεται και από τον οποίο εξέρχεται μάζα ρευστού με σταθερό ρυθμό. Οι διεργασίες που εκτελούνται στους όγκους αυτούς, όπως παριστάνονται στο σχήμα 3.4.10 θεωρούνται διεργασίες σταθεροποιημένης ροής, που σημαίνει ότι οι ιδιότητες του ρευστού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στις εισόδους και εξόδους των όγκων ελέγχου, παραμένουν αμετάβλητες με το χρόνο. Αμετάβλητες με το χρόνο παραμένουν επίσης οι αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, γεγονός που σημαίνει ότι η ισχύς, και οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας παραμένουν σταθεροί. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, η εφαρμογή των αρχών διατήρησης μάζας και ενέργειας για κάθε διεργασία δίνει:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m} \quad (\text{kg/s})$$

$$(\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}) + (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (\text{kJ/s})$$

Δηλαδή οι ροές μάζας εντός και εκτός του όγκου ελέγχου είναι ίσες (εφόσον δεν υπάρχει μεταβολή της συνολικής μάζας εντός του όγκου ελέγχου), ενώ ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας του ρευστού [όρος $\dot{m}(h_{out} - h_{in})$] είναι ίσος με τον ρυθμό καθαρής προσθήκης θερμότητας και έργου στο ρευστό.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης ενέργειας σε κάθε διεργασία του κύκλου, παίρνουμε τις παρακάτω σχέσεις:

- 1-2 (Αντλία, $\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} = 0$): $\dot{W}_{pump,in} = \dot{m}(h_2 - h_1)$ (3.4.3.1)

- 2-3 (Βραστήρας, $\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$): $\dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_3 - h_2)$ (3.4.3.2)

- 3-4 (Στρόβιλος, $\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} = 0$): $\dot{W}_{turb,out} = \dot{m}(h_3 - h_4)$ (3.4.3.3)

- 4-1 (Συμπυκνωτής, $\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$): $\dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_4 - h_1)$ (3.4.3.4)

Ο βαθμός θερμικής απόδοσης του κύκλου Rankine δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{\dot{m}(h_4 - h_1)}{\dot{m}(h_3 - h_2)}} \quad (3.4.3.5)$$

Ρευστά λειτουργίας

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ρευστό λειτουργίας στους ατμοστροβίλους είναι το νερό, ωστόσο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ένα πλήθος ρευστών λειτουργίας για την εκτέλεση του κύκλου Rankine. Η επιλογή του ρευστού λειτουργίας καθορίζεται κυρίως από τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Εκτός του νερού χρησιμοποιούνται υγρά μέταλλα (όπως π.χ. ο υδράργυρος) σε κύκλους υψηλών θερμοκρασιών, ή οργανικά ρευστά (ο κύκλος σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται οργανικός) υψηλού μοριακού βάρους και χαμηλού σημείου ζέσεως που μπορούν να αξιοποιήσουν πηγές θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως είναι η γεωθερμία, η βιομάζα και η απορριφθείσα θερμότητα κύκλων υψηλότερων θερμοκρασιών. Σε κάθε περίπτωση, τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός ιδανικού ρευστού λειτουργίας είναι^{[1],[2]}:

- *Υψηλή τιμή κρίσιμης θερμοκρασίας και ασφαλή μέγιστη πίεση*, ώστε η ισόθερμη μεταφορά θερμότητας να γίνεται σε όσο το δυνατόν υψηλότερη θερμοκρασία, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα στην αντοχή των υλικών.
- *Χαμηλή θερμοκρασία τριπλού σημείου*. Μια θερμοκρασία τριπλού σημείου κατώτερη της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου αποτρέπει πιθανά προβλήματα στερεοποίησης.
- *Ασφαλή πίεση κορεσμού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος*. Πίεση κορεσμού πολύ μικρότερη της ατμοσφαιρικής δημιουργεί προβλήματα διαρροής αέρα στο συμπυκνωτή.
- *Υψηλή ευθαλία εξάτμισης και υψηλό μοριακό*, ώστε η μεταφορά θερμότητας να γίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο ισόθερμα και να μην απαιτούνται μεγάλες τιμές μαζικής παροχής και υπερβολικές ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου ή μεγάλος αριθμός βαθμίδων εκτόνωσης.
- *Καμπύλη κορεσμού που να μοιάζει με αντεστραμμένο U*. Μια τέτοια καμπύλη αποτρέπει το σχηματισμό υπερβολικής υγρασίας στο στρόβιλο κατά την ισεντροπική εκτόνωση, αφού το τελικό σημείο της εκτόνωσης βρίσκεται πολύ κοντά στην καμπύλη κορεσμένου ατμού.
- *Υψηλή θερμική αγωγιμότητα και μικρή θερμοχωρητικότητα στην υγρή φάση*.
- *Υγρό σε ατμοσφαιρικές συνθήκες*, για ευκολία αποθήκευσης και μεταφοράς.
- *Χαμηλή τιμή, χημική σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή ευφλεκτότητα, χημική αδράνεια, χαμηλή τοξικότητα*.

Αύξηση της απόδοσης του ιδανικού κύκλου Rankine

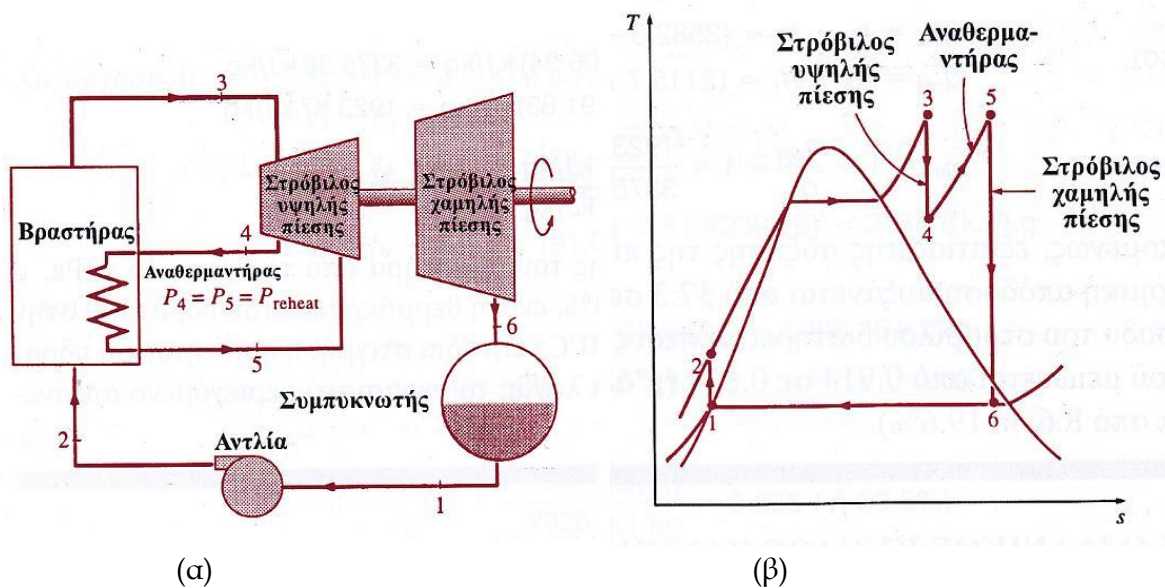
Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη δυνατή απόδοση, βάσει του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου, που μπορεί να επιτευχθεί από οποιαδήποτε αντιστρεπτή θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ δύο θερμοκρασιών δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{th,max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

όπου T_L , T_H οι θερμοκρασίες απόρριψης και προσθήκης θερμότητας στη μηχανή αντίστοιχα. Επομένως, οποιαδήποτε προσπάθεια αύξησης της απόδοσης της μηχανής πρέπει να στοχεύει στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας προσθήκης θερμότητας, και στη μείωση της μέσης θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας.

Στον ιδανικό κύκλο Rankine, η απόδοση της μηχανής μπορεί να αυξηθεί με τους εξής τρόπους:

1. Με μείωση της πίεσης λειτουργίας του συμπυκνωτή: Το ρευστό στο συμπυκνωτή (διεργασία 4-1 στο διάγραμμα, κατά την οποία απορρίπτεται θερμότητα) βρίσκεται στην κατάσταση του κορεσμένου μίγματος. Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία του είναι η θερμοκρασία κορεσμού του ρευστού στη συγκεκριμένη πίεση. Ελάττωση της πίεσης συμπύκνωσης επομένως, οδηγεί σε απευθείας μείωση της θερμοκρασίας στην αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η επιτρεπόμενη μείωση της θερμοκρασίας, ωστόσο, παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς. Η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας θα πρέπει να είναι αρκούντως υψηλή, ώστε να επιτρέπει την αποδοτική μεταφορά θερμότητας μεταξύ συμπυκνωτή και ψυχοδοχείου, και επίσης τέτοια ώστε να μη σχηματίζονται επικίνδυνα υψηλά ποσοστά υγρασίας στο στρόβιλο.
2. Με υπερθέρμανση του ατμού στο βραστήρα: Αυτό επιτυγχάνεται με επιπλέον θέρμανση του ατμού στο βραστήρα (διεργασία 2-3 στο διάγραμμα, κατά την οποία προστίθεται θερμότητα), χωρίς ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης. Το καθαρό έργο του κύκλου αυξάνεται, όπως επίσης και η απαιτούμενη θερμότητα, ωστόσο η θερμική απόδοση του κύκλου αυξάνεται λόγω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας προσθήκης θερμότητας. Επιπλέον, μειώνεται το υγρασιακό περιεχόμενο των ατμών στην έξοδο του στροβίλου, λόγω της μετατόπισης της διεργασίας 3-4 προς τα δεξιά, και επομένως σε κορεσμένα μίγματα υψηλότερης ποιότητας. Ωστόσο, η μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης περιορίζεται από παράγοντες όπως η θερμική αντοχή των υλικών του στροβίλου.
3. Με αύξηση της πίεσης λειτουργίας του βραστήρα: Το ρευστό σε ένα μεγάλο μέρος της διεργασίας βρασμού βρίσκεται στην κατάσταση του κορεσμένου μίγματος. Συνεπώς, η αύξηση της πίεσης λειτουργίας του βραστήρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση και της θερμοκρασίας στην αντίστοιχη τιμή κορεσμού της υψηλότερης πίεσης. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απόδοση του κύκλου, εφόσον αυξάνεται η μέση θερμοκρασία προσθήκης θερμότητας του κύκλου. Ταυτόχρονα ωστόσο, μειώνεται και το ποσοστό υγρασίας στην έξοδο του στροβίλου, λόγω της μετατόπισης της διεργασίας 3-4 προς τα αριστερά, κάτι που έχει ανεπιθύμητες παρενέργειες.
4. Με τροποποιήσεις στο βασικό κύκλο Rankine: Όπως και στον κύκλο αερίου Brayton, έτσι και στον κύκλο Rankine μπορούν να γίνουν τροποποιήσεις στο βασικό κύκλο, με ενδιάμεσες διεργασίες προσθήκης θερμότητας ή την εισαγωγή επιπλέον βαθμίδων εκτόνωσης του ατμού, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής απόδοσης του κύκλου. Στη συνέχεια, εξετάζονται δύο τέτοιες τροποποιήσεις:
 - i. Αναθέρμανση: Στην περίπτωση αυτή, η εκτόνωση του ατμού γίνεται σε δύο ή περισσότερα στάδια, με ενδιάμεση αναθέρμανσή του μεταξύ των σταδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας στο βραστήρα, χωρίς την εμφάνιση ανεπιθύμητης υγρασίας στους στροβίλους, λόγω της ενδιάμεσης αναθέρμανσης και επανεκτόνωσης του ατμού. Μία τέτοια διάταξη με δύο βαθμίδες εκτόνωσης και το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας του κύκλου της φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.4.11: (α) Ατμοστρόβιλος με δύο βαθμίδες εκτόνωσης και αναθέρμανση, (β) Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση (Πηγή: Υ.Α. Cengel, Μ.Α.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 2003)

ii. Αναγέννηση (Προθέρμανση): Η αναγέννηση, η προθέρμανση δηλαδή του ρευστού λειτουργίας, πριν αυτό οδηγηθεί στο βραστήρα, στους ατμοστροβίλους επιτυγχάνεται αφαιρώντας ατμό από το στρόβιλο σε διαφορετικά σημεία και πιέσεις εκτόνωσης. Η θερμότητα του ατμού μεταφέρεται στο ρευστό τροφοδοσίας (αφού αυτό έχει συμπιεστεί στην αντλία, και πριν εισέλθει στο βραστήρα), το οποίο και προθερμαίνει. Στην περίπτωση που το ρευστό λειτουργίας είναι το νερό, η μεταφορά θερμότητας γίνεται σε συσκευές που ονομάζονται Θερμαντήρες Νερού Τροφοδοσίας (ΘΝΤ), οι οποίοι μπορούν να είναι ανοιχτοί ή κλειστοί, η μεταφορά θερμότητας δηλαδή να γίνεται άμεσα, σε θάλαμο ανάμιξης, ή έμμεσα μέσω εναλλακτών. Στην περίπτωση που το ρευστό λειτουργίας διαφέρει από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, η ανταλλαγή θερμότητας γίνεται μέσω εναλλακτών. Η αναγέννηση αυξάνει το βαθμό απόδοσης των ατμοστροβίλων, καθώς η μεταφορά θερμότητας στο ρευστό γίνεται σε υψηλότερη μέση θερμοκρασία.

Αποκλίσεις της λειτουργίας των πραγματικών ατμοστροβίλων από τον ιδανικό κύκλο Rankine

Η συμπεριφορά των πραγματικών κύκλων παραγωγής ισχύος με ατμό διαφέρει από εκείνη του ιδανικού κύκλου Rankine, λόγω των εσίων αναντιστρεπτότητας που παρουσιάζονται στις πραγματικές μηχανές. Μεταξύ των κυριότερων παραγόντων αναντιστρεπτότητας είναι οι τριβή του ρευστού λειτουργίας, που προκαλεί πτώσεις πίεσης κατά τη διαδρομή του στον κύκλο, και οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, οι διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης (στο στρόβιλο και στην αντλία αντίστοιχα) δεν είναι πραγματικά ισηντροπικές. Οι αποκλίσεις των πραγματικών αντλιών και στροβίλων από τις αντίστοιχες ιδανικές συσκευές, μπορεί να εκφραστεί μέσω της αδιαβατικής απόδοσης, η οποία ορίζεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (\text{Αντλία}) \quad (3.4.3.6)$$

$$\eta_{turb} = \frac{\dot{W}_a}{\dot{W}_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (\text{Στρόβιλος}) \quad (3.4.3.7)$$

όπου:

η_{pump}, η_{turb} :	Αδιαβατικές αποδόσεις αντλίας και στροβίλου αντίστοιχα
\dot{W}_a, \dot{W}_s :	Πραγματική ισχύς και ισχύς για ισεντροπική διεργασία αντίστοιχα
h_i :	Ενθαλπία του ρευστού στην κατάσταση i του ιδανικού κύκλου
h_{ia} :	Ενθαλπία του ρευστού στην κατάσταση i του πραγματικού κύκλου

3.4.4. ΑΛΛΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

Στην παραγωγή ισχύος και ηλεκτρικής ενέργειας, συχνά χρησιμοποιούνται κύκλοι ισχύος οι οποίοι αποτελούν συνδυασμό δύο από τους προαναφερθέντες κύκλους ισχύος. Αυτό γίνεται για την επίτευξη υψηλότερων συνολικά θερμοκρασιών κατά τον κύκλο, με τη χρησιμοποίηση ρευστών λειτουργίας κατάλληλων για το κάθε εύρος θερμοκρασιών, καθώς και για την αξιοποίηση της απορριφθείσας θερμότητας από ένα κύκλο υψηλής μέγιστης θερμοκρασίας, σε έναν άλλο κύκλο χαμηλότερης. Ανάλογα με τη φάση του ρευστού λειτουργίας κατά τον κύκλο, οι συνδυαστικές αυτές διατάξεις χωρίζονται σε:

- Διαδικούς ή διπλούς κύκλους
Πρόκειται για συνδυασμό δύο κύκλων ατμού, ενός κύκλου υψηλών θερμοκρασιών, και ενός κύκλου χαμηλών θερμοκρασιών. Στην περίπτωση αυτή, ο συμπυκνωτής του κύκλου υψηλών θερμοκρασιών λειτουργεί ως βραστήρας για τον κύκλο χαμηλών θερμοκρασιών, δηλαδή η θερμότητα που εκλύεται από τον πρώτο χρησιμοποιείται στην είσοδο του δεύτερου. Τυπικά, ο κύκλος χαμηλών θερμοκρασιών είναι κύκλος υδρατμού, ενώ κατάλληλα ρευστά λειτουργίας για τον κύκλο υψηλών θερμοκρασιών είναι ο υδράργυρος, το νάτριο, το κάλιο, και τα μίγματα νατρίου-καλίου.
- Συνδυασμένους ή σύνθετους κύκλους
Στην περίπτωση αυτή συνδυάζεται ο κύκλος αερίου Brayton για την περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών με ένα κύκλο ατμού Rankine για την περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών. Η απορριφθείσα θερμότητα των καυσαερίων (ή του εναλλάκτη, στην περίπτωση του κλειστού κύκλου Brayton) του αεριοστροβίλου αξιοποιείται ως πηγή θερμότητας για το βραστήρα του χαμηλότερου κύκλου Rankine.

3.5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν οι διατάξεις που έχουν βρει μέχρι σήμερα εφαρμογή στην εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μεταφορά θερμότητας στις θερμικές μηχανές των ηλιοθερμικών μονάδων. Οι τρεις διατάξεις με την εντονότερη έρευνα και τη μεγαλύτερη εφαρμογή είναι οι συλλέκτες παραβολικής σκάφης, οι ηλιακοί πύργοι ισχύος και οι δίσκοι Stirling. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε συστήματα σημειακής και γραμμικής εστίασης ανάλογα με τη γεωμετρία των κατόπτρων και του δέκτη τους. Τα συστήματα σημειακής εστίασης μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη απόδοση, λόγω του αυξημένου λόγου συγκέντρωσης και των υψηλότερων θερμοκρασιών που μπορούν να επιτύχουν^[3].

Η παρουσίαση κάθε διάταξης θα ξεκινήσει με μία επισκόπηση της αρχής λειτουργίας της και της γενικής της διαμόρφωσης. Στη συνέχεια, η ανάλυση θα εστιάσει στα επιμέρους στοιχεία της διάταξης (δηλαδή τα κάτοπτρα και τους δέκτες που χρησιμοποιούν), τη γεωμετρία τους και τις θερμικές και οπτικές τους ιδιότητες, καθώς και τις μεταξύ τους ενεργειακές αλληλεπιδράσεις και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα σε αυτά ώστε να εξαχθούν σχέσεις για την οπτική απόδοση και την απόδοση του δέκτη κάθε διάταξης.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται ενδιάμεσο ρευστό για τη μεταφορά θερμότητας από το δέκτη στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου ισχύος, θα γίνει αναφορά στον τύπο του.

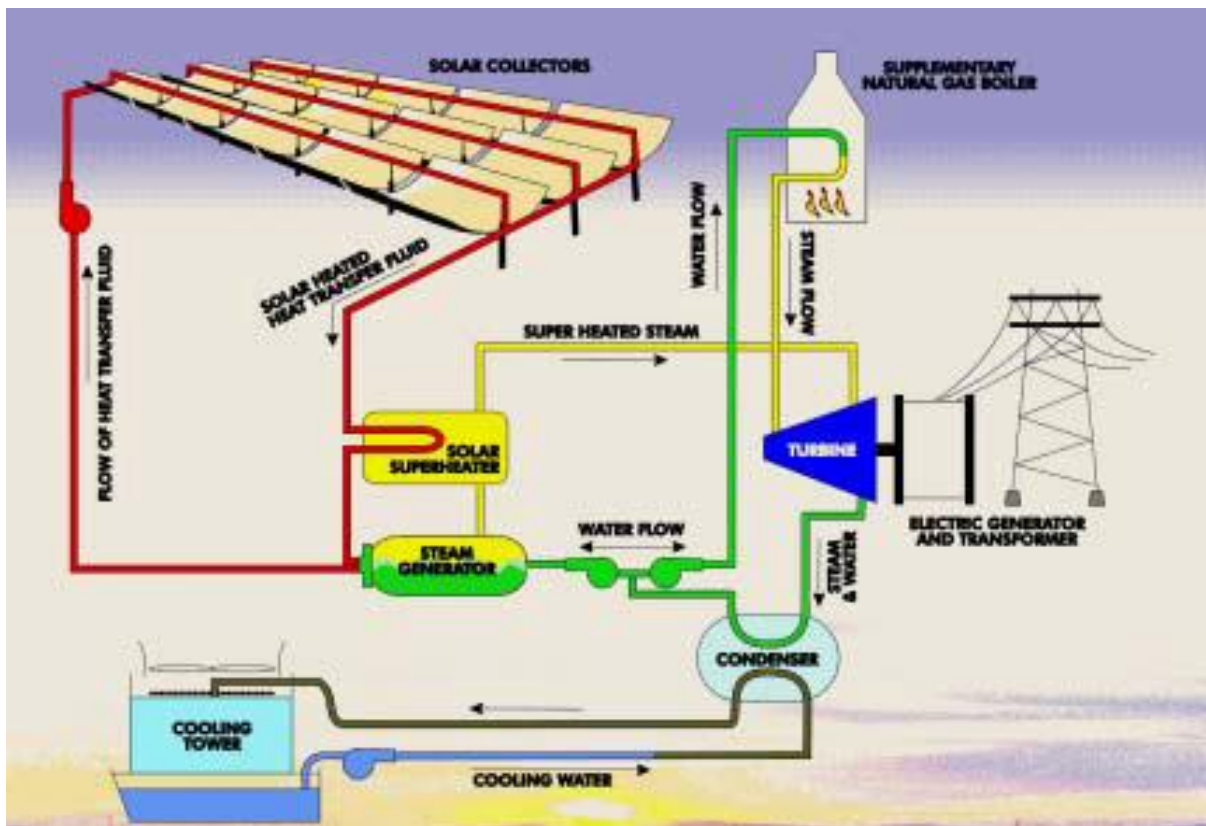
Τέλος, θα γίνει αναφορά στους τομείς που εστιάζει η έρευνα, και θα δοθούν πίνακες με τις εγκατεστημένες ηλιοθερμικές μονάδες που αξιοποιούν κάθε τύπο διάταξης σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς και εκείνων που είναι υπό κατασκευή ή μελέτη.

3.5.1. ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΣΚΑΦΗΣ (PARABOLIC TROUGH COLLECTORS - PTCs)

Οι συλλέκτες παραβολικής σκάφης είναι η ευρύτερα διαδεδομένη διάταξη συλλογής και εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις ηλιοθερμικές μονάδες. Όπως προκύπτει από επεξεργασία των στοιχείων του Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών^[5] του αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας, από τα περίπου 2,02GW παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ηλιοθερμικών μονάδων, τα 1,95GW παράγονται αξιοποιώντας πεδία συλλεκτών παραβολικής σκάφης, ενώ μονάδες επιπλέον ισχύος 2,175GW βρίσκονται υπό κατασκευή ή στο στάδιο της ανάπτυξης μετά την υπογραφή της σύμβασης, και αναμένεται να μπουν σε λειτουργία έως και το 2014. Επιπλέον, η μεγαλύτερη ηλιοθερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο ανήκει στην κατηγορία αυτή, η μονάδα SEGS στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, η οποία αποτελεί συνδυασμό 9 εγκαταστάσεων με συνολική ισχύ 354MW.

Περιγραφή - Αρχή Λειτουργίας Συστήματος

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της δομής ενός συστήματος PTC φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών ηλιοθερμικής εγκατάστασης με συλλέκτες παραβολικής σκάφης (Πηγή: Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts^[6], Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών του αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας)

Όπως φαίνεται στο σχήμα, ρευστό μεταφοράς θερμότητας (κάποιο κατάλληλο θερμικό έλαιο) αντλείται στο πεδίο των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών (solar collectors) μέσα σε μεταλλικούς αγωγούς, οι οποίοι θερμαίνονται μέσω της εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους, και μεταφέρουν τη θερμότητα στο ρευστό, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Όταν το θερμικό έλαιο έχει αποκτήσει την κατάλληλη θερμοκρασία, μετά τη διαδρομή του μέσα από το πεδίο συλλεκτών, προωθείται στη διάταξη παραγωγής ατμού (steam generator στο σχήμα), όπου και θερμαίνει το ρευστό λειτουργίας (νερό), μέσω εναλλάκτη θερμότητας, για την παραγωγή ατμού. Στη συνέχεια, το ρευστό λειτουργίας προωθείται στο υποσύστημα παραγωγής ισχύος, όπου και εκτελείται ο κύκλος ισχύος στη θερμική μηχανή (στρόβιλος στο σχήμα) και επανέρχεται στη διάταξη παραγωγής ατμού για την εκ νέου πρόσληψη θερμότητας από το πεδίο συλλεκτών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές δυνατότητες σε ότι αφορά στην ένταξη ενός πεδίου συλλεκτών παραβολικής σκάφης σε ένα σύστημα παραγωγής ισχύος. Ανάλογα με την έκταση του πεδίου, και την τιμή της θερμοκρασίας που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτό, οι συλλέκτες μπορούν να προσφέρουν την απαιτούμενη θερμότητα στο στάδιο της προθέρμανσης του ρευστού λειτουργίας ή για την υπερθέρμανση του ατμού. Οι συλλέκτες στο πεδίο διατάσσονται σειριακά ώστε να σχηματίζουν κλειστούς βρόχους, στους οποίους η είσοδος είναι ρευστό μεταφοράς (ή ρευστό λειτουργίας) σε χαμηλή θερμοκρασία και η έξοδος είναι ρευστό στην απαιτούμενη θερμοκρασία του

κύκλου. Η θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί στο πεδίο επομένως εξαρτάται από τον αριθμό των συλλεκτών στο βρόχο (όπου κάθε συλλέκτης προσδίδει ενέργεια στο ρευστό με σταθερό ρυθμό) και από την ταχύτητα (ή οποία εξαρτάται από τη μαζική παροχή) του ρευστού στους αγωγούς-δέκτες των συλλεκτών.

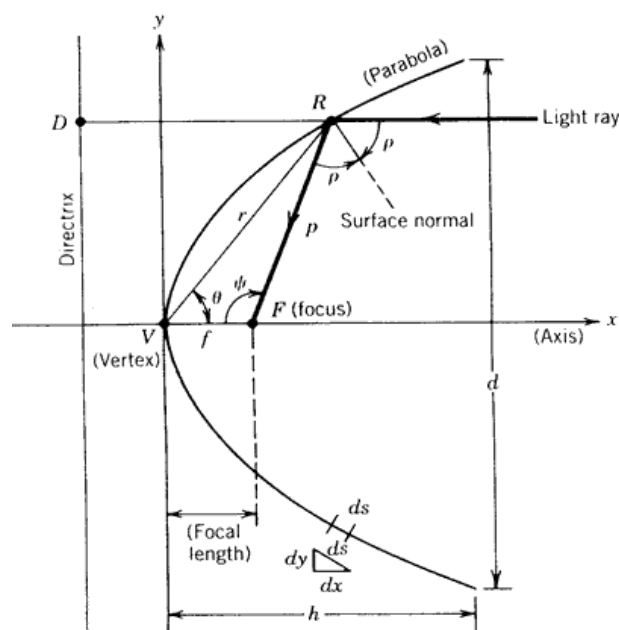
Κάτοπτρα-Δέκτες

Στα συστήματα παραβολικής σκάφης, τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται για την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι, εύλογα, παραβολικής μορφής, ενώ ο δέκτης είναι κυλινδρικός μεταλλικός αγωγός με επικάλυψη υάλου για την ελάττωση των θερμικών απωλειών. Τα κάτοπτρα κάθε συλλέκτη αποτελούνται από πολλά ξεχωριστά πάνελ ανάκλασης, παραβολικής μορφής, τα οποία προσαρμόζονται σε επιφάνεια στήριξης, σχηματίζοντας τμήμα παραβολικού κυλίνδρου με τις επιθυμητές διαστάσεις. Τα άκρα της διάταξης των συλλεκτών στηρίζονται σε πυλώνες, οι οποίοι στεγάζουν και τα συστήματα κίνησης των συλλεκτών, ενώ οι σωληνώσεις που συνδέουν τους αγωγούς-δέκτες των συλλεκτών στους βρόχους είναι εύκαμπτες προκειμένου να επιτρέπουν την ανεξάρτητη κίνηση των συλλεκτών. Η παρακολούθηση της ηλιακής κίνησης γίνεται με περιστροφική κίνηση των συλλεκτών γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ο οποίος τοποθετείται παράλληλα με τον άξονα Βορρά-Νότου, προκειμένου να αξιοποιείται μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση εμπορικά διαθέσιμων συλλεκτών, θα γίνει μια εισαγωγή στην παραβολική γεωμετρία, και τα οπτικά χαρακτηριστικά των πραγματικών συλλεκτών, προκειμένου να γίνει αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο τα κάτοπτρα αυτά επιτυγχάνουν την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας στον αγωγό-δέκτη.

Στοιχεία παραβολικής γεωμετρίας

Παραβολή είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ισαπέχουν από μία καθορισμένη ευθεία και ένα καθορισμένο σημείο στο χώρο, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.2: Παραβολή (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Η ευθεία ονομάζεται *διευθύνουσα*, και το σημείο ονομάζεται *εστία* της παραβολής. Για κάθε σημείο R της παραβολής, ισχύει ότι $(RF)=(RD)$, τα μήκη, δηλαδή, των ευθυγράμμων τμημάτων μεταξύ οποιουδήποτε σημείου της παραβολής και της εστίας και της διευθύνουσας είναι μεταξύ τους ίσα. Η κάθετος στη διευθύνουσα που περνάει από την εστία F, ονομάζεται *άξονας* της παραβολής. Το σημείο τομής της παραβολής και του άξονά της ονομάζεται *κορυφή* (σημείο V στο σχήμα). Η απόσταση μεταξύ κορυφής και εστίας ονομάζεται *εστιακό μήκος* f .

Η **εξίσωση της παραβολής σε καρτεσιανές συντεταγμένες**, δίνεται από τη σχέση:

$$y^2 = 4fx \quad (3.5.1.1)$$

όταν η αρχή του ΣΣ βρίσκεται στην κορυφή V της παραβολής και ο άξονας x συμπίπτει με τον άξονά της, ή από τη σχέση:

$$y^2 = 4f(x + f) \quad (3.5.1.2)$$

όταν η αρχή του ΣΣ βρίσκεται στην εστία F της παραβολής.

Η **εξίσωση της παραβολής σε πολικές συντεταγμένες**, με την αρχή του ΣΣ στην κορυφή της παραβολής, γίνεται:

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} = \frac{4f}{r} \quad (3.5.1.3)$$

όπου r η απόσταση μεταξύ κορυφής και σημείου της παραβολής (ευθεία VR στο σχήμα), και θ η γωνία που σχηματίζει η ευθεία VR με τον άξονα της παραβολής.

Συνήθως, είναι πιο χρήσιμο η εξίσωση της παραβολής να εκφράζεται σε πολικές συντεταγμένες, με την αρχή του ΣΣ στην εστία F της παραβολής. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση (3.5.1.3) γίνεται:

$$p = \frac{2f}{1 + \cos \psi} \quad (3.5.1.4)$$

όπου p η απόσταση μεταξύ εστίας και σημείου της παραβολής (ευθεία FR στο σχήμα) και ψ η γωνία που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει την κορυφή με την εστία της παραβολής, με εκείνο μεταξύ εστίας και σημείου της παραβολής (γωνία μεταξύ ευθυγράμμων τμημάτων VF και FR στο σχήμα).

Η παραβολή έχει καθιερωθεί ως η γεωμετρική μορφή των κατόπτρων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, διότι διαθέτει την ιδιότητα ότι, για οποιαδήποτε ευθεία παράλληλη στον άξονα της, η γωνία ρ μεταξύ αυτής και της καθέτου της παραβολής στο σημείο R είναι ίση με τη γωνία μεταξύ της καθέτου και του ευθύγραμμου τμήματος RF. Επίσης, είναι γνωστό ότι η γωνία πρόσπτωσης και η γωνία ανάκλασης της ακτινοβολίας είναι ίσες μεταξύ τους. Επομένως, ακτινοβολία παράλληλη στον άξονα της παραβολής, ανακλάται και εστιάζεται στην εστία της παραβολής, σε οποιοδήποτε σημείο της και αν προσπίπτει. Από το Σχήμα 3.5.2 επίσης προκύπτει ότι:

$$\psi = 2\rho$$

Οι διαστάσεις των παραβολικών κατόπτρων που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις CSP μπορούν να ορισθούν μέσω της γωνίας χείλους ψ_{rim} , του εστιακού μήκους f , και της διαμέτρου d της διατομής ανοίγματος (aperture) των κατόπτρων.

Γωνία χείλους ψ_{rim} είναι η γωνία μεταξύ των ευθυγράμμων τμημάτων VF και FR, όταν το σημείο R είναι ακραίο σημείο της παραβολής (βλ. Σχήμα 3.5.2), και βρίσκεται από τις σχέσεις^[1]:

$$\tan \psi_{rim} = \frac{1}{\frac{d}{8h} - \frac{d}{d}} \quad (3.5.1.5)$$

$$\tan \psi_{rim} = \frac{\frac{f}{d}}{2\left(\frac{f}{d}\right)^2 - \frac{1}{8}} \quad (3.5.1.6)$$

Εστιακό μήκος f είναι το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος μεταξύ κορυφής και εστίας της παραβολής (ευθύγραμμο τμήμα VF στο Σχήμα 3.5.2).

Διάμετρος d είναι η απόσταση μεταξύ δύο ακραίων σημείων της παραβολής, αντιδιαμετρικών ως προς τον άξονά της.

Το εστιακό μήκος και η διάμετρος της παραβολής μπορούν να συσχετισθούν με τη γωνία χείλους μέσω των σχέσεων^[1]:

$$\frac{f}{d} = \frac{1 + \cos \psi_{rim}}{4 \sin \psi_{rim}} \quad (3.5.1.7)$$

$$\frac{f}{d} = \frac{1}{4 \tan(\psi_{rim} / 2)}$$

Ύψος h της παραβολής είναι η απόσταση μεταξύ της καθέτου στον άξονα της παραβολής που περνάει από την κορυφή V και του ακραίου σημείου της παραβολής, και δίνεται από τη σχέση:

$$h = \frac{d^2}{16f} \quad (3.5.1.8)$$

Τέλος, το **μήκος τόξου s** της παραβολής δίνεται από τη σχέση^[1]:

$$s = \left[\frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] + 2f \ln \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] \quad (3.5.1.9)$$

Τα κάτοπτρα στις μονάδες παραβολικής σκάφης έχουν τη μορφή παραβολικού κυλίνδρου, με τον αγωγό-δέκτη κατά μήκος της γραμμής εστίασης. Ο **παραβολικός κύλινδρος** προκύπτει με μεταφορά της επίπεδης παραβολής σε άξονα κάθετο στο επίπεδό της. Η ανηγμένη επιφάνεια για έναν κύλινδρο μήκους l , είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και δίνεται από τη σχέση:

$$A_a = l \cdot d \quad (3.5.1.10)$$

όπου d η διάμετρος της παραβολής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.2.

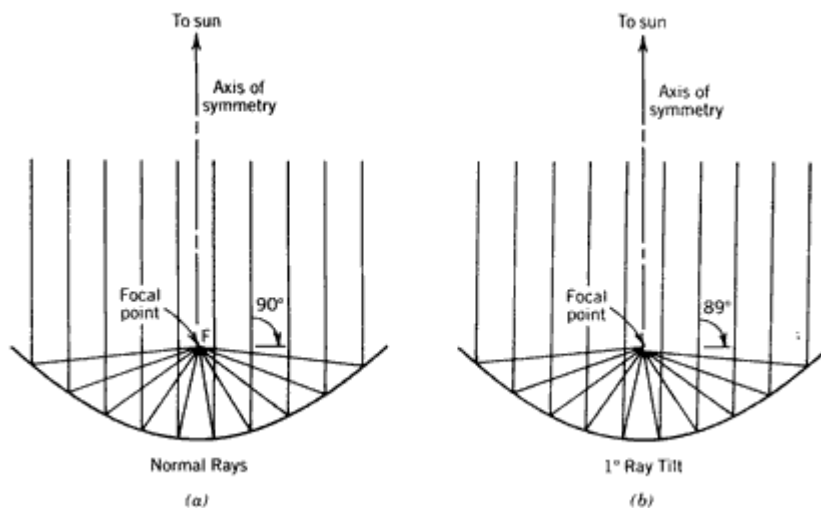
Αντίστοιχα, η ανακλαστική (συνολική) επιφάνεια του παραβολικού κυλίνδρου δίνεται από τη σχέση:

$$A_s = l \cdot s \quad (3.5.1.11)$$

όπου s το μήκος τόξου της παραβολής, όπως αυτό δίνεται από τη σχέση (3.5.1.9).

Γωνία αποδοχής

Στην προηγούμενη παράγραφο ειπώθηκε ότι μία παραβολική ανακλαστική επιφάνεια έχει την ιδιότητα να εστιάζει όλη την, παράλληλη με τον άξονά της, ακτινοβολία στην εστία της. Αντίστοιχα, ο παραβολικός κύλινδρος έχει την ιδιότητα να εστιάζει όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία, την παράλληλη με τον άξονα της παραβολικής διατομής του, κατά μήκος της εστιακής του γραμμής. Ωστόσο, τα κάτοπτρα παραβολικής γεωμετρίας είναι πολύ ευαίσθητα στη μεταβολή της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα^[1] φαίνεται η επίπτωση που έχει στην εστίαση της ακτινοβολίας μία ελάχιστη απόκλιση της κατεύθυνσής της από τον άξονα της παραβολής κατά 1° .



Σχήμα 3.5.3: (α) Ακτίνες παράλληλες στον άξονα της παραβολής, (β) Ακτίνες με απόκλιση 1 μοίρας από τον άξονα της παραβολής (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Όπως φαίνεται στο σχήμα, ακόμα και ελάχιστη απόκλιση από τον άξονα δημιουργεί διασπορά των ανακλώμενων ακτίνων γύρω από το σημείο εστίασης, με ορισμένες από αυτές να ανακλώνται λίγο

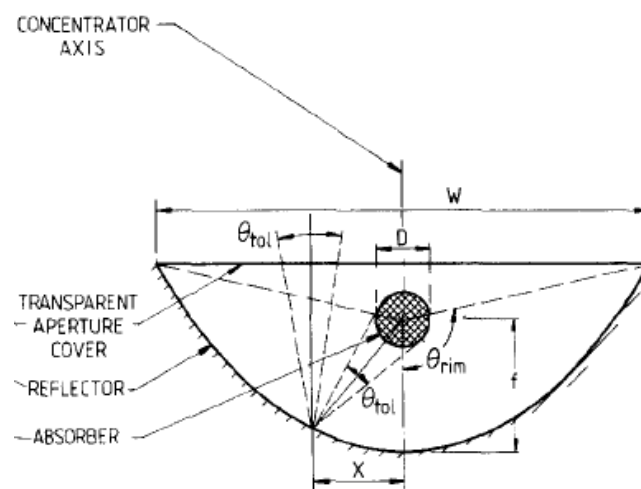
ψηλότερα, και ορισμένες λίγο χαμηλότερα από αυτό. Δεν πρόκειται πλέον για σημειακή εστίαση, αλλά για συγκέντρωση της ακτινοβολίας σε μία πεπερασμένη περιοχή γύρω από την εστία.

Η αλήθεια είναι ότι οι ηλιακές ακτίνες δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους. Στην πραγματικότητα, η ηλιακή ακτινοβολία που έρχεται από τον ηλιακό δίσκο δημιουργεί κώνο, με γωνία $9,6\text{mrad}$ (περίπου $0,33^\circ$). Επιπλέον, όπως εξηγήθηκε στο 2ο κεφάλαιο, η ηλιακή ακτινοβολία εντός της ατμόσφαιρας αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία. Η άμεση ακτινοβολία είναι αυτή που φθάνει απευθείας από τον ηλιακό δίσκο, ενώ η διάχυτη αυτή που, αν η ατμόσφαιρα θεωρηθεί ισοτροπική, φθάνει στη γη από κάθε σημείο του ουράνιου θόλου.

Γωνία αποδοχής (acceptance angle) ή γωνία ανοχής (tolerance angle) ενός παραβολικού κατόπτρου ονομάζεται η μέγιστη γωνία απόκλισης που μπορεί να έχει η ηλιακή ακτινοβολία ως προς τον άξονά του, έτσι ώστε να εστιάζεται επιτυχώς στο δέκτη του. Με άλλα λόγια, εκφράζει το σφαιρικό τομέα του ουράνιου θόλου, από τον οποίο, η προερχόμενη διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να εστιαστεί επιτυχώς. Οι γωνίες αποδοχής των παραβολικών κατόπτρων είναι κατά κανόνα πολύ μικρές, και για αυτό το λόγο στους υπολογισμούς του ηλιακού δυναμικού λαμβάνεται υπόψιν μόνο η άμεση ακτινοβολία, όπως ειπώθηκε στο 2ο κεφάλαιο.

Λόγος Συγκέντρωσης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τομή, η κάθετη στον επιμήκη άξονα, ενός συλλέκτη παραβολικής σκάφης. Η τομή του κατόπτρου είναι παραβολή ενώ ο δέκτης είναι κυκλικής διατομής.



Σχήμα 3.5.4: Τομή συλλέκτη παραβολικής σκάφης^[7]

Στο σχήμα, με W συμβολίζεται το άνοιγμα του κατόπτρου, με D η διάμετρος του κυλινδρικού δέκτη, με θ_{rim} η γωνία χείλους του κατόπτρου, όπως αυτή δίνεται από τις σχέσεις (3.5.1.5) και (3.5.1.6), με X η απόσταση ενός τυχαίου σημείου της επιφάνειας του κατόπτρου από τον άξονα του, και με θ_{tol} η γωνία ανοχής του συλλέκτη.

Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.3.2) για το συλλέκτη του σχήματος, βρίσκουμε ότι ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης των συλλεκτών παραβολικής σκάφης δίνεται από τη σχέση:

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r} = \frac{W \cdot l}{\pi D \cdot l} = \frac{W}{\pi D} \quad (3.5.1.12)$$

όπου l το μήκος του συλλέκτη

Επομένως, ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης των συλλεκτών παραβολικής σκάφης βρίσκεται από μία απλή σχέση βασικών γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών.

Μέγιστος Λόγος Συγκέντρωσης - Μέγιστη Δυνατή Θερμοκρασία

Από τη σχέση (3.5.1.12) είναι φανερό ότι ο λόγος συγκέντρωσης των συλλεκτών παραβολικής σκάφης μπορεί να αυξηθεί είτε αυξάνοντας το πλάτος των κατόπτρων, ή μειώνοντας τη διάμετρο του δέκτη. Όταν ο δέκτης αποκτήσει μηδενική διάμετρο, τότε ο λόγος συγκέντρωσης απειρίζεται και έχουμε την περίπτωση της ιδανικής παραβολής. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό για πολλούς λόγους, ο σημαντικότερος εκ των οποίων είναι ότι κάτι τέτοιο θα παρέβαινε το 2^ο θερμοδυναμικό νόμο.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.5.4, η ελάχιστη διάμετρος του δέκτη είναι ευθέως ανάλογη της γωνίας ανοχής του συλλέκτη. Αγνοώντας οποιοδήποτε άλλες πηγές σφαλμάτων, ο δέκτης θα πρέπει να έχει ικανή διάμετρο ώστε να απορροφά όλη την προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία, η οποία όπως ειπώθηκε δημιουργεί κώνο γωνίας 9,6mrad. Έτσι, προκύπτει μία εναλλακτική έκφραση του μέγιστου δυνατού γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης^[7]:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin \theta_{tol}} \quad (3.5.1.13)$$

Η μέγιστη θερμοκρασία που θα μπορούσε να επιτευχθεί στο δέκτη, κάτω από ιδανικές συνθήκες, θα ήταν εκείνη της ηλιακής φωτόσφαιρας (6050K). Μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτή θα ερχόταν σε αντίθεση με το 2^ο θερμοδυναμικό νόμο. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην πραγματικότητα στο δέκτη (αγνοώντας άλλες απώλειες θερμότητας σε αυτόν, πέραν της ακτινοβολίας), δίνεται από τη σχέση^[8]:

$$T_{rec} = T_s \left[(1 - \eta_{rec}) \frac{\eta_{opt}}{\varepsilon} \frac{CR_{actual}}{CR_{ideal}} \right] \quad (3.5.1.14)$$

όπου:

- T_{rec} : Η θερμοκρασία στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη
- T_s : Η θερμοκρασία της ηλιακής φωτόσφαιρας
- η_{rec} : Η απόδοση του δέκτη (βλ. παράγραφο 3.2)
- η_{opt} : Η οπτική απόδοση του συλλέκτη (βλ. παράγραφο 3.2)
- ε : Συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του δέκτη
- CR_{actual} : Ο πραγματικός γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης, όπως αυτός δίνεται από τη σχέση (3.5.12)
- CR_{ideal} : Ο ιδανικός λόγος συγκέντρωσης, όπως δίνεται από τη σχέση (3.5.1.13)

Από την παραπάνω σχέση, είναι φανερό ότι για να ισχύσει $T_{rec} = T_s$, θα πρέπει να ισχύσουν ταυτόχρονα:

- Η απόδοση του δέκτη ίση με το μηδέν (καμία κυκλοφορία ρευστού στο δέκτη, η προσπίπτουσα σε αυτόν ακτινοβολία ίση με τις θερμικές του απώλειες).
- Η οπτική απόδοση του συλλέκτη ίση με τη μονάδα.
- Συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του δέκτη ίσος με τη μονάδα (μέλαν σώμα).
- $CR_{actual} = CR_{ideal}$. Στους πραγματικούς συλλέκτες και δέκτες ο λόγος συγκέντρωσης είναι πάντοτε μικρότερος του ιδανικού λόγω τυχαίων και συστηματικών σφαλμάτων που θα αναλυθούν στην αμέσως επόμενη παράγραφο,

Συντελεστής ανακοπής (intercept factor)

Στην προηγούμενη παράγραφο προσδιορίστηκε η ελάχιστη γωνία αποδοχής που θα πρέπει να έχει ο παραβολικός συλλέκτης έτσι ώστε όλη η άμεση ακτινοβολία που ανακλάται στα κάτοπτρα να καταλήγει στο δέκτη. Η γωνία αυτή αντιστοιχεί σε απολύτως ιδανικές συνθήκες λειτουργίας. Στην πραγματικότητα, ένα πλήθος σφαλμάτων υπεισέρχονται κατά την ανάκλαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας στο συλλέκτη, τα οποία προκαλούν τη διασπορά της. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε μονοδιάστατα και διδιάστατα^[1], και σε τυχαία και συστηματικά^[9]. Ανεξαρτήτως του χαρακτηρισμού τους, όλα τα σφάλματα εκφράζονται σε μοίρες, και οδηγούν σε αύξηση της γωνίας αποδοχής (άρα, συνεπακόλουθα και μείωση του λόγου συγκέντρωσης) προκειμένου να εστιαστεί επιτυχώς η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στο δέκτη.

Στα τυχαία σφάλματα συγκαταλέγονται η φαινομενική μεταβολή του μεγέθους του ηλιακού δίσκου, φαινόμενα διάχυσης της ακτινοβολίας που προκαλούνται από τυχαίες μεταβολές της κλίσης του κατόπτρου (π.χ. υπό την επίδραση ισχυρών ανέμων), και φαινόμενα διάχυσης που οφείλονται στις ανακλαστικές ιδιότητες της επιφάνειας του κατόπτρου. Τα τυχαία σφάλματα θεωρείται ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή, και συνεπώς το μέγεθός τους εκφράζεται σε πολλαπλάσια της τυπικής απόκλισης σ .

Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες και αστοχίες του συλλέκτη, όπως ατέλειες της γεωμετρίας και της επιφάνειάς του, αποκλίσεις και προβλήματα ευθυγράμμισης του συστήματος παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης, και σφάλματα της θέσης του δέκτη σχετικά με τα κάτοπτρα. Τα συστηματικά σφάλματα έχουν σταθερή τιμή και μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια.

Τα μονοδιάστατα σφάλματα είναι εκείνα στα οποία η απόκλιση της ακτινοβολίας περιορίζεται σε επίπεδο κάθετο στον επιμήκη άξονα του συλλέκτη (δηλαδή στη διατομή του κατόπτρου). Σε αυτά συγκαταλέγονται τα σφάλματα κλίσης της επιφάνειας των κατόπτρων, τα σφάλματα των μηχανισμών παρακολούθησης και κίνησης του συλλέκτη, καθώς και τα σφάλματα θέσης του δέκτη.

Τα διδιάστατα σφάλματα είναι εκείνα που προκαλούν αποκλίσεις της ακτινοβολίας και εκτός του επιπέδου καμπυλότητας του κατόπτρου. Σε αυτά η προσπίπτουσα στο κάτοπτρο ακτινοβολία μπορεί να ανακλαστεί και κατά μήκος της εστιακής γραμμής του συλλέκτη. Σε αυτά συγκαταλέγονται τα σφάλματα από τη μεταβολή του μεγέθους του ηλιακού δίσκου και φαινόμενα διάχυσης που οφείλονται στις ανακλαστικές ιδιότητες της επιφάνειας του κατόπτρου.

Η τυπική απόκλιση των μονοδιάστατων τυχαίων σφαλμάτων βρίσκεται από τη σχέση:

$$\sigma_{1D} = 2\sigma_{slope} \quad (3.5.1.15)$$

όπου σ_{slope} η τυπική απόκλιση του σφάλματος κλίσης του κατόπτρου.

Αντίστοιχα, η τυπική απόκλιση των διδιάστατων τυχαίων σφαλμάτων βρίσκεται από τη σχέση:

$$\sigma_{2D} = \frac{\sqrt{\sigma_{sun}^2 + \sigma_{refl}^2}}{\cos \theta_i} \quad (3.5.1.16)$$

όπου σ_{sun} και σ_{refl} οι τυπικές αποκλίσεις των σφαλμάτων μεγέθους του Ήλιου και μη κατευθυνόμενης ανάκλασης των κατόπτρων αντίστοιχα, ενώ $\cos \theta_i$ είναι το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο κάτοπτρο.

Η ολική τυπική απόκλιση των σφαλμάτων, δίνεται επομένως από τη σχέση:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(\sigma_{1D}^2 + \sigma_{2D}^2)} \quad (3.5.1.17)$$

Ενώ το μέγεθος των τυχαίων σφαλμάτων δίνεται από τη σχέση:

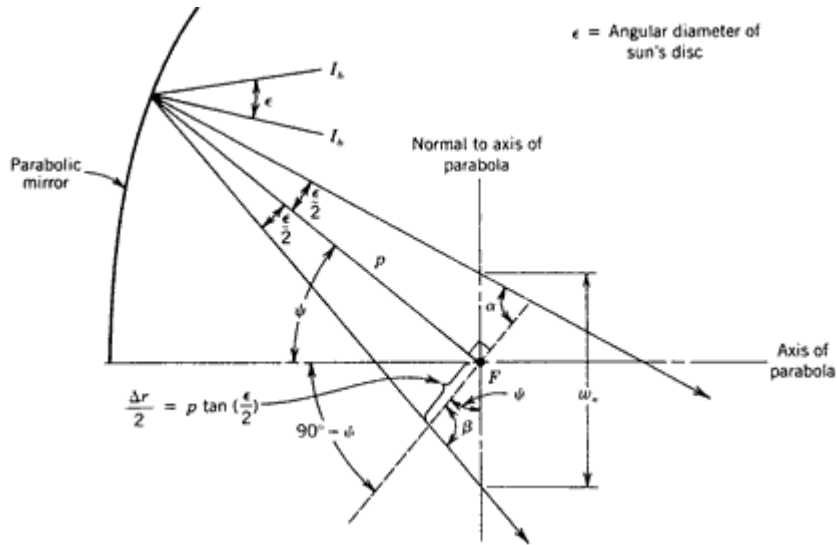
$$E_{rand} = n \cdot \sigma_{tot} \quad (\text{mrad}) \quad (3.5.1.18)$$

Το συνολικό μέγεθος των σφαλμάτων επομένως, τυχαίων και συστηματικών, δίνεται από τη σχέση:

$$E_{tot} = E_{rand} + E_{sys} \quad (\text{mrad}) \quad (3.5.1.19)$$

όπου E_{sys} το μέγεθος των συστηματικών σφαλμάτων του συλλέκτη.

Τα σφάλματα, τυχαία και συστηματικά, έχουν ως αποτέλεσμα τη διασπορά της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε σημεία και πέραν της εστίας του παραβολικού κατόπτρου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.5: Ανάκλαση μη παράλληλων ηλιακών ακτίνων από παραβολικό κάτοπτρο (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Επομένως, προκειμένου ο δέκτης να απορροφήσει το σύνολο της ανακλώμενης ακτινοβολίας, η ακτίνα του θα πρέπει να μεταβληθεί κατά τον όρο:

$$\Delta r = 2p \cdot \tan\left(\frac{E_{tot}}{2}\right) \quad (\text{m}) \quad (3.5.1.20)$$

Στην πραγματικότητα, οι δέκτες δε σχεδιάζονται τόσο μεγάλοι, όσο υποδεικνύει η εξίσωση (3.5.1.20). Υπενθυμίζεται ότι οι απώλειες θερμότητας του δέκτη είναι ανάλογες της επιφάνειάς του, επομένως όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις του τόσο αυξάνονται και οι απώλειες που παρουσιάζει. Επομένως, κατά τη σχεδίαση των δεκτών βρίσκεται το βέλτιστο σημείο, το μέγεθος δηλαδή εκείνο στο οποίο η συνολική ενέργεια (απορροφώμενη εξ ανακλάσεως μείον απώλειες) στο δέκτη παρουσιάζει μέγιστο.

Ο **συντελεστής ανακοπής (intercept factor) Γ** είναι ένα μέτρο του βέλτιστου μεγέθους του δέκτη, και εκφράζει το ποσοστό της συνολικής ανακλώμενης από το κάτοπτρο ακτινοβολίας προς τη συνολική προσπίπτουσα στο δέκτη. Σύμφωνα με τους Guven and Bannerot^[10], τα τυχαία και συστηματικά σφάλματα μπορούν να συνδυαστούν με τις γεωμετρικές παραμέτρους του συλλέκτη, όπως το λόγο συγκέντρωσης CR_g και τη διάμετρό του D , προκειμένου να δώσουν παραμέτρους σφάλματος κοινές για όλες τις γεωμετρίες συλλεκτών. Αυτές οι παράμετροι αποκαλούνται «παγκόσμιες παράμετροι σφάλματος». Εκφραζόμενος ως προς αυτές, ο συντελεστής ανακοπής δίνεται από τη σχέση^[9]:

$$\Gamma = \frac{1 + \cos \psi_{rim}}{2 \sin \psi_{rim}} \int_0^{\psi_{rim}} \left\{ \text{Erf} \left(\frac{\sin \psi_{rim} (1 + \cos \psi) (1 - 2d^* \sin \psi) - \pi \beta^* (1 + \cos \psi_{rim})}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \psi_{rim})} \right) \right\} - \left\{ \text{Erf} \left(-\frac{\sin \psi_{rim} (1 + \cos \psi) (1 + 2d^* \sin \psi) + \pi \beta^* (1 + \cos \psi_{rim})}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \psi_{rim})} \right) \right\} \cdot \frac{d\psi}{(1 + \cos \psi)} \quad (3.5.1.21)$$

όπου:

ψ_{rim} : Η γωνία χείλους του κατόπτρου

σ^* : Παγκόσμια παράμετρος σφάλματος ($\sigma^* = \sigma C$)

β^* : Παγκόσμια παράμετρος μη-τυχαίων γωνιακών σφαλμάτων ($\beta^* = \beta C$)

d^* : Παγκόσμια παράμετρος σφαλμάτων θέσης δέκτη και προφίλ επιφάνειας κατόπτρου

Erf : Γκαουσιανή συνάρτηση σφάλματος ($Erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$)

Οπτική απόδοση

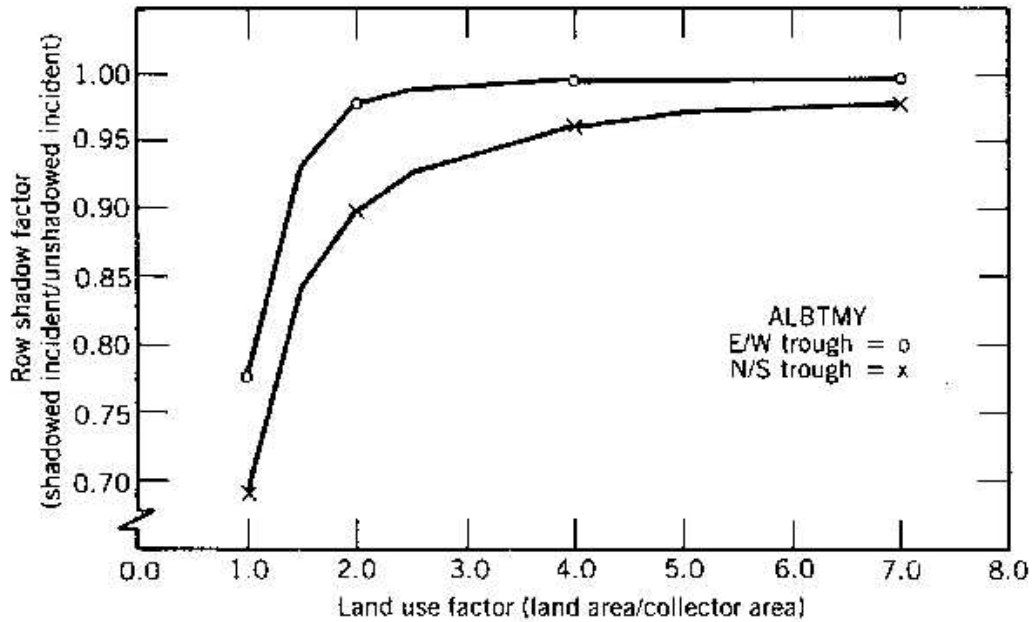
Η οπτική απόδοση η_{opt} των συλλεκτών παραβολικής σκάφης εκφράζει την αποτελεσματικότητα κατά τη μεταφορά ενέργειας από τα κάτοπτρα στο δέκτη (βλ. παράγραφο 3.2), και είναι συνάρτηση των υλικών κατασκευής κατόπτρων και δέκτη, των διαστάσεών τους, του συντελεστή ανακοπής Γ , και της θέσης των κατόπτρων στο πεδίο συλλεκτών. Η σχετική θέση των συλλεκτών στο πεδίο περιορίζει την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα κάτοπτρα λόγω απωλειών κατά την παρακολούθηση της ηλιακής κίνησης και σκίασης των κατόπτρων από εκείνα που βρίσκονται μπροστά τους. Δύο είναι οι πηγές απωλειών στο πεδίο των συλλεκτών:

i. Απώλειες συνημιτόνου

Αυτές έχουν αναλυθεί στην παράγραφο 2.2.3, και για πεδίο συλλεκτών διατεταγμένο κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου, δίνονται από τη σχέση (2.2.3.9). Ολοκληρώνοντας τη σχέση αυτή στο διάστημα ενδιαφέροντος προκύπτει η απόδοση συνημιτόνου η_{cos} του πεδίου συλλεκτών.

ii. Απώλειες λόγω σκίασης

Αυτές προκύπτουν από την παρεμβολή συλλεκτών μεταξύ της επιφάνειας άλλων συλλεκτών και της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα τη σκίαση μέρους της επιφάνειας των συλλεκτών από τους γειτονικούς τους. Η τιμή των απωλειών αυτών εξαρτάται από την πυκνότητα τοποθέτησης των σειρών των συλλεκτών (όσο πλησιέστερα τοποθετημένοι είναι οι συλλέκτες, τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες λόγω σκίασης). Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η μεταβολή του παράγοντα σκίασης η_{shade} με την πυκνότητα του πεδίου των συλλεκτών, εκπεφρασμένης ως ο λόγος της συνολικής επιφάνειας γης που καταλαμβάνει το πεδίο, προς τη συνολική επιφάνεια των συλλεκτών.



Σχήμα 3.5.6: Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με την ποκνότητα του πεδίου συλλεκτών παραβολικής σκάφης (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Η **συνολική απόδοση του πεδίου συλλεκτών η_{field}** δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \cdot \eta_{shade} \quad (3.5.1.22)$$

Η **οπτική απόδοση η_{opt}** προκύπτει ως γινόμενο της απόδοσης του πεδίου επί την επιμέρους οπτική απόδοση του κάθε συλλέκτη, δηλαδή από τη σχέση:

$$\eta_{opt} = \frac{\dot{E}_{opt}}{\dot{E}_{inc}} = \Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \eta_{field} \quad (3.5.1.23)$$

όπου:

- Γ : Ο συντελεστής ανακωπής του συλλέκτη (σχέση 3.5.1.21)
- ρ : Ο συντελεστής ανάκλασης του υλικού των κατόπτρων
- τ : Η οπτική διαπερατότητα τυχόν διαφανών επιφανειών μεταξύ κατόπτρων και δέκτη
- α : Η απορροφητικότητα της επιφάνειας του δέκτη

Απόδοση Δέκτη

Η απόδοση του δέκτη η_{rec} δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{rec} = 1 - \frac{\dot{Q}_{loss,rec}}{\dot{E}_{opt}} \quad (3.5.1.24)$$

όπου η ισχύς \dot{E}_{opt} υπολογίζεται από τη σχέση (3.5.1.22), ενώ οι απώλειες θερμότητας του δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{loss,rec} = h \cdot A_r (T_r - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) \quad (3.5.1.25)$$

όπου:

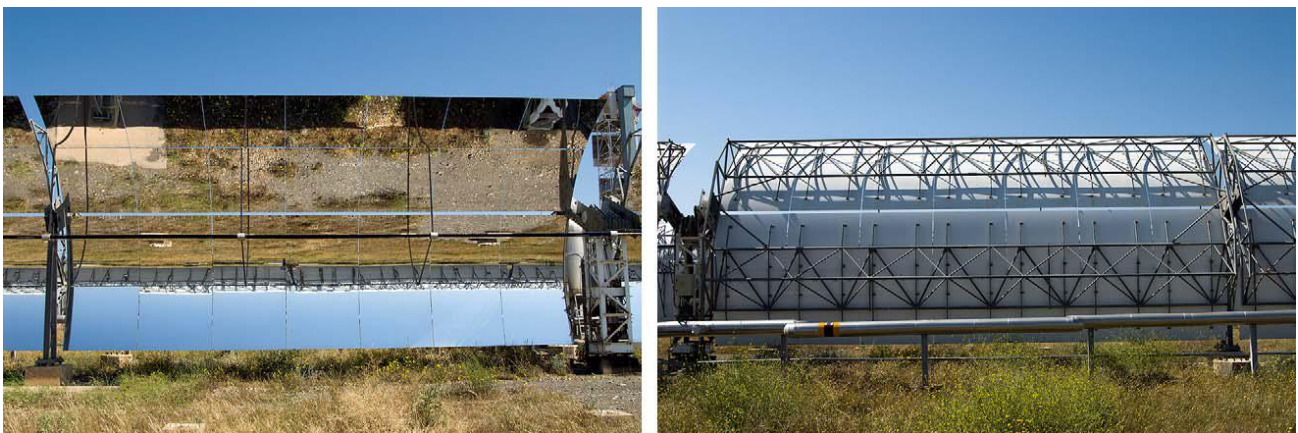
- h : Ο μέσος συντελεστής συναγωγής
- A_r : Η επιφάνεια του δέκτη
- T_r, T_a : Οι μέσες θερμοκρασίες δέκτη και περιβάλλοντος αντίστοιχα
- ε : Ο συντελεστής εκπομπής του δέκτη
- σ : Η σταθερά Stefan-Boltzmann

Εμπορικά διαθέσιμοι συλλέκτες

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι συλλέκτες που έχουν εγκατασταθεί κατά καιρούς, και χρησιμοποιούνται ακόμα σε ηλιοθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ορισμένων εξ αυτών.

1. Συλλέκτες Luz

Πρόκειται για συλλέκτες της αμερικανοϊοραηλινής εταιρίας Luz International Ltd., η οποία έχει σχεδιάσει 3 γενιές συλλεκτών: τους LS-1, LS-2 και LS-3. Αποψη των τελευταίων ακολουθεί στο επόμενο σχήμα^[11]:



Σχήμα 3.5.7: Πρόσψη (αριστερά) και οπίσθια όψη (δεξιά) των συλλεκτών LS-3 (Πηγή: A. F. Garcia et al. "Parabolic-trough solar collectors and their applications", 2010)

Στα πρώτα δύο μοντέλα (LS-1 και LS-2) η διάταξη προσαρμόζεται σε έναν άκαμπτο μεταλλικό κύλινδρο στήριξης, τον κύλινδρο ροπής, ο οποίος στηρίζει τα μεταλλικά προφίλ πάνω στα οποία προσαρμόζονται τα παραβολικά κάτοπτρα. Στο LS-3, ο κύλινδρος ροπής αντικαταστάθηκε από ένα μεταλλικό πλέγμα, ενώ η εγκάρσια διάσταση των κατόπτρων αυξήθηκε κατά 14% σε σχέση με το LS-2, και το μήκος τους διπλασιάστηκε. Επίσης, αλλαγές έγιναν στη βάση και στις στηρίξεις των κατόπτρων, ενώ οι συλλέκτες κινούνται με τη βοήθεια υδραυλικού συστήματος, σε αντίθεση με το LS-2 όπου η κίνηση γίνεται μέσω γραναζιών και συρματόσχοινων.

Ο αγωγός του δέκτη είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα, με ειδική επίστρωση (χρωμίου στους LS-1 και LS-2, κεραμική στο LS-3) περιμετρικά εγκλεισμένος σε εξωτερικό υάλινο σωλήνα. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται διάκενο κενού, για την προστασία του εσωτερικού αγωγού από την οξείδωση και την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών, καθώς επίσης και για την ελεύθερη συστολή και διαστολή του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου. Ο εξωτερικός αγωγός είναι από ύαλο χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο (μέγιστη περιεκτικότητα 0,015%) και διαθέτει αντιανακλαστική επίστρωση και στις δύο επιφάνειές του για τη μεγιστοποίηση της μετάδοσης της ακτινοβολίας.

Τα κάτοπτρα είναι από ύαλο χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο, με επίστρωση αργύρου στην εσωτερική πλευρά τους, και πέντε προστατευτικές επιστρώσεις στην εξωτερική τους επιφάνεια (μία χάλκινη και τέσσερα φινιρίσματα). Το πάχος τους είναι 4mm. Το παραβολικό τους σχήμα επιτυγχάνεται με χύτευση σε καλούπια ακριβείας, σε ειδικούς φούρνους, ενώ η συγκόλλησή τους με τη βάση στήριξης επιτυγχάνεται με κεραμικές βάσεις και ειδικές κόλλες.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων συλλεκτών:

Μοντέλο	LS-1	LS-2	LS-2	LS-3
Έτος κατασκευής	1984	1985	1988	1989
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	307	349	390	390
Άνοιγμα κατόπτρων (m ²)	128	235,5	235,5	570,2
Πλάτος κατόπτρων (m)	2,55	5	5	5,76
Μήκος (m)	50,2	47,1	47,1	99
Εστιακό μήκος (m)	0,68	1,40	1,40	1,71
Μέση εστιακή απόσταση (m)	0,94	1,84	1,84	2,12
Διάμετρος αγωγού απορρόφησης (mm)	40	70	70	70
Διάμετρος αγωγού επικάλυψης (mm)	-	0,115	0,115	0,115
Εσωτερική γωνία κατόπτρων (°)	85	80	80	80
Γωνία πρόσπτωσης (°)	1,918	1,59	1,59	1,37
Γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης	18,95	22,74	22,74	26,2
Μέγιστη οπτική απόδοση	0,734	0,74	0,74	0,77
Ανακλαστικότητα ρ	0,94	0,94	0,94	0,94
Συντελεστής ανακοπής Γ	0,87	0,89	0,89	0,93
Οπτική διαπερατότητα τ	0,94	0,95	0,95	0,96
Απορροφητικότητα α	0,94	0,94	0,94	0,96
Συντελεστής εκπομπής (σε θερμ. °C)	0,30 (300)	0,24 (300)	0,24 (300)	0,15 (350)

Πίνακας 3.5.1: Χαρακτηριστικά συλλεκτών Luz^[11]

2. Συλλέκτες Eurotrough

Οι συλλέκτες EuroTrough αναπτύχθηκαν από έναν συνεταιρισμό ευρωπαϊκών εταιριών, ως διάδοχοι των μοντέλων της Luz. Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά είναι παρόμοια με αυτών της Luz, με τη διαφορά ότι η διάταξη στήριξης των κατόπτρων αποτελείται από δικτύωμα ορθογωνικής διατομής, συνδυάζοντας έτσι την ακαμψία των κυλίνδρων ροπής του μοντέλου LS-2 με το χαμηλό κόστος μιας δικτυωτής κατασκευής, παρόμοιας με αυτής στο LS-3.

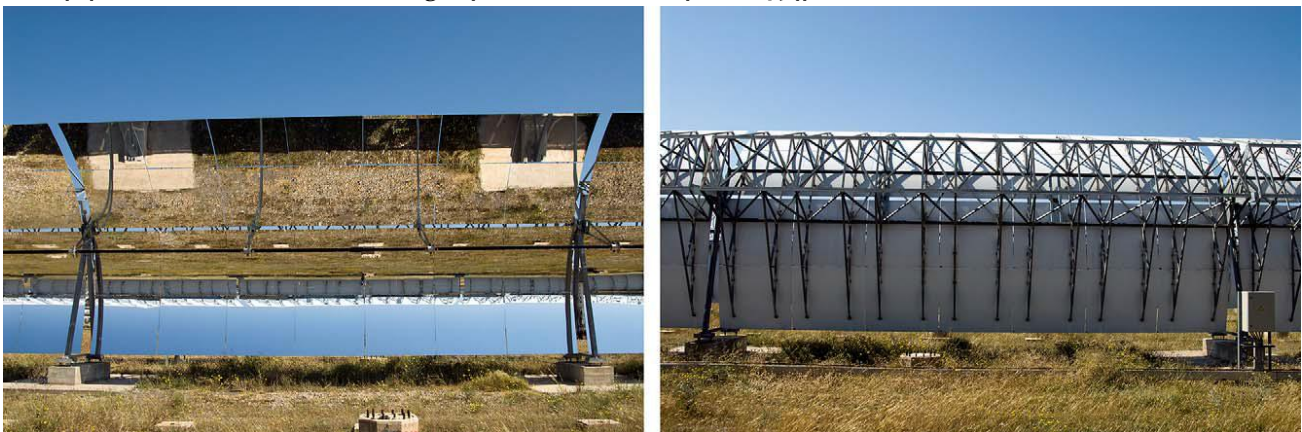
Το πρώτο μοντέλο, το ET-100 αποτελούταν από συλλέκτες μήκους 100m, 8 στοιχείων, με συνολική επιφάνεια 545m². Η αυξημένη ακαμψία των στηρίξεων επέτρεψε, στο δεύτερο μοντέλο, το ET-150, την αύξηση των στοιχείων από 8 σε 12, του μήκους από 100 σε 150m, και της συνολικής επιφάνειας στα 820m². Τα κάτοπτρα είναι κοινά με το μοντέλο LS-3.

Στους συλλέκτες EuroTrough δοκιμάστηκαν με επιτυχία δύο βελτιωμένες εκδοχές των δεκτών από τους συλλέκτες Luz, κατασκευασμένες από τις εταιρείες Solel και Schott. Οι διαστάσεις έχουν μείνει αμετάβλητες σε σχέση με τους δέκτες Luz, ωστόσο και οι δύο εταιρείες κατάφεραν να μειώσουν τους συντελεστές εκπομπής (περίπου 0,14 στους 400°C^[11]), χρησιμοποιώντας πιο σταθερές, επιλεκτικές επιφάνειες επιστροφής των αγωγών απορρόφησης.

Σε σχέση με προηγούμενες υλοποιήσεις, οι συλλέκτες EuroTrough παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Μικρότερες παραμορφώσεις λόγω βαρύτητας και ανέμων, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη οπτική απόδοση.
- Η αύξηση του μήκους από 100 σε 150m μείωσε τον αριθμό των σωληνώσεων διασύνδεσης, και οδήγησε σε μικρότερες θερμικές απώλειες και χαμηλότερο κόστος.
- Μικρότερη σκίαση, λόγω βελτιωμένης σχεδίασης της στήριξης του απορροφητή.
- Μειωμένο κατά 14% βάρος, σε σχέση με το LS-3.
- Ευκολότερη μεταφορά και εγκατάσταση.
- Μειωμένος αριθμός εξαρτημάτων, αύξηση της δυνατότητας μαζικής παραγωγής.
- Χαμηλότερες απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης.
- Απλοποιημένη διαδικασία παραγωγής, μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Μειωμένο, κατά 10%, κόστος.

Άποψη των συλλεκτών Eurotrough φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.8: Πρόοψη (αριστερά) και οπίσθια όψη (δεξιά) των συλλεκτών Eurotrough (Πηγή: A. F. Garcia et al. "Parabolic-trough solar collectors and their applications", 2010)

3. Άλλοι συλλέκτες^[11]

- *SGX-1, SGX-2*: Συλλέκτες της αμερικανικής εταιρείας Solargenix Energy. Ο SGX1 είναι βασισμένος στον LS-2 της Luz, και χρησιμοποιεί πανομοιότυπα κάτοπτρα και δέκτη, αλλά έχει διπλάσιο μήκος. Χρησιμοποιεί πλαίσιο στήριξης από αλουμίνιο και διαθέτει βελτιωμένα συστήματα ελέγχου και κίνησης. Ο SGX2 υπερτερεί του SGX1 στο χρόνο κατασκευής.
- *SENERTROUGH-1*: Συλλέκτης της ισπανικής εταιρείας SENER, ίδιου μεγέθους με τον LS-3 της Luz, αλλά με κίνηση μέσω κυλίνδρου ροπής, στον οποίο προσαρμόζονται βραχίονες στήριξης των επιμέρους κατόπτρων που συνθέτουν την επιφάνεια ανάκλασης του συλλέκτη, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.9: Οπίσθια όψη συλλέκτη SENERTROUGH-1 (Πηγή: A. F. Garcia et al. “Parabolic-trough solar collectors and their applications”, 2010)

Υπό ανάπτυξη βρίσκεται ο συλλέκτης SENERTROUGH-2, με μεγαλύτερη επιφάνεια κατόπτρων και διαστάσεις δέκτη, σε σχέση με τον προκατόχο του.

- *Albiasa Trough*: Συλλέκτης της ισπανικής εταιρείας Albiasa Solar. Παρόμοιος με τον SENERTROUGH, με τη διαφορά ότι ο κύλινδρος ροπής αποτελείται από τόξα 90°.
- *ENEA*: Συλλέκτης του ιταλικού κέντρου περιβαλλοντικών ερευνών και ΑΠΕ, με κυψελωτή δομή και μεγαλύτερα κάτοπτρα από τα συνήθη (διατομής ίσης με το ήμισυ της παραβολής). Προορίζεται για λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες (μέχρι 550°C) και με τήγμα αλάτων ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας.
- *Skytrough*: Συλλέκτες της αμερικανικής εταιρείας SkyFuel, παρομοίων διαστάσεων με τον LS-3 της Luz, αλλά με διαφορετικό υλικό κατόπτρων. Τα κάτοπτρα είναι κατασκευασμένα από πολυμερικό φιλμ, με επιχρυσμα από ασήμι, ονομαζόμενο ReflecTech. Το φιλμ αυτό είναι φθινό στην κατασκευή, ελαφρύ, άθραυστο, με καλές οπτικές ιδιότητες (ανακλαστικότητα 94%) και με

καλή αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το φιλμ επικάθεται σε κοίλα πανελ αλουμινίου για το σχηματισμό της παραβολικής γεωμετρίας, τα οποία στηρίζονται σε δικτύωμα αλουμινίου. Ο συλλέκτης χρησιμοποιεί μια βελτιωμένη εκδοχή του δέκτη Schott και το σύστημα ελέγχου της κίνησης SkyTracker.

Δυνατότητες ενσωμάτωσης συλλεκτών παραβολικής σκάφης σε θερμοηλεκτρικές μονάδες

Τα πεδία συλλεκτών παραβολικής σκάφης μπορούν να παρέχουν θερμότητα σε ατμοηλεκτρικές μονάδες ισχύος με δύο τρόπους^[11]:

1. Έμμεσα, με την κυκλοφορία κατάλληλου ρευστού μεταφοράς θερμότητας (θερμικού ελαίου) στους αγωγούς, και παραγωγή προσθήκη θερμότητας στο βραστήρα για την παραγωγή του ατμού (τεχνολογία HTF – Heat Transfer Fluid).
2. Άμεσα, με την κυκλοφορία νερού στους αγωγούς του δέκτη, και την παραγωγή ατμού απευθείας στο πεδίο συλλεκτών (τεχνολογία DSG – Direct Steam Generation).

Η τεχνολογία DSG είναι πολλά υποσχόμενη και παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την τεχνολογία HTF, ορισμένα εκ των οποίων και τα παρακάτω^[12]:

- Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας στο πεδίο συλλεκτών, και κατά συνέπεια αύξηση της μέγιστης απόδοσης του κύκλου (Τα περισσότερα θερμικά έλαια που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας παρουσιάζουν προβλήματα αποδόμησης πάνω από τους 400°C).
- Μείωση του κόστους κατασκευής, λόγω έλλειψης εναλλακτών θερμότητας μεταξύ θερμικού ελαίου και ατμού, καθώς και των συστημάτων προθέρμανσης και άντλησης του ελαίου.
- Εξάλειψη των κινδύνων από διαρροές του θερμικού ελαίου.
- Μείωση του κόστους λόγω αντικατάστασης του ελαίου (περίπου 3% του ρευστού μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί στο πεδίο συλλεκτών πρέπει να αντικαθίσταται κάθε χρόνο^[11]).

Ωστόσο, η τεχνολογία DSG παρουσιάζει και ορισμένες δυσκολίες και προβλήματα στην υλοποίησή της, όπως^[11]:

- Αυξημένες πιέσεις για την κυκλοφορία του ρευστού, που απαιτούν ακριβότερο υδραυλικό εξοπλισμό.
- Προβλήματα από την πήξη του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Η παροχή του νερού πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα διαστρωμάτωσης της ροής στη ζώνη εξάτμισης.
- Τα συστήματα ελέγχου που απαιτούνται είναι πολυπλοκότερα και ακριβότερα, λόγω της διφασικής ροής στους αγωγούς, και των διαφορετικών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων νερού και ατμού.

Λόγω των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στη διφασική ροή, προς το παρόν δεν υπάρχουν εμπορικές εγκαταστάσεις που να αξιοποιούν την τεχνολογία DSG. Η έρευνα όμως είναι εντατική, με εγκαταστάσεις επίδειξης, ισχύος 5MW_e στην Ισπανία να δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συνοπτική καταγραφή των ηλιοθερμικών μονάδων παραβολικής σκάφης

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ήδη εγκατεστημένες και εμπορικά εκμεταλλεύσιμες μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης, σε παγκόσμια κλίμακα, με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους (χαρακτηριστικά πεδίου συλλεκτών, συστήματος ισχύος και συστήματος αποθήκευσης ενέργειας). Στους πίνακες που ακολουθούν στη συνέχεια, αναφέρονται συνοπτικά οι μονάδες που βρίσκονται υπό κατασκευή, καθώς και εκείνες για τις οποίες έχουν υπογραφεί συμβάσεις και βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης, αλλά δεν έχει ξεκινήσει η κατασκευή τους.

Οι πίνακες προέκυψαν από επεξεργασία των στοιχείων του Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών του αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας^[5].

Πίνακας 3.5.2: Εγκατεστημένες ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης.

Μονάδα	Alvarado 1	Andasol-1	Andasol-2	Archimede
Τοποθεσία	Αλβαράδο, Ισπανία	Γρανάδα, Ισπανία	Γρανάδα, Ισπανία	Σικελία, Ιταλία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2174	2136	2136	1936
Εταιρεία Κατασκευής	Acciona Energia	ACS/Cobra Group	ACS/Cobra Group	ENEL
Έναρξη Λειτουργίας	Ιούνιος 2009	Νοέμβριος 2008	Ιούνιος 2009	Ιούλιος 2010
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Acciona Solar Power	UTE CT Andasol-1 (SKAL-ET)	UTE CT Andasol-2 (SKAL-ET)	COMES (ENEA)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)		510.120	510.120	31.860
Αριθμός Συλλεκτών	768	624	624	54
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)		Schott	Solel	Arhimede Solar Energy
Τύπος (Μήκος)				
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Biphenyl/Diphenyl oxide	Biphenyl/Diphenyl oxide	Biphenyl/Diphenyl oxide	Τήγμα Αλάτων (60% NaNO ₃ , 40% KNO ₃)
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)		293	293	290
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	393	393	393	550
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	50	50	50	5
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	105.200	158.000	158.000	9200
Κύκλος	Rankine	Rankine (100bar)	Rankine (100bar)	Rankine (93.83bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας		Θέρμανση Ρευστού	Θέρμανση Ρευστού	
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης	Υγρόψυξη
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης		2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση	2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση	2 Δεξαμενές Αλάτων - Άμεση
Χωρητικότητα (hr)		7,5	7,5	8

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	La Florida	Colorado ISP	Extresol-1	Extresol-2
Τοποθεσία	Badajoz, Ισπανία	Κολοράντο, ΗΠΑ	Badajoz, Ισπανία	Badajoz, Ισπανία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2168		2168	2168
Εταιρεία Κατασκευής	Renovables SAMCA	Xcel Energy, Abengoa Solar	ACS/Cobra Group	ACS/Cobra Group
Έναρξη Λειτουργίας	Ιούνιος 2010	2010	Ιανουάριος 2010	2010
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Ingemetal (SAMCA-Trough)		UTE CT Extresol-1 (SENERTROUGH)	Cobra Instalaciones y Servicios (SENERTROUGH)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	552.750	6664	510.120	510.120
Αριθμός Συλλεκτών	672	8	624	624
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Schott		Schott (PTR70)	Solel (UVAC 2008)
Τύπος (Μήκος)			Κενού (4m)	Κενού (4m)
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Diphenyl/Diphenyl oxide		Diphenyl/Biphenyl oxide	Diphenyl/Biphenyl oxide
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)	298		293	293
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	393		393	393
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	50	2	50	50
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	175.000		158.000	158.000
Κύκλος	Rankine (100bar)	Υβριδικός (ISCC)	Rankine (100bar)	Rankine (100bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Θέρμανση Ρευστού		Θέρμανση Ρευστού	Θέρμανση Ρευστού
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης	2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση		2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση	2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση
Χωρητικότητα (hr)	7,5		7,5	7,5

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	Ibersol Ciudad Real	ISCC Algeria	ISCC Morocco	La Dehesa
Τοποθεσία	Πουερτολάνο, Ισπανία	Χάσι Αρ Μέλ, Αλγερία	Μαρόκο	Badajoz, Ισπανία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2061			
Εταιρεία Κατασκευής	IBERCAM	Abener	Abener	Renovables SAMCA
Έναρξη Λειτουργίας	Ιανουάριος 2009	Ιούλιος 2011	Μάιος 2011	Φεβρουάριος 2011
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Iberdrola (Iberdrola Collector)	(ASTR-Ø)	(ASTR-Ø)	Ingemetal (SAMCA-Trough)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	287.760	183.860	180.000	552.750
Αριθμός Συλλεκτών	352	224	224	672
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Schott	Schott	Schott	Schott
Τύπος (Μήκος)				
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Diphenyl/Diphenyl oxide	Θερμικό Έλαιο	Θερμικό Έλαιο	Diphenyl/Diphenyl oxide
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)	304			298
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	391	393	393	393
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	50	25	470	50
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	103.000			175.000
Κύκλος	Rankine (100bar)			Rankine (100bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Θέρμανση Ρευστού			Θέρμανση Ρευστού
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Ξηρή Ψύξη	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης				2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση
Χωρητικότητα (hr)				7,5

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	Majadas I	Manchasol-1	MNGSEC	Nevada Solar One
Τοποθεσία	Cáceres, Ισπανία	Ciudad Real, Ισπανία	Φλόριντα, ΗΠΑ	Νεβάδα, ΗΠΑ
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2142	2208		2606
Εταιρεία Κατασκευής	Acciona Energia	ACS/Cobra Group	FPL	Acciona Solar Power
Έναρξη Λειτουργίας	Οκτώβριος 2010	Ιανουάριος 2011	Δεκέμβριος 2010	Ιούνιος 2007
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Acciona Solar Power	Cobra Instalaciones y Servicios (SENER TROUGH)		Acciona Solar Power (SGX-2)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)		510.120		357.200
Αριθμός Συλλεκτών	792	624		760
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)		Schott		Schott/Solel
Τύπος (Μήκος)				
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Diphenyl/Biphenyl oxide	Diphenyl/Diphenyl oxide		DOWTHERM A
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)		293		318
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	393	393		393
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	50	50	75	75
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	104.500	158.000	155.000	
Κύκλος		Rankine (100bar)	Υβριδικός (ISCC)	
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας		Θέρμανση Ρευστού		
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης		Υγρόψυξη
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης		2 Δεξαμενές Αλάτων - Έμμεση		
Χωρητικότητα (hr)		7,5		0,5

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	Palma del Rio II	Saguaro Power Plant	SEGS I	SEGS II
Τοποθεσία	Κόρντομπα, Ισπανία	Αριζόνα, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2291	2636	2725	2725
Εταιρεία Κατασκευής	Acciona Energia	Arizona Public Service	Luz	Luz
Έναρξη Λειτουργίας	Δεκέμβριος 2010	Ιανουάριος 2006	Δεκέμβριος 1984	1985
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Acciona Solar Power	Starnet (LS-2)	Luz (LS-1)	Luz (LS-1)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)		100.000	82.960	190.338
Αριθμός Συλλεκτών	792	24		
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)		Schott Glass (Schott PTR70)		
Τύπος (Μήκος)		Κενού (4m)		
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Diphenyl/Biphenyl oxide	Xceltherm 600		
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)		120		
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	393	300	307	316
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	50	1	13,8	30
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)		2000		
Κύκλος		Οργανικός Rankine (2,23MPa)	Rankine με αναγέννηση (40bar)	Rankine με αναγέννηση (40bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας				
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη		
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης				
Χωρητικότητα (hr)				

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	SEGS III	SEGS IV	SEGS V	SEGS VI
Τοποθεσία	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2725	2725	2725	2725
Εταιρεία Κατασκευής	Luz	Luz	Luz	Luz
Έναρξη Λειτουργίας	Δεκέμβριος 1985	Φεβρουάριος 1989	Φεβρουάριος 1989	Φεβρουάριος 1989
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Luz (LS-2)	Luz (LS-2)	Luz (LS-2)	Luz (LS-2)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	230.300	230.300	250.500	188.000
Αριθμός Συλλεκτών				
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)
Τύπος (Μήκος)	Κενού (4m)	Κενού (4m)	Κενού (4m)	Κενού (4m)
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Therminol	Therminol	Therminol	Therminol
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)				
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	349	349	349	349
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	30	30	30	30
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)				
Κύκλος	Rankine με αναγέννηση (40bar)	Rankine με αναγέννηση (40bar)	Rankine με αναγέννηση (40bar)	Rankine με αναγέννηση (100bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Φυσικό Αέριο	Φυσικό Αέριο	Φυσικό Αέριο	Φυσικό Αέριο
Μέθοδος Ψύξης				
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης				
Χωρητικότητα (hr)				

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	SEGS VII	SEGS VIII	SEGS IX	Solnova 1
Τοποθεσία	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Σεβίλλη, Ισπανία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2725	2725	2725	2012
Εταιρεία Κατασκευής	Luz	Luz	Luz	Abengoa Solar
Έναρξη Λειτουργίας	Φεβρουάριος 1989	Δεκέμβριος 1989	Οκτώβριος 1990	Ιανουάριος 2009
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Luz (LS-2)	Luz (LS-3)	Luz (LS-3)	Abengoa Solar (Astro)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	194.280	464.340	483.960	300.000
Αριθμός Συλλεκτών				360
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)	Solel Solar Systems (Solel UVAC)	Schott
Τύπος (Μήκος)	Κενού (4m)	Κενού (4m)	Κενού (4m)	
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Therminol	Therminol	Therminol	Θερμικό Έλαιο
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)				
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	390	390	390	393
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	30	80	80	50
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)				113.520
Κύκλος	Rankine με αναγέννηση (100bar)	Rankine με αναγέννηση (100bar)	Rankine με αναγέννηση (40bar)	Rankine (100bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Φυσικό Αέριο	Φυσικό Αέριο	Φυσικό Αέριο	Βραστήρας HTF
Μέθοδος Ψύξης				Υγρόψυξη
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης				
Χωρητικότητα (hr)				

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	Solnova 3	Solnova 4	Andasol-3	EL REBOSO II
Τοποθεσία	Σεβίλλη, Ισπανία	Σεβίλλη, Ισπανία	Γρανάδα, Ισπανία	Σεβίλλη, Ισπανία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2012	2012	2200	2200
Εταιρεία Κατασκευής	Abengoa Solar	Abengoa Solar	Ferrostaal AG	Bogaris
Έναρξη Λειτουργίας	Ιανουάριος 2009	Ιανουάριος 2009	Ιούνιος 2011	Οκτώβριος 2011
Συλλέκτες				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Abengoa Solar (Astro)	Abengoa Solar (Astro)		(SKALET 150)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	300.000	300.000		319.057
Αριθμός Συλλεκτών	360	360	640	368
Δέκτης				
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Schott	Schott		
Τύπος (Μήκος)				
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Θερμικό Έλαιο	Θερμικό Έλαιο		Diphenyl / Biphenyl oxide
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)				296
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	393	393		393
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	50	50	50	50
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	113.520	113.520		
Κύκλος	Rankine (100bar)	Rankine (100bar)	Rankine	Rankine (100bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Βραστήρας HTF	Βραστήρας HTF		Φυσικό Αέριο
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη		Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης				
Χωρητικότητα (hr)			7,5	

Πίνακας 3.5.2 (Συνέχεια)

Μονάδα	Lebrija 1	Palma del Rio I	Manchasol-2
Τοποθεσία	Σεβίλλη, Ισπανία	Κόρντομπα, Ισπανία	Ciudad Real, Ισπανία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	1993	2291	2208
Εταιρεία Κατασκευής	Solucia Renovables 1, S.L.	Acciona Energia	ACS/Cobra Group
Έναρξη Λειτουργίας	Μάιος 2010	2011	Μάιος 2010
Συλλέκτες			
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Solel	Acciona Solar Power	Cobra Instalaciones y Servicios (Senertrough)
Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	412.020		510.120
Αριθμός Συλλεκτών	756	792	624
Δέκτης			
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Solel		Schott
Τύπος (Μήκος)			
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Therminol VP1	Biphenyl/Diphenyl oxide	Diphenyl/Diphenyl oxide
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)			293
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	395	393	393
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος			
Ισχύς (MW)	50	50	50
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	120.000	114.500	158.000
Κύκλος	Rankine (100bar)		Rankine (100bar)
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Θερμαντήρας HTF		Θερμαντήρας HTF
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης
Αποθήκευση Ενέργειας			
Τύπος Αποθήκευσης			2 Δεξαμενές - Έμμεση
Χωρητικότητα (hr)			7,5

Πίνακας 3.5.3: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης υπό κατασκευή

Μονάδα	Εταιρεία Κατασκευής	Τοποθεσία	Ισχύς (MW)	Έναρξη Λειτουργίας
Abengoa Mojave Solar Project	Mojave Solar, LLC ; Abengoa Solar, Inc.	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	250	Ιανουάριος 2013
Andasol-4	ACS/Cobra Group	Γρανάδα, Ισπανία	50	Ιανουάριος 2020
Arcosol 50	Torresol	Καντίζ, Ισπανία	50	Ιανουάριος 2020
Helios I	Helios I HYPERION Energy Investments, S.L.	Ciudad Real, Ισπανία	50	
Helios II	Helios II HYPERION Energy Investments, S.L.	Ciudad Real, Ισπανία	50	
ISCCS Al Kuraymat	NREA	Αίγυπτος	140	Δεκέμβριος 2012
Vallesol 50	Torresol	Καντίζ, Ισπανία	50	

Πίνακας 3.5.4: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών παραβολικής σκάφης υπό ανάπτυξη

Μονάδα	Εταιρεία Κατασκευής	Τοποθεσία	Ισχύς (MW)	Έναρξη Λειτουργίας
Extresol-3	ACS/Cobra Group	Badajoz, Ισπανία	50	
Genesis SEP	Genesis Solar, LLC, NextEra Energy Resources LLC	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	250	2014
NextEra Beacon SEP	NextEra Energy	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	250	2014
Palen Solar Power Project	Solar Millennium LLC, Chevron Energy Solutions	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	500	Ιανουάριος 2014
Palmdale Hybrid Power Plant	Inland Energy Inc.	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	50	2013
Shams 1	Masdar/Total/Abengoa Solar joint venture	Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	100	2012
Solana	Abengoa Solar	Αριζόνα, ΗΠΑ	280	Ιανουάριος 2013
UA Tech Park Thermal Storage Demonstration Project	Bell Independent Power Corp.	Αριζόνα, ΗΠΑ	5	Δεκέμβριος 2012
Victorville 2 Hybrid Power Plant	Inland Energy Inc.	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	50	2013

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συλλεκτών παραβολικής σκάφης

Στα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων συλλογής και εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας συγκαταλέγονται τα:

- Ωριμότητα τεχνολογίας: Οι εγκαταστάσεις συλλεκτών παραβολικής σκάφης συνοδεύονται από ελάχιστο κίνδυνο επένδυσης, καθώς έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1980.
- Αρθρωτή εγκατάσταση: Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται οι συλλέκτες (σε κλειστούς βρόχους, σχηματίζοντας σειρές συλλεκτών) επιτρέπει την επέκταση του πεδίου, με απλή προσθήκη επιπλέον βρόχων, δίνοντας μεγάλη ευελιξία σε ότι αφορά στην κλίμακα της εγκατάστασης.
- Δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης: Οι εγκαταστάσεις συλλεκτών παραβολικής σκάφης μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε μέρος του ρευστού μεταφοράς θερμότητας να αποθηκεύεται σε μία ή περισσότερες δεξαμενές για χρήση στον κύκλο ισχύος όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ή κατά τις νυχτερινές ώρες, αυξάνοντας τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης σε υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές εγκαταστάσεις και υβριδική λειτουργία: Οι συλλέκτες παραβολικής σκάφης μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε ήδη υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές μονάδες, παρέχοντας θερμότητα μέσω εναλλακτών (ή παράγοντας ατμό άμεσα στο μέλλον, μέσω της τεχνολογίας DSG) ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους τους επιτρέπει να συνεργάζονται με όλους τους κύκλους Rankine, Rankine με αναγέννηση και υπερθέρμανση, και οργανικούς κύκλους Rankine. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης συμβατικών καυσίμων για τη θέρμανση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, η υβριδική δηλαδή λειτουργία των συλλεκτών.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα και περιορισμοί των συλλεκτών παραβολικής σκάφης είναι:

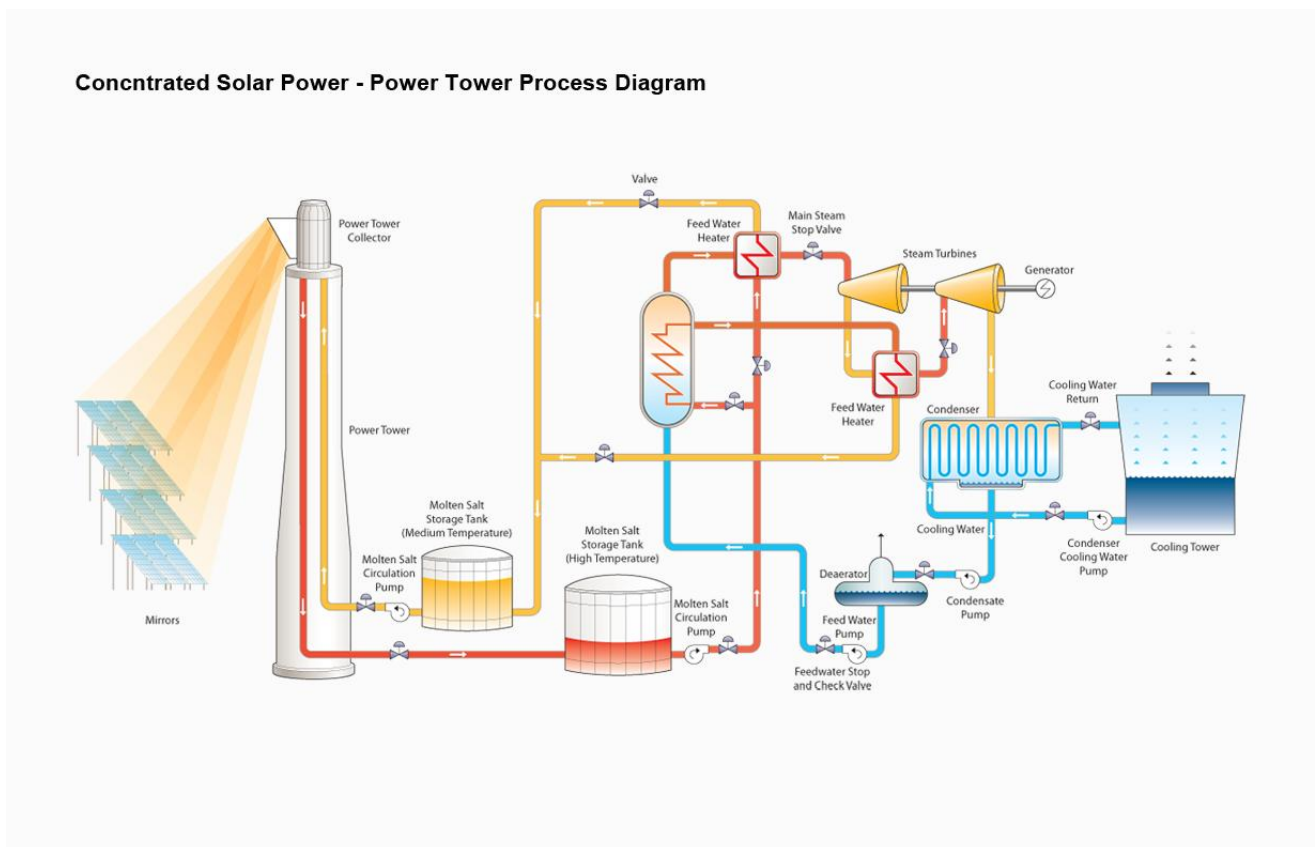
- Η δυνατότητα περιστροφής των συλλεκτών γύρω από έναν μόνο άξονα: Αυτό παρ' ότι μειώνει το κόστος και την πολυπλοκότητα των μηχανισμών κίνησης και των αντίστοιχων συστημάτων ελέγχου, εντούτοις οδηγεί σε σημαντικές απώλειες συνημιτόνου κατά τους χειμερινούς μήνες (σε μία εγκατάσταση τοποθετημένη στη διεύθυνση Βορρά-Νότου)
- Απαιτήση για σημαντικές εκτάσεις: Όπως φαίνεται και στους πίνακες με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, η επιφάνεια των συλλεκτών είναι ιδιαίτερα υψηλή σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η πραγματική έκταση που καταλαμβάνουν οι συλλέκτες είναι πολλές φορές υπερδιπλάσια της επιφάνειάς τους (ώστε να περιορίζονται οι απώλειες σκίασης), αυξάνει το κόστος κεφαλαίου και περιορίζει την εγκατάστασή τους σε περιοχές όπου τέτοιες εκτάσεις είναι διαθέσιμες.

3.5.2. ΗΛΙΑΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ (SOLAR POWER TOWERS)

Οι ηλιακοί πύργοι ισχύος (ή συστήματα κεντρικού δέκτη) είναι μία ηλιοθερμική διάταξη υπό εξέλιξη. Σε αντίθεση με τα παραβολικά κάτοπτρα, τα οποία εξελίσσονται και εφαρμόζονται ευρύτατα στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (στα πλαίσια, βέβαια, της περιορισμένης διείσδυσης της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο και της καθιέρωσής της ως εναλλακτικής και βιώσιμης πηγής ενέργειας) ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι ηλιακοί πύργοι έχουν βρει, προς το παρόν, περιορισμένη εφαρμογή ως εμπορικά εκμεταλλεύσιμες ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις. Στο άμεσο μέλλον, αυτό αναμένεται να αλλάξει όταν εφαρμοστούν οικονομίες κλίμακας στην κατασκευή των εξαρτημάτων τους, καθιστώντας τους ανταγωνιστικούς, ενώ και η έρευνα σε αυτή την τεχνολογία είναι συνεχής, αποδίδοντας διαρκώς αποδοτικότερα κάτοπτρα και βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους κατασκευής και λειτουργίας τους.

Περιγραφή - Αρχή Λειτουργίας Συστήματος

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της δομής ενός συστήματος ηλιακού πύργου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5.10: Διάγραμμα ροής διεργασιών ηλιοθερμικής εγκατάστασης ηλιακού πύργου
(Πηγή: www.flowserve.com)

Στους ηλιακούς πύργους, η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται μέσω της ανάκλασής της από εκατοντάδες ή και χιλιάδες ανακλαστικά κάτοπτρα (τους λεγόμενους

ηλιοστάτες) σε δέκτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός μεταλλικού ή τοιμεντένιου πύργου. Όλοι οι ηλιοστάτες εστιάζουν στο ίδιο σημείο (στην πραγματικότητα σε μία πεπερασμένη περιοχή του δέκτη) ενώ ο δέκτης είναι κοινός για όλα τα κάτοπτρα, και για το λόγο αυτό τα συστήματα ηλιακών πύργων κατατάσσονται ως συστήματα κεντρικού δέκτη, σημειακής εστίασης. Στους αγωγούς της απορροφητικής επιφάνειας του δέκτη κυκλοφορεί ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο θερμαίνεται με την προσθήκη της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας των κατόπτρων και μεταφέρεται σε εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου ισχύος και την παραγωγή ατμού σε ατμοηλεκτρική μονάδα.

Ιστορική ανασκόπηση

Αν και η τεχνολογία των ηλιακών πύργων είναι λιγότερο ώριμη από εκείνη των παραβολικών κατόπτρων, με αποτέλεσμα την έλλειψη εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας, σε πολλές χώρες έχουν κατασκευαστεί μία σειρά από πειραματικές εγκαταστάσεις, από τις αρχές της δεκαετίας του '80, μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του '90^[13]. Οι εγκαταστάσεις αυτές χρησίμευσαν ως πλατφόρμες μελέτης και δοκιμών επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης, καθώς και ως εγκαταστάσεις επίδειξης της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας της τεχνολογίας. Οι κυριότερες από αυτές, με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Project	Χώρα	Ισχύς Εξόδου (MWe)	Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Μέσο Αποθήκευσης	Έναρξη Λειτουργίας
SSPS	Ισπανία	0,5	Υγρό Νάτριο	Νάτριο	1981
EURELIOS	Ιταλία	1	Ατμός	Νιτρικό Άλας/Νερό	1981
SUNSHINE	Ιαπωνία	1	Ατμός	Νιτρικό Άλας/Νερό	1981
Solar One	ΗΠΑ	10	Ατμός	Έλαιο/Πέτρωμα	1982
CESA-1	Ισπανία	1	Ατμός	Νιτρικό Άλας	1983
MSEE/Cat B	ΗΠΑ	1	Τήγμα Νιτρικού Άλατος	Νιτρικό Άλας	1984
THEMIS	Γαλλία	2,5	Hi-Tec Άλατα	Hi-Tec Άλατα	1984
SPP-5	Ρωσία	5	Ατμός	Νερό/Ατμός	1986
TSA	Ισπανία	1	Αέρας	Κεραμικό	1993
Solar Two	ΗΠΑ	10	Τήγμα Νιτρικού Άλατος	Νιτρικό Άλας	1996

Πίνακας 3.5.5: Πειραματικοί Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος (Πηγή: "Solar Power Tower". SolarPACES, An Implementing Agreement of the International Energy Agency)

Η πρώτη εγκατάσταση ηλιακού πύργου που απέδειξε τη δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ήταν η εγκατάσταση Solar One στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η εγκατάσταση χρησιμοποιούσε 1818 ηλιοστάτες, επιφάνειας 39,3m² ο καθένας, οι οποίοι ανακλούσαν την ακτινοβολία σε δέκτη τοποθετημένο σε πύργο ύψους 90,8m^[13]. Η εγκατάσταση παρήγαγε ατμό σε θερμοκρασία 516°C, και είχε μέγιστη θερμική ισχύ 42MW^[1]. Η εγκατάσταση πέτυχε τους αντικειμενικούς της στόχους, οι οποίοι ήταν η απόδειξη της δυνατότητας παραγωγής ισχύος με ηλιακούς πύργους και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 10MWe για 8 και για 4 συναπτες ώρες κατά το θερινό και κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα, ωστόσο η συνολική της απόδοση άγγιζε μόλις το 7%, ενώ και ο συντελεστής χωρητικότητάς της ήταν πολύ χαμηλός, λόγω μη αποδοτικού συστήματος αποθήκευσης.

Το 1996 ετέθη σε λειτουργία το Solar Two, μία τροποποιημένη εκδοχή του Solar One. Ο πύργος, ο ατμοστρόβιλος και το πεδίο ηλιοστατών του Solar One δε δέχθηκαν σημαντικές τροποποιήσεις, αλλά ο δέκτης και το σύστημα αποθήκευσης επανασχεδιάστηκαν ώστε να κάνουν χρήση τήγματος

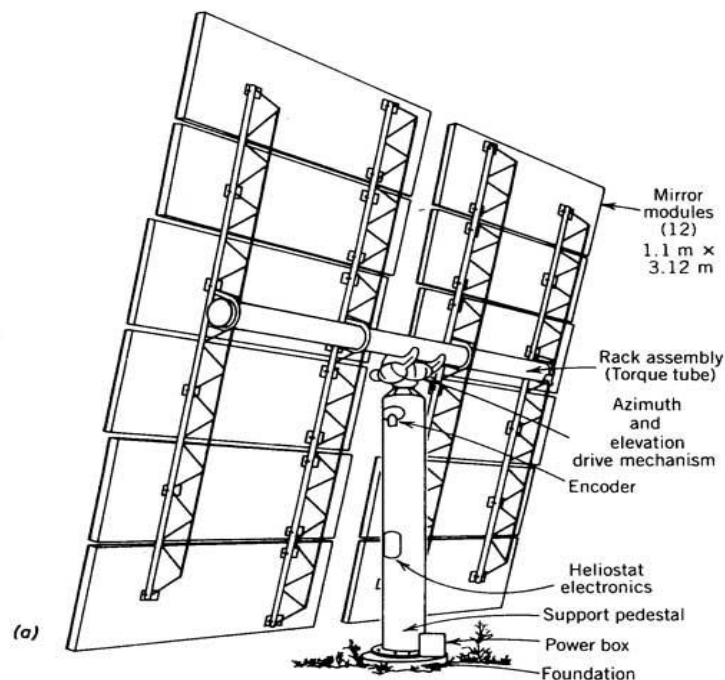
νιτρικών αλάτων, κάτι που βελτίωσε σημαντικά την απόδοση και τη δυνατότητα του συστήματος να παράγει ισχύ και κατά τις ώρες που δεν υπήρχε ηλιοφάνεια.

Ηλιοστάτες

Τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται για την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας ονομάζονται ηλιοστάτες. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 που ξεκίνησε η έρευνα γύρω από τους ηλιακούς πύργους έχουν προταθεί πολλές κατασκευαστικές διαμορφώσεις των ηλιοστατών^[14]. Οι δύο διαμορφώσεις που έχουν βρει εφαρμογή είναι:

- Οι ηλιοστάτες γυαλιού/μετάλλου (glass/metal heliostats), και
- Οι ηλιοστάτες τανυσμένης μεμβράνης (stretched membrane heliostats)

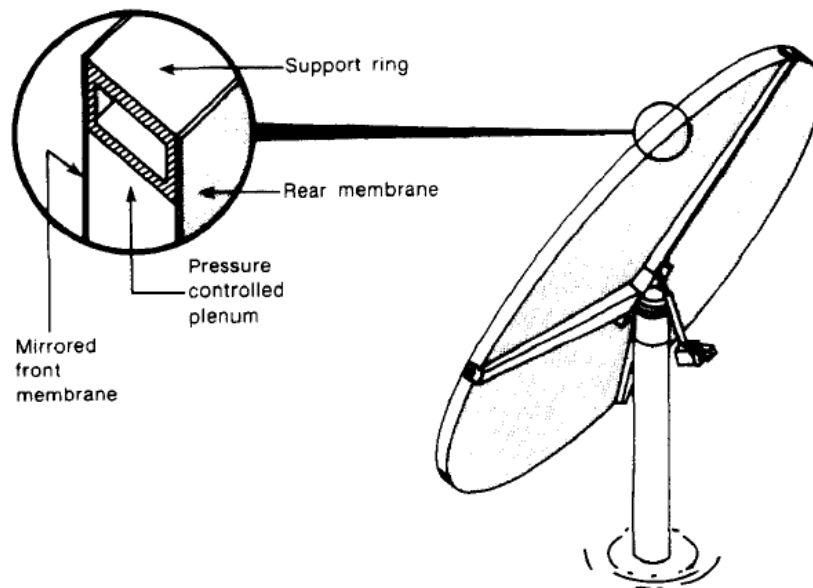
Στους πρώτους, η ανακλαστική επιφάνεια αποτελείται από υλικό υψηλού δείκτη ανάκλασης, κάτω από γυάλινη επιφάνεια χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο και υψηλής διαπερατότητας. Η ανακλαστική επιφάνεια επικολλάται μέσω κατάλληλης συγκολλητικής ουσίας σε μεταλλική βάση στήριξης, η οποία σχηματίζει και τη γεωμετρία του ηλιοστατή. Η συνολική επιφάνεια ανάκλασης του ηλιοστατή αποτελείται από ένα ή περισσότερα τέτοια κάτοπτρα. Παράδειγμα ηλιοστατή γυαλιού/μετάλλου, με τα κυριότερα εξαρτήματά του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5.11: Οπίσθια όψη ηλιοστατή της εγκατάστασης Solar Two στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Οι ηλιοστάτες τανυσμένης μεμβράνης διαφέρουν από τους συμβατικούς ηλιοστάτες γυαλιού/μετάλλου στο ότι η οπτική τους επιφάνεια ορίζεται από ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο τανυσμένο γύρω από ένα δακτύλιο. Στις πρώτες υλοποιήσεις αυτής της διαμόρφωσης, το μεταλλικό φύλλο καλυπτόταν από διαφανές πολυμερικό φιλμ, ενισχυμένο με υλικό υψηλού δείκτη ανάκλασης (όπως είναι ο άργυρος και το αλουμίνιο)^[15], ενώ η τελική μορφή του κατόπτρου πραγματοποιούνταν

με εφαρμογή υποπίεσης μεταξύ των δύο μεταλλικών φύλλων και το σχηματισμό της κοίλης επιφάνειας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5.12: Σχηματικό διάγραμμα ηλιοστάτη τανυσμένης μεμβράνης (Πηγή: *“The development of stretched-membrane heliostats in the United States”*, D.J. Alpert et al, 1990)

Αν και αυτού του τύπου οι ηλιοστάτες επιτυγχάνουν πολύ καλύτερη προσέγγιση της παραβολικής γεωμετρίας σε σχέση με τους ηλιοστάτες γυαλιού μετάλλου, το εκτεθειμένο πολυμερικό φιλμ σύντομα εμφάνισε προβλήματα αποδόμησης κατά την έκθεσή του στην υπεριώδη ακτινοβολία^{[14],[15]}, και για το λόγο αυτό αντικαστάθηκε από λεπτή στρώση υάλου, γεγονός όμως που αύξησε το κόστος του.

Ανεξαρτήτως της κατασκευαστικής τους διαμόρφωσης, οι ηλιοστάτες διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης σε δύο άξονες. Τα δύο συστήματα αξόνων που χρησιμοποιούνται συννηθέστερα είναι το σύστημα ύψους-αζιμουθίου^[1], και το σύστημα του οποίου ο ένας άξονας συμπίπτει με τη διεύθυνση της νοητής γραμμής ηλιοστάτη-δέκτη (target-aligned axis heliostats)^[16]. Η κίνηση των ηλιοστατών γίνεται μέσω βηματικών κινητήρων^{[1],[17]}, ενώ ο έλεγχος πραγματοποιείται ψηφιακά μέσω υπολογιστή.

Το μέγεθος των ηλιοστατών προκύπτει από διαδικασία βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση του κόστους τους. Το κόστος των ηλιοστατών διακρίνεται σε κόστος ανάλογα με τον αριθμό των ηλιοστατών (όπως π.χ. τα κόστη των κινητήρων, των συστημάτων ελέγχου, και τα κόστη καλωδιώσεων) και σε κόστη ανά μονάδα επιφάνειας (π.χ. το κόστος των κατόπτρων, κόστος γης), επομένως ο αριθμός των ηλιοστατών άρα και η επιφάνεια του κάθε ηλιοστάτη προκύπτει από αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος^[18].

Πεδίο ηλιοστατών

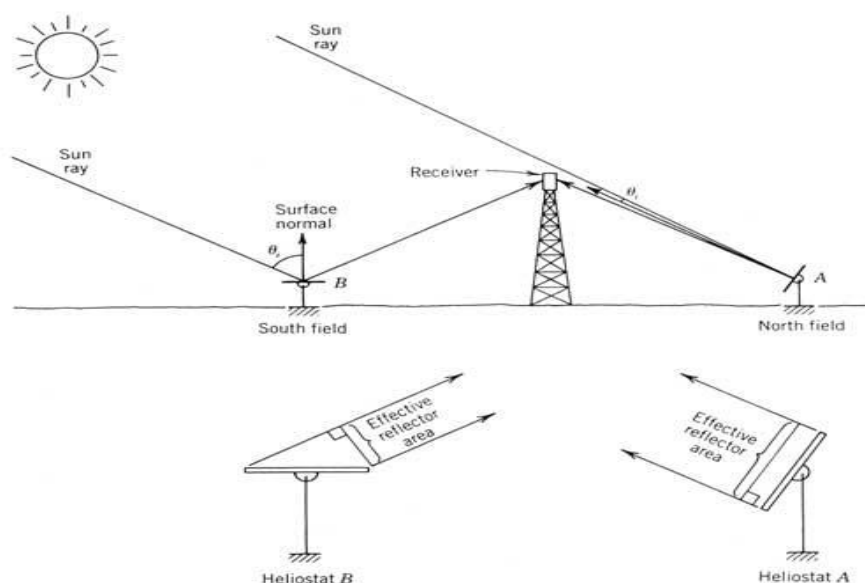
Οι ηλιοστάτες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του κόστους επένδυσης σε μία εγκατάσταση ηλιακού πύργου (περίπου το 50%^[17] έως 80%^[19]). Επομένως, πέρα από τη σχεδίαση των μεμονωμένων ηλιοστατών ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, εξαιρετικής σημασίας είναι και η σχεδίαση, και συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση, του συνολικού πεδίου των ηλιοστατών, έτσι ώστε να δίνει την αποδοτικότερη δυνατή διαμόρφωση.

Το γεγονός ότι όλοι οι ηλιοστάτες ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα κεντρικό δέκτη αυξάνει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών για τη συνολική απόδοση του πεδίου, καθώς μεγέθη όπως η απόσταση του κάθε ηλιοστάτη από το δέκτη, ή το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας μεταβάλλονται από ηλιοστάτη σε ηλιοστάτη ανάλογα με τη θέση του στο πεδίο και τη σχετική θέση πύργου και ηλιακού δίσκου ως προς το σύστημα συντεταγμένων του. Από τη δεκαετία του 1970, όταν και ξεκίνησαν οι μελέτες για αυτές τις εγκαταστάσεις, έχουν αναπτυχθεί πακέτα λογισμικού για τον υπολογισμό της απόδοσης του πεδίου ηλιοστατών αλλά και για τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσής του, την εύρεση δηλαδή της καλύτερης δυνατής τοποθέτησης των ηλιοστατών γύρω από τον πύργο. Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνονται τα πακέτα HELIOS, MIRVAL, DESL2, DELSOL3, WinDELSOL 1.0, SOLTRACE, MUEEN, SENSOL και HLF^{[1],[19]}. Χωρίς να μπούμε σε λεπτομέρειες για τον τρόπο που γίνονται οι υπολογισμοί σε κάθε πρόγραμμα, θα εξετάσουμε τις σημαντικότερες παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση του πεδίου.

Οι κυριότερες πηγές απωλειών κατά την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από τους ηλιοστάτες στον πύργο είναι:

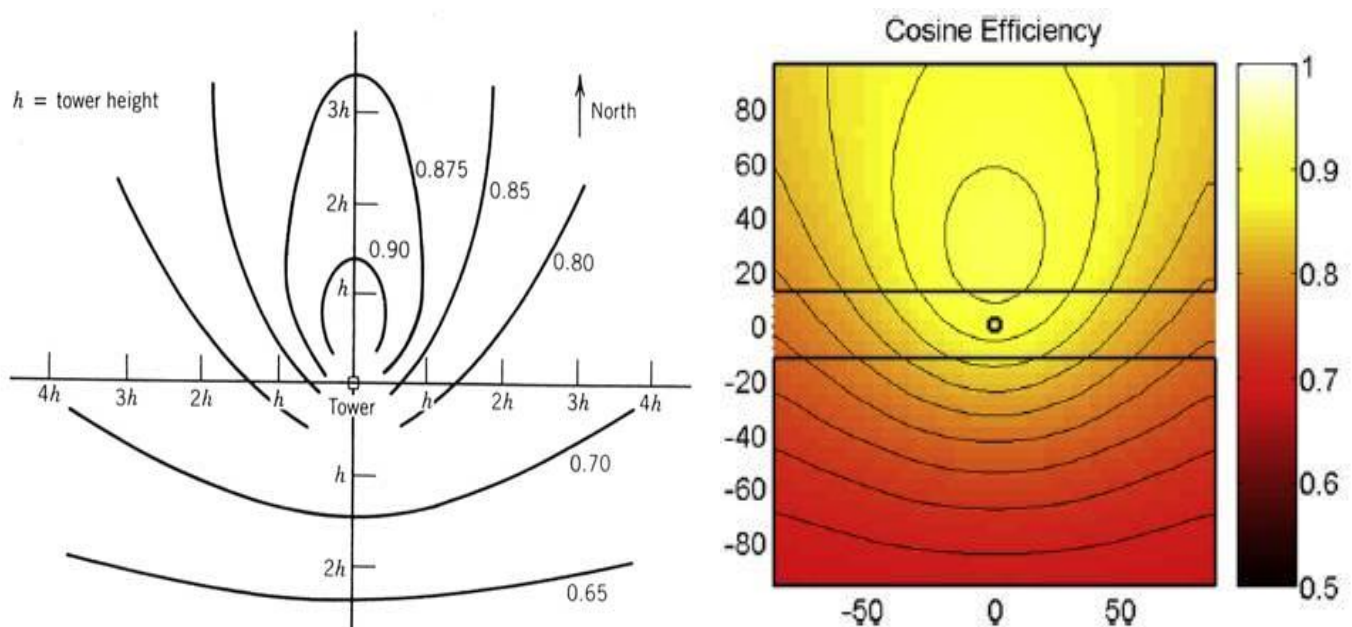
i. Φαινόμενο συνημιτόνου

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η επίδραση που έχει η σχετική θέση ηλιοστατών, πύργου και ηλιακού δίσκου στην ποσότητα ακτινοβολίας που ανακλάται από τον ηλιοστάτη στο δέκτη του πύργου.



Σχήμα 3.5.13: Το φαινόμενο συνημιτόνου για ηλιοστάτες εκατέρωθεν του ηλιακού πύργου (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Το φαινόμενο συνημιτόνου, η μείωση δηλαδή της πραγματικής ανακλαστικής επιφάνειας κατά παράγοντα ίσο με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της καθέτου της επιφάνειας και της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως εξηγήθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, είναι ο κύριος παράγοντας απώλειών ενέργειας στο πεδίο των ηλιοστατών^[1]. Οι ηλιοστάτες προσανατολίζονται από το μηχανισμό ελέγχου και κίνησης έτσι ώστε η κάθετος στην επιφάνειά τους να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και η νοητή ευθεία από τον ηλιοστάτη στο δέκτη. Επομένως, η προβολή της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη σε επίπεδο κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ίση με την επιφάνεια ανοίγματος του ηλιοστάτη επί το συνημίτονο του ήμισυ αυτής της γωνίας, και βαίνει μειούμενη όσο η γωνία αυτή αυξάνεται. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5.13, ο ηλιοστάτης στα νότια του πύργου παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες απώλειες συνημιτόνου από εκείνον στα βόρεια του, και επομένως ανακλά πολύ μικρότερες ποσότητες ακτινοβολίας στο δέκτη. Υπολογίζοντας τις απώλειες συνημιτόνου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για διάφορες θέσεις ηλιοστατών, προκύπτουν ζώνες γύρω από τον κεντρικό πύργο στις οποίες οι απώλειες έχουν την ίδια τιμή, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:

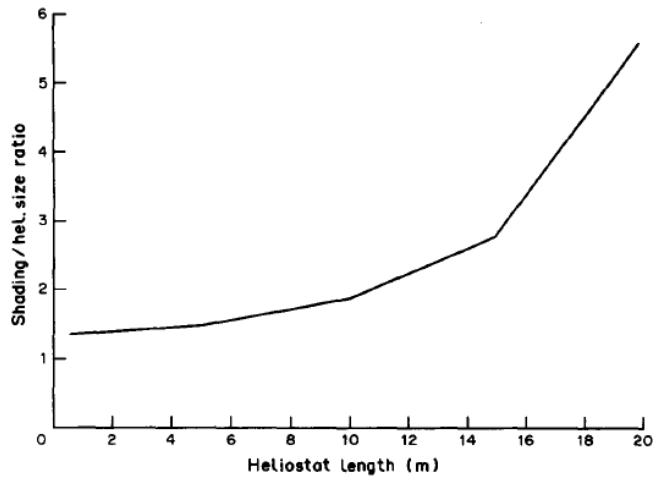


Σχήμα 3.5.14: (α) Απόδοση συνημιτόνου του πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Solar One στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986), (β) Απόδοση συνημιτόνου του πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Sierra Suntower στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: "Design and evaluation of esolar's heliostat fields", Steve Schell, 2011)

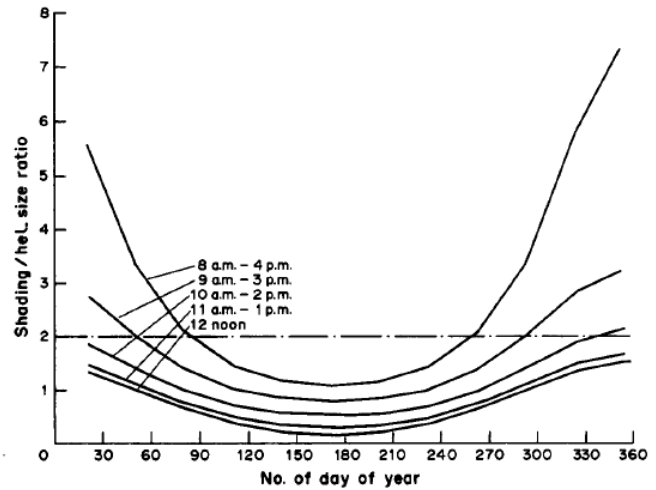
ii. Απώλειες λόγω σκίασης και παρεμβολής

Αυτές προκύπτουν από τη χωροθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο και από τη σχετική τους θέση. Οι απώλειες σκίασης είναι σημαντικές σε μικρές γωνίες ηλιακού ύψους, όταν η σκιά των ηλιοστατών προβάλλεται και καλύπτει μέρος της επιφάνειας των ηλιοστατών που βρίσκονται πίσω από αυτούς. Οι απώλειες παρεμβολής αυξάνονται όσο πυκνότερα διατεταγμένοι είναι οι ηλιοστάτες στο πεδίο, με αποτέλεσμα μέρος της επιφάνειάς τους να παρεμβάλλεται στην ακτινοβολία που θα προσέπιπτε σε γειτονικούς τους ηλιοστάτες, ενώ είναι προφανώς και συνάρτηση του μεγέθους τους. Στο

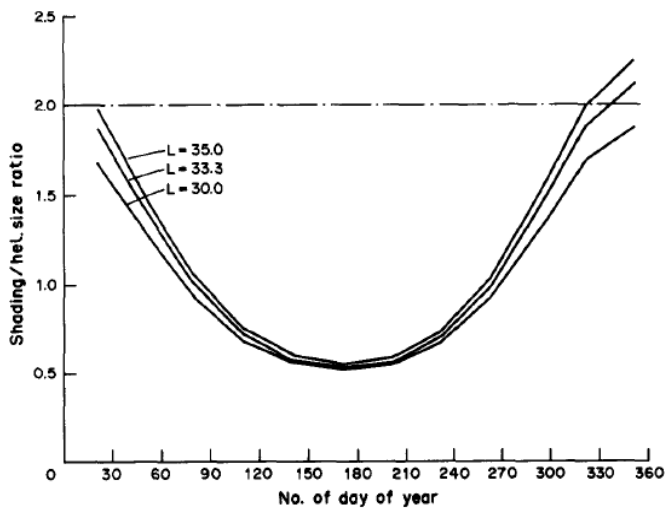
παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του παράγοντα σκίασης με το μέγεθος των ηλιοστατών, την ημέρα του χρόνου και το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης του ηλιακού πύργου, καθώς και η συνολική απόδοση σκίασης και παρεμβολής όπως προκύπτει από πρόγραμμα βελτιστοποίησης του πεδίου ηλιοστατών:



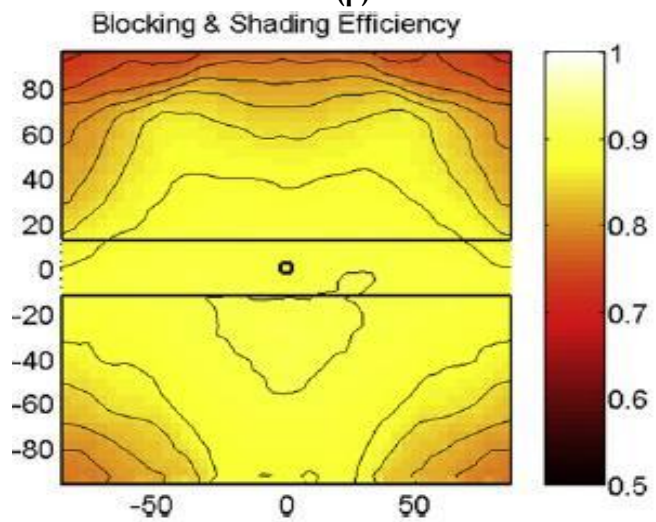
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 3.5.15: (α) Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με τη μεταβολή του μεγέθους του ηλιοστάτη, (β) Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με την ώρα και ημέρα του χρόνου, (γ) Μεταβολή του παράγοντα σκίασης με το γεωγραφικό πλάτος (Πηγή: “Theoretical study of main factors affecting the heliostat field design of tower power plant”, Basil F. Ali, 1990), (δ) Απόδοση σκίασης και παρεμβολής του πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Sierra Suntower στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: “Design and evaluation of esolar’s heliostat fields”, Steve Schell, 2011).

Η απόδοση σκίασης η_{shade} και παρεμβολής η_{block} ορίζονται ως η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο πεδίο των ηλιοστατών προς αυτή που θα προσέπιπτε σε επιφάνεια ίση με τη συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών.

iii. Απώλειες λόγω εξασθένησης της ακτινοβολίας

Από τις προηγούμενες παραγράφους προκύπτει το συμπέρασμα ότι μία αποδοτική διάταξη του πεδίου ηλιοστατών στο χώρο θα ήταν μία αραιά τοποθετημένη διάταξη μικρών ηλιοστατών στα βόρεια του πύργου, με αυξανόμενη απόσταση από τον πύργο, όσο οι απαιτήσεις ισχύος της εγκατάστασης αυξάνονται. Κάτι τέτοιο όμως, πέρα από την προφανή αύξηση του κόστους λόγω της αύξησης της έκτασης γης που θα απαιτούσε η εγκατάσταση, έχει και άλλη μία παρενέργεια: την εξασθένηση της ακτινοβολίας που φθάνει από τους ηλιοστάτες στο δέκτη, λόγω της αύξησης της απόστασης των πρώτων από τον τελευταίο. Αυτή συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης μάζας αέρα που πρέπει να διαπεράσει η ακτινοβολία κατά την ανάκλασή της (όπως εξηγήθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο), και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έχουν προταθεί οι κάτωθι σχέσεις για τον υπολογισμό της οπτικής διαπερατότητας τ_a της ατμόσφαιρας, ανάλογα με την καθαρότητά της:

- Για ορατότητα σε απόσταση 5km^[1]:

$$\tau_a = 0,98707 - 0,2748S + 0,03394S^2 \quad (3.5.2.1)$$

- Για ορατότητα σε απόσταση 23km^[1]:

$$\tau_a = 0,99326 - 0,1046S + 0,017S^2 - 0,002845S^3 \quad (3.5.2.2)$$

- Για ορατότητα σε απόσταση 40km^[19]:

$$\tau_a = 0,99321 - 0,0001176S + 1,97 \cdot 10^{-8} S^2 \quad (S \leq 1000m) \quad (3.5.2.3)$$

$$\tau_a = e^{-0,0001106S} \quad (S > 1000m)$$

όπου S η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του ηλιοστάτη και του δέκτη (ως μέτρο διανύσματος)

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η **απόδοση εξασθένησης (attenuation) η_{att}** , ως η ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του δέκτη μετά από ανάκλαση σε ηλιοστάτη σε απόσταση S από αυτόν, προς την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιοστάτη.

iv. Απώλειες λόγω σφαλμάτων

Όπως είδαμε και στην περίπτωση των συλλεκτών παραβολικής σκάφης, έτσι και στους ηλιακούς πύργους υπεισέρχονται ένα πλήθος κατασκευαστικών, οπτικών και άλλων σφαλμάτων τα οποία οδηγούν στην απόκλιση μέρους της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τον επιθυμητό στόχο (δηλαδή, την επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη). Το άθροισμα αυτών των σφαλμάτων οδηγούν σε απώλειες ενέργειας στο δέκτη, το μέγεθος των οποίων μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του **βαθμού απόδοσης ανακοπήs $\eta_{intercept}$** . Ο βαθμός απόδοσης ανακοπήs μπορεί να προσδιοριστεί από την ολοκλήρωση

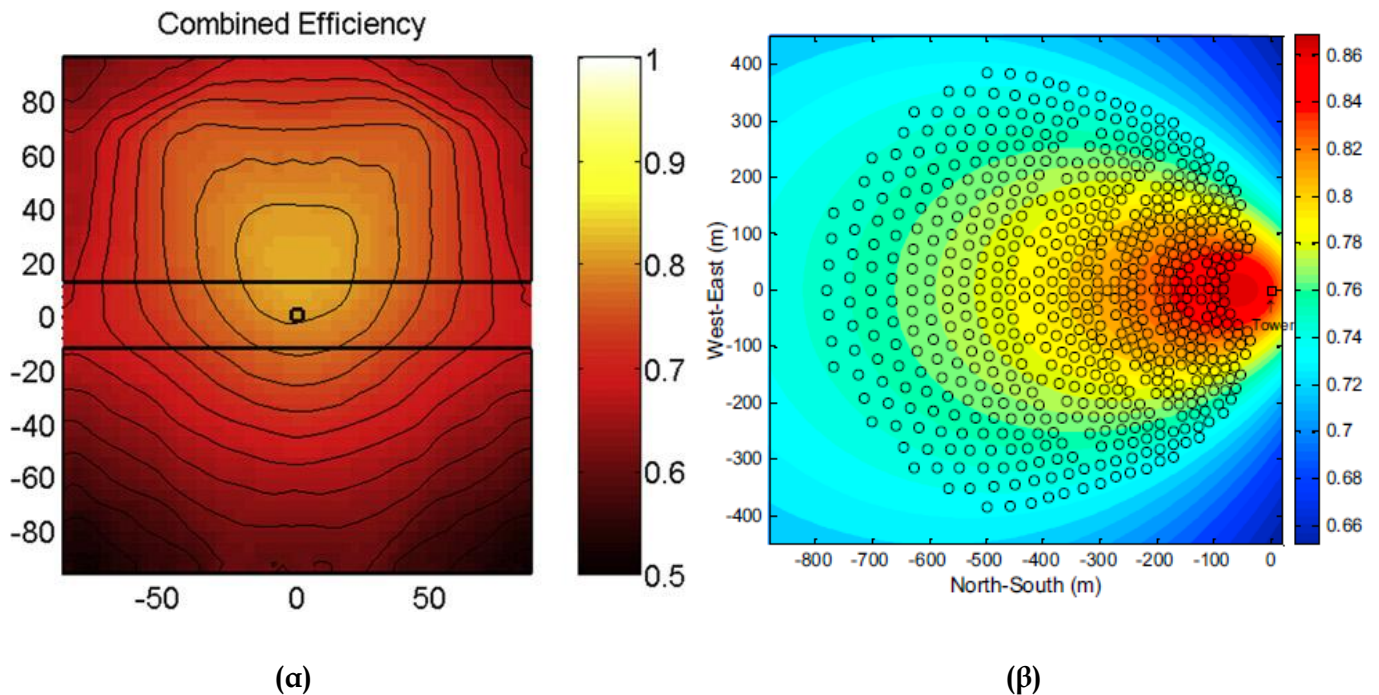
της κατανομής της ροής ακτινοβολίας στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη (όταν η κατανομή θεωρείται Γκαουσιανή), μέσω της σχέσης^[21]:

$$\eta_{intercept} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_{tot}^2} \int_{(x)} \int_{(y)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma_{tot}^2}\right) dx dy \quad (3.5.2.4)$$

Η συνολική απόδοση του πεδίου των ηλιοστατών η_{field} ορίζεται ως το γινόμενο όλων των επιμέρους αποδόσεων των παραγόντων που προκαλούν απώλειες ακτινοβολίας κατά την ανάκλαση από τους ηλιοστατές στο δέκτη ως εξής:

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \cdot \eta_{shade} \cdot \eta_{block} \cdot \eta_{att} \cdot \eta_{intercept} \quad (3.5.2.5)$$

Η συνολική απόδοση του πεδίου υπολογίζεται, όπως αναφέρθηκε, μέσω λογισμικού το οποίο λαμβάνει υπόψιν παραμέτρους όπως η διάταξη των ηλιοστατών, το μέγεθός τους, η πυκνότητα του πεδίου, και το ύψος του κεντρικού πύργου. Αποτελέσματα τέτοιων υπολογισμών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5.16: (α) Απόδοση πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης Sierra Suntower στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: “Design and evaluation of esolar’s heliostat fields”, Steve Schell, 2011), (β) Απόδοση πεδίου ηλιοστατών της εγκατάστασης PS10 στην Ισπανία (Πηγή: “A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant”, Xiudong Wei et al, 2010)

Η **οπτική απόδοση** η_{opt} κατά την ανάκλαση της ακτινοβολίας από το πεδίο ηλιοστατών στο δέκτη ορίζεται από σχέση ανάλογης της (3.5.1.23) για τους συλλέκτες παραβολικής σκάφης ως:

$$\eta_{opt} = \frac{\dot{E}_{opt}}{\dot{E}_{inc}} = \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \eta_{field} \quad (3.5.2.6)$$

όπου:

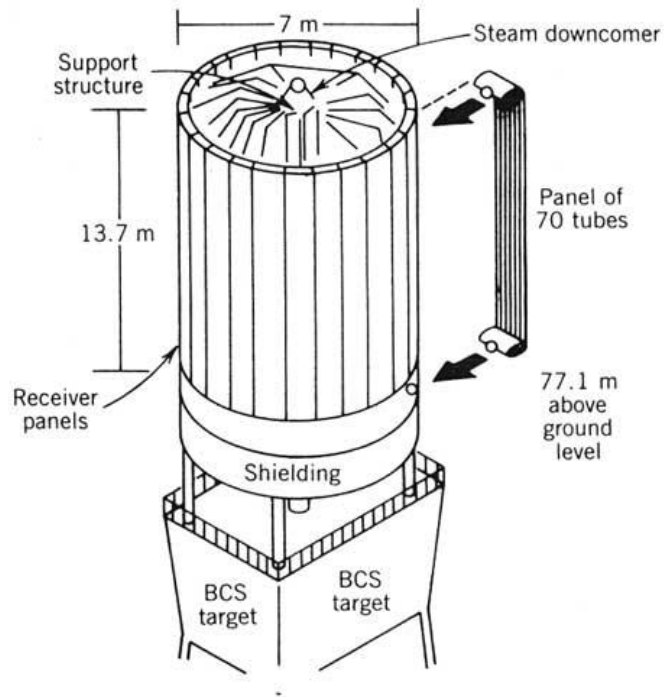
- ρ : Ο συντελεστής ανάκλασης του υλικού των κατόπτρων
- τ : Η οπτική διαπερατότητα τυχόν διαφανών επιφανειών μεταξύ κατόπτρων και δέκτη
- α : Η απορροφητικότητα της επιφάνειας του δέκτη

Δέκτες

Ο δέκτης, τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου, βρίσκεται στο σημείο όπου η ανακλώμενη ακτινοβολία από τους ηλιοστάτες μπορεί να απορροφηθεί πιο αποδοτικά. Ο δέκτης απορροφά την ενέργεια ακτινοβολίας στην επιφάνειά του, την οποία μετατρέπει σε θερμική και μεταφέρει σε ρευστό μεταφοράς υπό τη μορφή θερμότητας. Σε χρήση στις εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, βρίσκονται δύο τύποι δεκτών^[1]:

Εξωτερικοί δέκτες

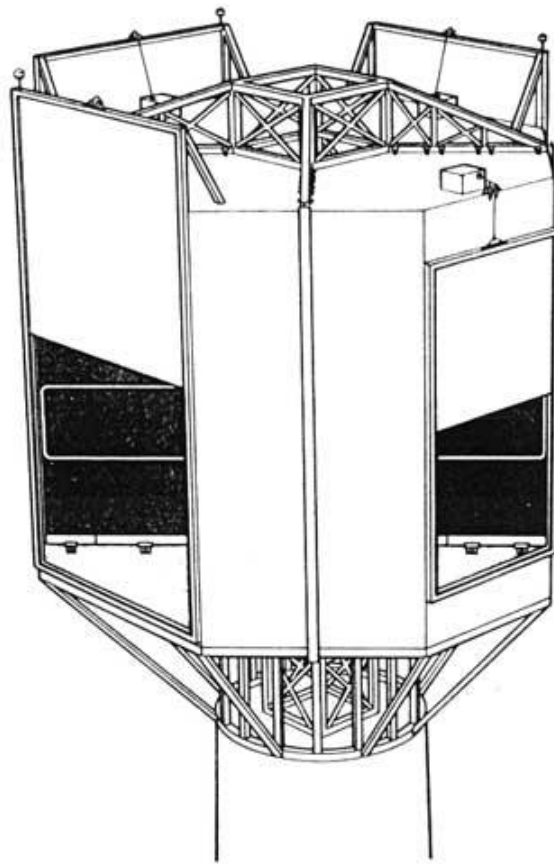
Οι δέκτες αυτού του τύπου αποτελούνται από πολλούς κάθετους αγωγούς μικρής διαμέτρου (20-56mm) διατεταγμένων έτσι ώστε να σχηματίζουν πάνελ. Τα πάνελ συγκολλούνται μεταξύ τους πλευρικά, έτσι ώστε η τελική μορφή του δέκτη να προσεγγίζει την κυλινδρική, ενώ στη βάση και κορυφή των αγωγών συνδέονται κεφαλές τροφοδότησης και συλλογής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας αντίστοιχα. Οι εξωτερικοί δέκτες τυπικά χαρακτηρίζονται από λόγο ύψους προς διάμετρο μεταξύ 1:1 και 2:1. Η επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερη κατά τη σχεδίαση, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας. Η ελάχιστη επιφάνεια που μπορεί να έχει ο δέκτης καθορίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών, και επομένως από την ικανότητα απομάκρυνσης θερμότητας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Όσο μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας έχει το ρευστό, τόσο μεγαλύτερη οφείλει να είναι η επιφάνεια του δέκτη, ώστε να απομακρύνεται αποτελεσματικά η θερμότητα. Δέκτης εξωτερικού τύπου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.17: Σχηματική αναπαράσταση του εξωτερικού δέκτη στην εγκατάσταση Solar One της Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Δέκτες τύπου κοιλότητας

Στους δέκτες αυτού του τύπου, η επιφάνεια απορρόφησης τοποθετείται στο εσωτερικό μιας μεταλλικής διαμόρφωσης τύπου κοιλότητας. Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες θερμότητας της επιφάνειας λόγω συναγωγής, ενώ η ακτινοβολία περνά μέσα από ένα ή περισσότερα ανοίγματα στην κοιλότητα, τα οποία καλύπτονται από διαφανές υλικό. Τυπικές διαστάσεις των ανοιγμάτων κυμαίνονται μεταξύ τους ενός τρίτου και ενός δευτέρου της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη, ενώ τα ανοίγματα μπορούν να δέχονται ακτινοβολία από ένα κυκλικό τομέα γωνίας μεταξύ 60° και 120° . Ως εκ τούτου, το πεδίο των ηλιοστατών περιορίζεται σε αυτό τον κυκλικό τομέα, ή σε περίπτωση που απαιτούνται περισσότεροι ηλιοστάτες, ο δέκτης διαθέτει περισσότερα του ενός ανοίγματα. Τα ανοίγματα σχεδιάζονται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, ενώ οι διαστάσεις τους προκύπτουν από τις διαστάσεις του ειδώλου κατοπτρισμού από το μακρινότερο ηλιοστάτη, συν τις απώλειες ανακοπής (περίπου 1-4%). Δέκτης τύπου κοιλότητας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.18: Σχηματική αναπαράσταση κεντρικού δέκτη τύπου κοιλότητας (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Εκτός από τους προηγούμενους δύο τύπους δεκτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ή έχουν χρησιμοποιηθεί σε εμπορικές εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, υπό ανάπτυξη βρίσκεται και ένας τρίτος τύπος δέκτη, ο **ογκομετρικός δέκτης (volumetric receiver)**^[22]. Στους δέκτες αυτούς, η επιφάνεια απορρόφησης δεν αποτελείται από αγωγούς, αλλά από πορώδες υλικό, μέταλλο ή κεραμικό, σε μορφή πλέγματος, αφρού ή πολλαπλών στρώσεων. Το ρευστό λειτουργίας περνά από το πορώδες του υλικού, απορροφώντας την εστιασμένη ακτινοβολία και θερμαίνεται. Η διάταξη αυτή υπόσχεται την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών αναλόγως με το υλικό της επιφάνειας απορρόφησης, και συγκεκριμένα:

- 800 – 1000°C, με χρήση μετάλλων
- 1200°C με χρήση κεραμικών SiSiC και 1500°C με κεραμικά SiC.
- Έως και 2000°C με χρήση κεραμικών αλουμίνιας.

Οι ογκομετρικοί δέκτες είναι καταλληλότεροι για χρήση με αέρια, όπως ο αέρας και το ήλιο, λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται. Προς το παρόν, δεν έχουν βρει εμπορική εφαρμογή, αλλά από το 2009 γίνονται δοκιμές ενός τέτοιου κεραμικού δέκτη στο Julich της Γερμανίας, σε μία εγκατάσταση επίδειξης, ισχύος 1,5MWe^[22].

Απόδοση δέκτη

Η απόδοση του δέκτη η_{rec} δίνεται από σχέση αντίστοιχη με εκείνη των παραβολικών συλλεκτών, δηλαδή:

$$\eta_{rec} = 1 - \frac{\dot{Q}_{loss,rec}}{\dot{E}_{opt}} \quad (3.5.2.7)$$

όπου η ισχύς \dot{E}_{opt} υπολογίζεται από τη σχέση (3.5.2.6), ενώ οι απώλειες θερμότητας του δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{loss,rec} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3.5.2.8)$$

όπου:

$\dot{Q}_{cond}, \dot{Q}_{conv}, \dot{Q}_{rad}$: Οι απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας αντίστοιχα

Ρευστά μεταφοράς θερμότητας

Η επιλογή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας που ρέει στους αγωγούς του δέκτη είναι συνάρτηση της μέγιστης θερμοκρασίας που απαιτεί η εφαρμογή, του κόστους του ρευστού, καθώς και άλλων κριτηρίων όπως η ασφάλεια κατά τη χρήση του. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ρευστά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ηλιακών πύργων με τις κυριότερες φυσικές ιδιότητές τους.

Ρευστό	Θερμοκρασίες Λειτουργίας (°C)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική θερμότητα (J/Kg.°C)	Πυκνότητα Ενέργειας (kJ/m ³ .°C)
Νερό	0 - 540	a	a	a
Υγρό Νάτριο	100 - 760	750	1260	945
Τήγμα Αλάτων (50% KNO ₃ - 40% NaNO ₂ - 7% NaNO ₃) κ.β.	142 - 560	1680	1560	2620
Θερμικά Έλαια	-10 - 425	b	b	b
a Εξαρτάται από τη φάση b Εξαρτάται από τον τύπο				

Πίνακας 3.5.6: Ρευστά μεταφοράς θερμότητας σε δέκτες ηλιακών πύργων

Το νερό χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, αλλά και μεταγενέστερα (στις εγκαταστάσεις PS10 και PS20 στην Ισπανία). Οι μέγιστες θερμοκρασίες στο δέκτη συνήθως φθάνουν ως τους 540°C. Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει το προτέρημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας, ως ρευστό λειτουργίας στον κύκλο ισχύος ενός ατμοστροβίλου, χωρίς την παρουσία ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας, ωστόσο παρουσιάζει προβλήματα ως ρευστό αποθήκευσης ενέργειας λόγω των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσει στη φάση του ατμού.

Το υγρό νάτριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 760°C), ενώ βρίσκει χρήση και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, και

ως μέσο αποθήκευσης, λόγω της χαμηλής τάσης ατμών στην υγρή φάση. Ωστόσο, στερεοποιείται σε θερμοκρασία 100°C, επομένως απαιτεί θέρμανση κατά την αποθήκευσή του.

Το τήγμα αλάτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας με την προϋπόθεση ότι θερμαίνεται για να παραμείνει πάνω από τη θερμοκρασία στερεοποίησής του. Είναι ωστόσο φθηνότερο από το υγρό νάτριο, ενώ προτιμάται στις πρόσφατες εφαρμογές ηλιακών πύργων (όπως στο Gemasolar Thermosolar Plant της Ισπανίας) λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας (υψηλή πυκνότητα ενέργειας).

Τα θερμικά έλαια έχουν τη χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς αποδομούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 425°C. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της χαμηλής τους τάσης ατμών, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν και σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός. Εξαιρετική προσοχή πρέπει να δίνεται στην περίπτωση που είναι εύφλεκτα ή τοξικά.

Συνοπτική καταγραφή των ηλιοθερμικών μονάδων κεντρικού δέκτη

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ήδη εγκατεστημένες και εμπορικά εκμεταλλεύσιμες μονάδες ηλιακών πύργων, σε παγκόσμια κλίμακα, με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους (χαρακτηριστικά πεδίου ηλιοστατών, συστήματος ισχύος και συστήματος αποθήκευσης ενέργειας). Στους πίνακες που ακολουθούν στη συνέχεια, αναφέρονται συνοπτικά οι μονάδες που βρίσκονται υπό κατασκευή, καθώς και εκείνες για τις οποίες έχουν υπογραφεί συμβάσεις και βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης, αλλά δεν έχει ξεκινήσει η κατασκευή τους.

Οι πίνακες προέκυψαν από επεξεργασία των στοιχείων του Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών του αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας^[5].

Πίνακας 3.5.7: Εγκατεστημένες ηλιοθερμικές μονάδες κεντρικού δέκτη (ηλιακών πύργων)

Μονάδα	Planta Solar 10	Planta Solar 20	Sierra Suntower	Gemasolar Thermosolar Plant
Τοποθεσία	Σεβίλλη, Ισπανία	Σεβίλλη, Ισπανία	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Σεβίλλη, Ισπανία
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ² /Έτος)	2012	2012	2629	2172
Εταιρεία Κατασκευής	Abengoa Solar	Abengoa Solar	eSolar	Torresol Energy
Έναρξη Λειτουργίας	Ιούλιος 2007	Απρίλιος 2009	Αύγουστος 2009	Απρίλιος 2011
Πεδίο Ηλιοστατών				
Συνολική Επιφάνεια Ηλιοστατών (m ²)	75.000	150.000	27.670	304.750
Αριθμός Ηλιοστατών	624	1255	24.360	2650
Τύπος Ηλιοστατών	Γυαλιού/Μετάλλου	Γυαλιού/Μετάλλου		Φύλλο μετάλλου
Κατασκευαστής (Μοντέλο)	Abengoa (Solucar 120)	Abengoa (Solucar 120)	eSolar	Sener
Πύργος-Δέκτης				
Ύψος Πύργου (m)	115	165	55	140
Τύπος Δέκτη	Κοιλότητας	Κοιλότητας	Διπλής κοιλότητας & Εξωτερικός σωληνωτός	
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Νερό	Νερό	Νερό	Τήγμα αλάτων (Νιτρικό Κάλιο – Νιτρικό Νάτριο)
Θερμοκρασία Εισόδου Δέκτη (°C)			218	290
Θερμοκρασία Εξόδου Δέκτη (°C)	250 – 300	250 – 300	440	565
Θερμοκρασιακή Διαφορά (°C)			222	275
Σύστημα Παραγωγής Ισχύος				
Ισχύς (MW)	10	20	5	20
Ετήσια Παραγωγή Ηλ. Ενέργειας (MWh/έτος)	23.400	48.000		110.000
Κύκλος	Rankine (45 bar)	Rankine (45 bar)	Rankine	
Μέθοδος Ψύξης	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης	Υγρόψυξη, Πύργος Ψύξης	Υγρόψυξη
Βοηθητική Πηγή Ενέργειας	Φυσικό Αέριο	Φυσικό Αέριο		Φυσικό Αέριο
Αποθήκευση Ενέργειας				
Τύπος Αποθήκευσης				2 Δεξαμενές Αλάτων (290°C και 565°C)
Χωρητικότητα (hr)	1	1		15

Πίνακας 3.5.8: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών κεντρικού δέκτη (ηλιακών πύργων) υπό κατασκευή

Μονάδα	Gaskell Sun Tower	Ivanpah SEGS	Crescent Dunes Solar Energy Project	Rice Solar Energy Project	BrightSource PG&E 3
Εταιρία Κατασκευής	eSolar & NRG Energy	Brightsource Energy	SolarReserve's Tonopah Solar Energy LLC	SolarReserve's Rice Solar Energy LLC	BrightSource Energy
Τοποθεσία	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Νεβάδα, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Νεβάδα, ΗΠΑ
Ισχύς (MW)	245	392	110	150	200
Έναρξη Λειτουργίας	Απρίλιος 2012	Οκτώβριος 2013	Οκτώβριος 2013	Οκτώβριος 2013	Ιούλιος 2014

Πίνακας 3.5.9: Ηλιοθερμικές μονάδες συλλεκτών κεντρικού δέκτη (ηλιακών πύργων) υπό ανάπτυξη

Μονάδα	BrightSource PG&E 4	BrightSource PG&E 5	BrightSource PG&E 6	BrightSource PG&E 7
Εταιρία Κατασκευής	BrightSource Energy	BrightSource Energy	BrightSource Energy	BrightSource Energy
Τοποθεσία	Νεβάδα, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ	Καλιφόρνια, ΗΠΑ
Ισχύς (MW)	200	200	200	200
Έναρξη Λειτουργίας	Ιούλιος 2015	Ιούλιος 2016	Δεκέμβριος 2016	Ιούλιος 2017

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ηλιακών πύργων

Στα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων συλλογής και εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας συγκαταλέγονται τα:

- Δυνατότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών: Οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να πετύχουν πολύ υψηλούς γεωμετρικούς λόγους συγκέντρωσης της ακτινοβολίας με χρήση ηλιοστατών μικρού μεγέθους και αντίστοιχους δέκτες, και θερμοκρασίες που περιορίζονται μόνο από τη θερμική αντοχή των υλικών του δέκτη. Με χρήση νέων, κεραμικών υλικών και ογκομετρικών δεκτών, οι ηλιακοί πύργοι θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, όπως η παραγωγή υδρογόνου και η συνεργασία με κύκλους αεριοστροβίλων Brayton υψηλών θερμοκρασιών.

- Δυνατότητα κίνησης των κάτοπτρων σε δύο άξονες: Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες συνημιτόνου, καθώς τα κάτοπτρα παρακολουθούν επακριβώς την ηλιακή κίνηση, ωστόσο αυξάνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα των μηχανισμών κίνησης και των αντίστοιχων συστημάτων ελέγχου, ειδικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλιοστατών και μειώνεται το μέγεθός τους. Επίσης, τα κάτοπτρα μπορούν να τοποθετηθούν περιμετρικά του πύργου, καθώς μπορούν να εκμεταλλευθούν την αυξημένη ακτινοβολία στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης κατά τους χειμερινούς μήνες.

- Δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης: Οι εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε μέρος του ρευστού μεταφοράς θερμότητας να αποθηκεύεται σε μία ή περισσότερες δεξαμενές για χρήση στον κύκλο ισχύος όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ή κατά τις νυχτερινές ώρες, αυξάνοντας τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνουν καθιστούν δυνατή την άμεση χρήση ρευστών με εξαιρετικές δυνατότητες αποθήκευσης, όπως είναι τα τήγματα νιτρικών αλάτων.

- Δυνατότητα ενσωμάτωσης σε υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές εγκαταστάσεις: : Οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να ενσωματωθούν σε ήδη υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές μονάδες, παρέχοντας θερμότητα μέσω εναλλακτών, ή απευθείας ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους τους επιτρέπει να συνεργάζονται με όλους τους κύκλους Rankine και Brayton των θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα και περιορισμοί των ηλιακών πύργων είναι:

- Κόστος: Τα αποτελέσματα στις μέχρι τώρα εγκαταστάσεις δείχνουν ότι το κόστος κεφαλαίου και συντήρησης των ηλιακών πύργων καθιστούν ασύμφορη τη λειτουργία τους σε εγκαταστάσεις με ισχύ μικρότερη από 30MW^{[13],[14]}. Επιπλέον, η εγκατάστασή τους δεν είναι αρθρωτή, καθώς τυπικά, η εγκατάσταση νέου πεδίου ηλιοστατών απαιτεί και την ανέγερση νέου πύργου.

- Απαίτηση για σημαντικές εκτάσεις: Όπως φαίνεται και στους πίνακες με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, η επιφάνεια των ηλιοστατών είναι ιδιαίτερα υψηλή σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η πραγματική έκταση που καταλαμβάνουν οι συλλέκτες είναι πολλές φορές υπερδιπλάσια της επιφάνειάς τους (ώστε να περιορίζονται οι απώλειες σκίασης), αυξάνει το κόστος κεφαλαίου και περιορίζει την εγκατάστασή τους σε περιοχές όπου τέτοιες εκτάσεις είναι διαθέσιμες.

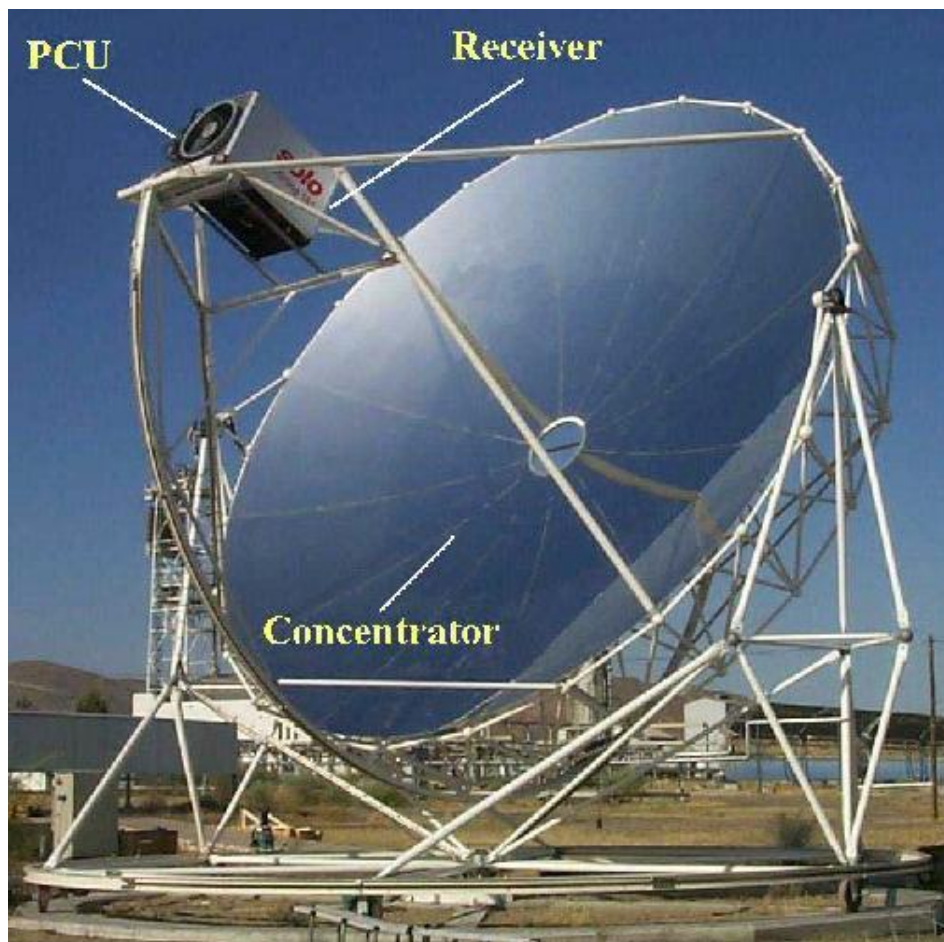
3.5.3. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΔΙΣΚΟΙ

Οι παραβολικοί δίσκοι ανήκουν στα συστήματα σημειακής εστίασης. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής ισχύος από την ηλιακή ενέργεια, μέσω του συνδυασμού δίσκου και θερμικής μηχανής, ξεκίνησε ήδη από το 19ο αιώνα, με την κατασκευή της πρώτης θερμικής μηχανής με αέριο, και λήψη θερμότητας από τον ήλιο, από τον Ericsson το 1872^[4]. Η μηχανή χρησιμοποιούσε κάτοπτρο σφαιρικής γεωμετρίας για την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας και βασιζόταν στον κύκλο Stirling. Λειτουργούσε με 420 σαλ.

Οι παραβολικοί δίσκοι δεν έχουν βρει ευρεία εφαρμογή λόγω του υψηλού κόστους των μηχανών Stirling που χρησιμοποιούν για την παραγωγή ισχύος^[23], ωστόσο σε απόλυτους αριθμούς έχουν την υψηλότερη απόδοση μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μεταξύ όλων των τεχνολογιών CSP, με τιμές που φθάνουν το 29,4%^{[3],[24]}. Για το λόγο αυτό αποτελούν την ιδανικότερη λύση για εφαρμογές μικρής ισχύος.

Περιγραφή - Αρχή Λειτουργίας Συστήματος

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μια τυπική διάταξη δίσκου/μηχανής, με τα συστατικά της στοιχεία:



Σχήμα 3.5.19: Ηλιοθερμική διάταξη Δίσκου/Stirling με τα συστατικά της στοιχεία (Πηγή: Dustin Howard, Ronald G. Harley, "Modeling of Dish-Stirling Solar Thermal Power Generation", 2010)

Η διάταξη αποτελείται από το παραβολοειδές κάτοπτρο (concentrator στο σχήμα), το δέκτη (receiver), και τη μονάδα μετατροπής ενέργειας (PCU - Power Conversion Unit). Η μονάδα μετατροπής ενέργειας περιλαμβάνει τη θερμική μηχανή Stirling, την ηλεκτρογεννήτρια, και τα συστήματα ελέγχου πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού λειτουργίας στη μηχανή. Τα κάτοπτρα διαθέτουν σύστημα κίνησης σε δύο άξονες, είτε σε σύστημα αξόνων αζιμουθίου-ύψους, είτε σε σύστημα αξόνων όπου ο ένας άξονας είναι παράλληλος με τον άξονα περιστροφής της Γης, ενώ ο άλλος συμπίπτει με την απόκλιση δ , και είναι κάθετος σε αυτόν^[24]. Οι περισσότερες διατάξεις παραβολικών δίσκων χρησιμοποιούν το πρώτο σύστημα αξόνων. Η ηλιακή ακτινοβολία εστιάζεται στο δέκτη μέσω ανάκλασης από την επιφάνεια του κατόπτρου, και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη. Από την επιφάνεια απορρόφησης μεταφέρεται, υπό μορφή θερμότητας, στο θερμό κύλινδρο της μηχανής Stirling για την εκτέλεση του κύκλου, και την παραγωγή έργου, όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.4.1. Το μηχανικό έργο της μηχανής μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ηλεκτρογεννήτριας και μεταφέρεται στο δίκτυο μέσω υπόγειων καλωδίων. Η μέγιστη ισχύς των μηχανών Stirling που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διατάξεις κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25kW^{[3],[23]}.

Ιστορική ανασκόπηση

Η σύγχρονη τεχνολογία των δίσκων Stirling αναπτύχθηκε κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τις αρχές της δεκαετίας του 1980 στις ΗΠΑ από τις εταιρείες United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), καθώς και το Εργαστήριο Αεροστροβίλων της NASA και το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ^[24]. Οι πρώτες διατάξεις χρησιμοποιούσαν κυλινδρικούς δέκτες άμεσης λήψης της ακτινοβολίας, τη μηχανή 4-95 της United Stirling, η οποία προοριζόταν για χρήση ως κινητήρας αυτοκινήτων, και δίσκους με ανακλαστική επιφάνεια από άργυρο με επικάλυψη υάλου. Η διάταξη παρήγαγε 25kW ισχύος, με συνολικό βαθμό απόδοσης 29,4%.

Στη συνέχεια, η εταιρεία MDA χρησιμοποιήσε δίσκους δικής της σχεδίασης για χρήση με την ίδια μηχανή. Συνολικά, 8 πρωτότυπα κατασκευάστηκαν, πριν το πρόγραμμα ακυρωθεί το 1986 και τα δικαιώματα χρήσης της τεχνολογίας πωληθούν στην εταιρεία Southern California Edison. Η ακύρωση του προγράμματος από την MDA αποτελούσε στρατηγική επιλογή της εταιρείας, και δεν οφειλόταν σε αποτυχία σχεδίασης, καθώς οι διατάξεις πετύχαιναν συστηματικά αποδόσεις της τάξης του 30%. Η δοκιμαστική λειτουργία της διάταξης συνεχίστηκε από την Southern California Edison μεταξύ 1986 και 1988, πετυχαίνοντας ετήσιες αποδόσεις της τάξης του 12% (υπολογίζεται ότι χωρίς διακοπές στη λειτουργία η απόδοση θα άγγιζε το 23%).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η εταιρεία Cummins Engine Company αποπειράθηκε να αναπτύξει εμπορικές διατάξεις δίσκων Stirling βασισμένες στην τεχνολογία «ελεύθερου εμβόλου», σε συνεργασία με τα εργαστήρια SunLab. Οι κοινές μελέτες ξεκίνησαν το 1991 με σκοπό την ανάπτυξη μιας διάταξης ισχύος 5-10kW για χρήση σε απομακρυσμένες, εκτός δικτύου περιοχές. Για τις εντός δικτύου περιοχές, η ισχύς της διάταξης θα αυξανόταν σε 25kW. Ωστόσο, και αυτή η απόπειρα ήταν ατελέσφορη λόγω της επιλογής της εταιρείας Cummins να σταματήσει τις εργασίες της στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας το 1996. Τα τεχνικά προβλήματα που παρουσίαζε η σχεδίαση «ελεύθερου εμβόλου» δεν επιλύθηκαν ποτέ.

Το 1993 ιδρύθηκε άλλη μία κοινοπραξία, μεταξύ των εταιρειών Science Applications International Corporation (SAIC) και Stirling Thermal Motors (STM), προς την ανάπτυξη δίσκων

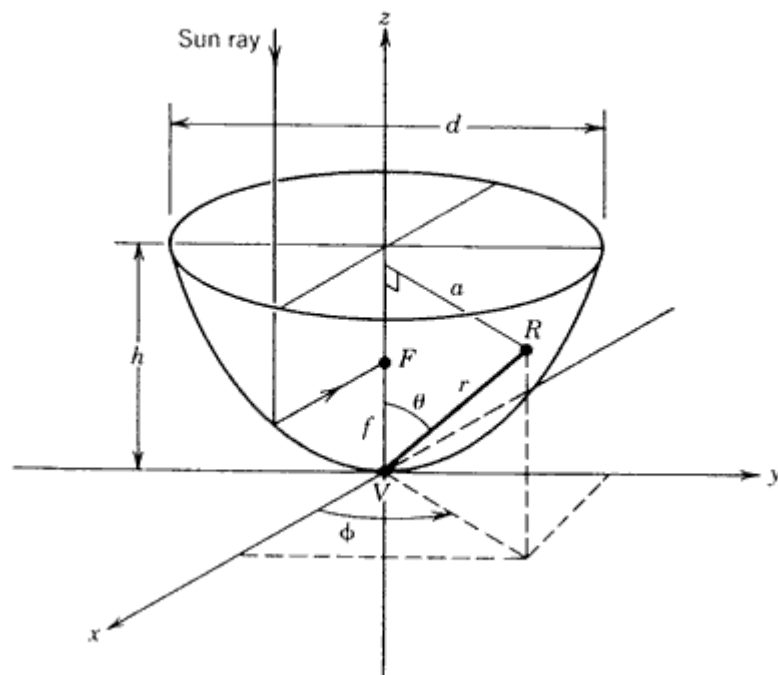
Stirling για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Η πρώτη φάση κατέληξε στην επιτυχή επίδειξη ενός πρωτοτύπου ισχύος 20kWe, στο Κολοράντο. Η δεύτερη γενιά της διάταξης έφερε βελτιώσεις στα υποσυστήματα τόσο της μηχανής, όσο και του δίσκου, με την ισχύ να αυξάνεται από τα 20 στα 23kWe, και την απόδοση να αγγίζει το 26%, σε μετρήσεις που έγιναν το 2002^[4].

Από το 2000, το κοινό πρόγραμμα μεταξύ της Boeing και της Stirling Energy Systems προχώρησε στη 2^η φάση του. Μετά από 10.000 ώρες λειτουργίας, η διάταξη παρουσίαζε συνολική απόδοση 24%, με το μέγιστο βαθμό απόδοσης να αγγίζει το 29,4% και τη μέγιστη ισχύ τα 24,9kW με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 720°C^[23].

Στην Ευρώπη, οι εταιρείες SBP και DLR έχουν εκτελέσει περισσότερες από 20.000 ώρες δοκιμών τριών διατάξεων στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Ισπανία. Έχουν επιτύχει λόγο συγκέντρωσης 3500, και συνολικό βαθμό απόδοσης 20%^[23].

Κάτοπτρα

Τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις δίσκων/θερμικής μηχανής είναι παραβολικοί δίσκοι. Γεωμετρικά, η μορφή τους ονομάζεται παραβολοειδής. Η παραβολική γεωμετρία έχει αναφερθεί στην ενότητα των συλλεκτών παραβολικής σκάφης (βλ. παράγραφο 3.5.1.3), οι οποίοι έχουν τη μορφή παραβολικών κυλίνδρων. Τα παραβολοειδή, ή παραβολικοί δίσκοι, προκύπτουν από περιστροφή της παραβολής γύρω από τον άξονά της, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.20: Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη παραβολοειδούς (Πηγή: "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986)

Η εξίσωση του παραβολοειδούς, με τον άξονα z ως άξονα συμμετρίας, δίνεται από τις σχέσεις:

- Σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (3.5.3.1)$$

όπου f το εστιακό μήκος της παραβολής (ευθύγραμμο τμήμα VF στο σχήμα)

- Σε κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$z = \frac{a^2}{4f} \quad (3.5.3.2)$$

όπου a η απόσταση του σημείου της επιφάνειας του παραβολοειδούς από τον άξονα z .

- Σε σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} = \frac{4f}{r} \quad (3.5.3.3)$$

όπου r η απόσταση του σημείου της επιφάνειας του παραβολοειδούς από την κορυφή V

Η επιφάνεια ανοίγματος (**aperture**) του παραβολικού δίσκου είναι κυκλικής μορφής, και δίνεται από τη σχέση:

$$A_a = \pi \frac{d^2}{4} \quad (3.5.3.4)$$

ενώ ως συνάρτηση του εστιακού μήκους f και της γωνίας χείλους ψ_{rim} της παραβολής, δίνεται από τη σχέση:

$$A_a = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi_{rim}}{(1 + \cos \psi_{rim})^2} \quad (3.5.3.5)$$

Η συνολική επιφάνεια του παραβολικού δίσκου δίνεται από τη σχέση:

$$A_s = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[\left(\frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{3}{2}} - 1 \right\} \quad (3.5.3.6)$$

Με τις προηγούμενες σχέσεις περιγράφεται η γεωμετρία των ιδανικών παραβολικών δίσκων, την οποία οι πραγματικοί δίσκοι προσεγγίζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό. Σε ότι αφορά την κατασκευή των δίσκων στις πραγματικές διατάξεις Δίσκου/Μηχανής, διακρίνονται τρεις κατασκευαστικές διαμορφώσεις^[3]:

1. Δίσκοι πολλαπλών κατόπτρων

Σε αυτή τη διαμόρφωση, ένα πλήθος επιμέρους κοίλων κατόπτρων, τα οποία επικολλούνται σε μεταλλικό υπόστρωμα και στηρίζονται από δικτύωμα παραβολικής γεωμετρίας, τοποθετούνται έτσι ώστε να σχηματίζουν τη συνολική επιφάνεια του δίσκου. Επειδή τα επιμέρους κάτοπτρα έχουν μικρή καμπυλότητα και χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια κατασκευής, αυτού του τύπου οι δίσκοι μπορούν να επιτύχουν υψηλούς λόγους συγκέντρωσης. Δίσκος αυτού του τύπου απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.21: Δίσκος πολλαπλών κατόπτρων της McDonnell Douglas στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή: <http://www.stirlingengines.org.uk>)

2. Δίσκοι πλήρους παραβολοειδούς επιφάνειας

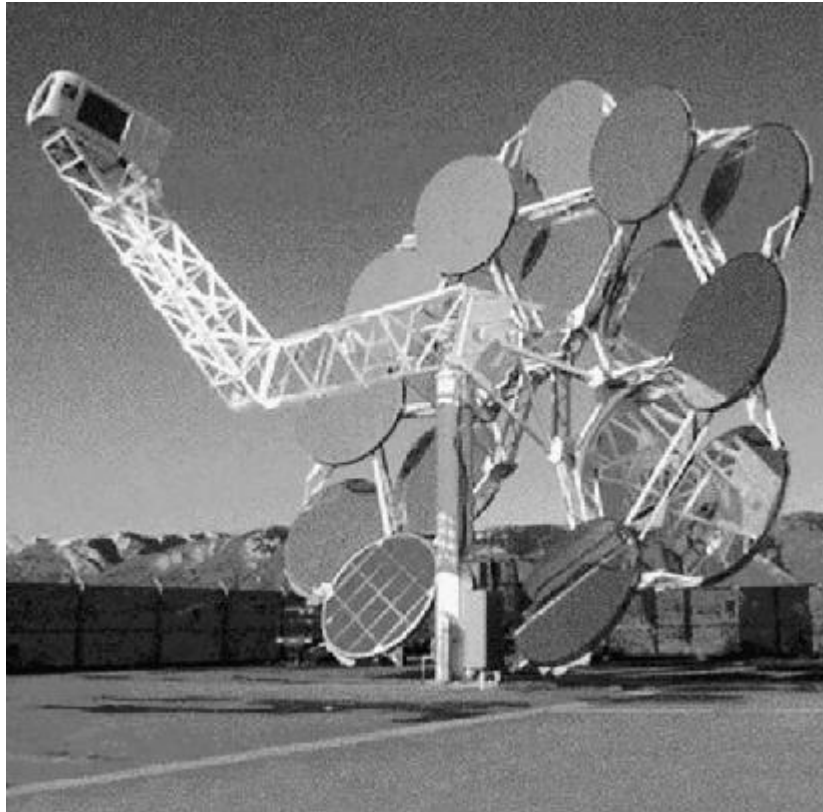
Σε αυτή τη διαμόρφωση, ολόκληρη η επιφάνεια του δίσκου έχει παραβολοειδή μορφή. Ο δίσκος μπορεί να αποτελείται από συνένωση τριγωνικών, καμπύλων τομέων κοινής καμπυλότητας. Η επιφάνεια του δίσκου είναι κατασκευασμένη από φύλλο υλικού υψηλής ανακλαστικότητας (αλουμίνιο, άργυρος) με επικάλυψη λεπτής στρώσης (1mm) υάλου χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο. Δίσκος αυτού του τύπου απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5.22: Δίσκος πλήρους παραβολοειδούς επιφάνειας της Eurodish
(Πηγή: <http://www.volker-quaschning.de>)

3. Δίσκοι τανυσμένης μεμβράνης

Οι δίσκοι αυτού του τύπου αποτελούνται από δύο λεπτά πολυμερικά ή μεταλλικά φύλλα, με επίστρωση από υλικό υψηλής ανακλαστικότητας, τα οποία τανύζονται γύρω από μία μεταλλική στεφάνη. Η καμπύλη γεωμετρία πραγματοποιείται με την εφαρμογή πίεσης κενού μεταξύ των δύο μεμβρανών. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή η δημιουργία παραβολοειδών με μικρό λόγο f/d (εστιακός μήκος προς διάμετρο) μόνο με την εφαρμογή υποπίεσης μεταξύ των επιφανειών του, και για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί μια τεχνική προέντασης των επιφανειών, πέραν των ορίων ελαστικότητάς τους, η οποία οδηγεί σε καλύτερες προσεγγίσεις της ακριβούς παραβολικής μορφής. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η συνολική ανακλαστική επιφάνεια να αποτελείται από πολλές μικρότερες, έτσι ώστε ο λόγος f/d να αυξάνεται. Παράδειγμα δίσκου τέτοιας διαμόρφωσης είναι το παρακάτω:



Σχήμα 3.5.23: Δίσκος πολλαπλών τανυσμένων μεμβρανών της SAIC/STM
(Πηγή: D. Mills. "Advances in solar thermal electricity technology", 2004)

Οπτική απόδοση

Η οπτική απόδοση των παραβολικών δίσκων δίνεται από σχέση ανάλογη με εκείνη των συλλεκτών παραβολικής σκάφης:

$$\eta_{opt} = \frac{\dot{E}_{opt}}{\dot{E}_{inc}} = \Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \quad (3.5.3.7)$$

όπου:

- Γ : Ο συντελεστής ανακοπής του συλλέκτη (σχέση 3.5.1.21), περίπου 0,95
- ρ : Ο συντελεστής ανάκλασης του υλικού των κατόπτρων (περίπου 0,94)
- τ : Η οπτική διαπερατότητα τυχόν διαφανών επιφανειών μεταξύ κατόπτρων και δέκτη
- α : Η απορροφητικότητα της επιφάνειας του δέκτη

Μέγιστος Λόγος Συγκέντρωσης – Μέγιστη Δυνατή Θερμοκρασία

Ο μέγιστος γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης που μπορεί να επιτύχει ένας παραβολικός δίσκος, δίνεται από τη σχέση^[8]:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \theta_{tol}} \quad (3.5.3.8)$$

Σύγκριση με την αντίστοιχη σχέση για τους συλλέκτες παραβολικής σκάφης (βλ. σχέση 3.5.1.13) δείχνει ότι οι παραβολικοί δίσκοι έχουν την ικανότητα επίτευξης πολύ μεγαλύτερων λόγων συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, αφού η θεωρητική τους τιμή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγωνικού ημιτόνου της γωνίας ανοχής.

Η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί από στο δέκτη των δίσκων, ωστόσο, δεν αλλάζει αφού η τιμή της περιορίζεται από το 2^ο θερμοδυναμικό νόμο (βλ. σχέση 3.5.1.14)

Δέκτες

Οι δέκτες στις διατάξεις Δίσκου/Stirling ανήκουν στην κατηγορία δεκτών τύπου κοιλότητας. Η απορροφητική επιφάνεια του δέκτη τοποθετείται στο εσωτερικό κοιλότητας, κατασκευασμένη συνήθως από κεραμικό υλικό^[25], ενώ η είσοδος της κοιλότητας φράσσεται από διαφανές υλικό, το οποίο είναι διαπερατό στο ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά περιορίζει τις θερμικές απώλειες που λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η επιφάνεια απορρόφησης αποτελείται από ένα πλέγμα λεπτών μεταλλικών αγωγών, μέσω του οποίου ρέει το ρευστό λειτουργίας της μηχανής, ή κάποιο ενδιάμεσο ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Η επιφάνεια αυτή τοποθετείται σε κάποια απόσταση από την εστία του παραβολικού κατόπτρου, προκειμένου η εισερχόμενη από το άνοιγμα της κοιλότητας ακτινοβολίας να προσπίπτει σε μεγαλύτερη περιοχή της επιφάνειας, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανσή της^{[3],[24]}.

Οι δέκτες των διατάξεων Δίσκου/Stirling διακρίνονται σε δύο κατηγορίες^[3]: Στους δέκτες άμεσης φωταγώγησης (Direct Illumination Receivers – DRI) και στους δέκτες επαναροής (Reflux Receivers).

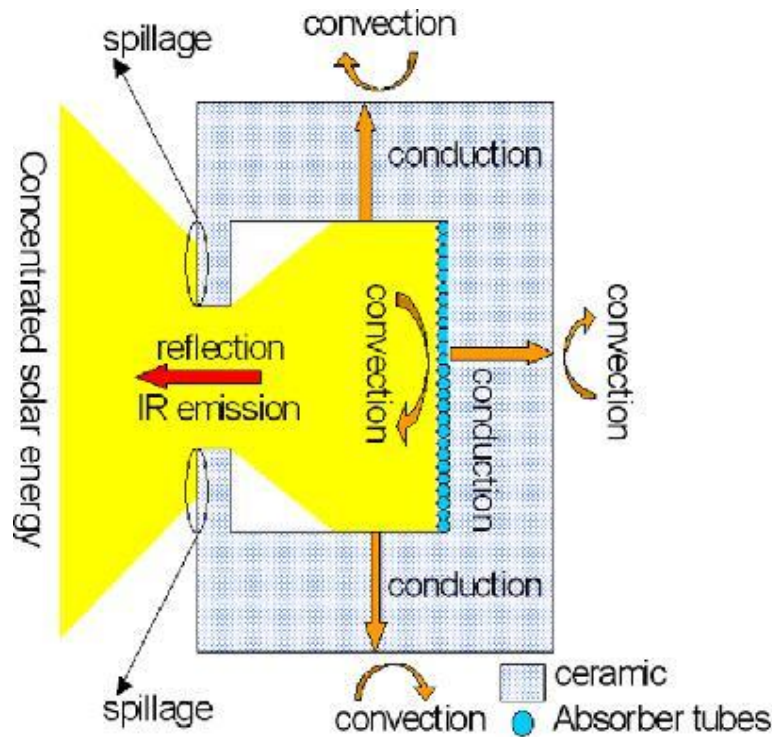
Στους δέκτες άμεσης φωταγώγησης, η ακτινοβολία προσπίπτει άμεσα στο θερμαντή της μηχανής Stirling (βλ. παράγραφο 3.4.1) και θερμαίνει το ρευστό λειτουργίας του κύκλου (αέριο υδρογόνο ή ήλιο). Εξαιτίας της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των αερίων, οι δέκτες αυτού του τύπου διαθέτουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 75W/cm²)^[24]. Ωστόσο, λόγω της ανομοιομορφίας της εστιασμένης ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους, οι δέκτες αυτοί παρουσιάζουν θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια και κατά το μήκος τους, οι οποίες υποβαθμίζουν την απόδοσή τους και περιορίζουν το χρόνο ζωής τους^[3].

Εξαιτίας των παραπάνω προβλημάτων, οι δέκτες άμεσης φωταγώγησης τείνουν να αντικατασταθούν από τους δέκτες επαναροής. Στους αγωγούς αυτών ρέει ενδιάμεσο ρευστό μεταφοράς θερμότητας (συνήθως υγρό νάτριο^[24]), το οποίο εξατμίζεται στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη, και συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του θερμαντή της μηχανής Stirling, εναλλάσσοντας θερμότητα με το ρευστό λειτουργίας. Επειδή πρόκειται για διεργασίες αλλαγής

φάσης, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού στη συγκεκριμένη πίεση.

Απόδοση δέκτη

Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας και οι πηγές θερμικών απωλειών στο δέκτη μιας διάταξης Δίσκου/Stirling φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5.24: Σχηματική αναπαράσταση του δέκτη του Δίσκου/Stirling της Eurodish, με τους μηχανισμούς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα (Πηγή: Francois Nerveuet al. "Thermal model of a dish/Stirling systems", 2009)

Η απόδοση του δέκτη η_{rec} δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{rec} = 1 - \frac{\dot{Q}_{loss,rec}}{\dot{E}_{opt}} \quad (3.5.3.9)$$

όπου η ισχύς \dot{E}_{opt} υπολογίζεται από τη σχέση (3.5.3.7), ενώ οι απώλειες θερμότητας του δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{loss,rec} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3.5.3.10)$$

όπου:

$\dot{Q}_{cond}, \dot{Q}_{conv}, \dot{Q}_{rad}$: Οι απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας αντίστοιχα.

Εφαρμογή σε κύκλους ισχύος – Δυνατότητες ενσωμάτωσης σε θερμοληκτρικές μονάδες

Οι παραβολικοί δίσκοι έχουν αξιοποιηθεί ως μέσα εστίασης της ακτινοβολίας και παροχής θερμότητας σε μηχανές Stirling. Ο κύκλος Stirling έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.4.1. Οι μηχανές των παραβολικών δίσκων λειτουργούν με αέριο ήλιο ή υδρογόνο, σε θερμοκρασίες περίπου 700°C, και πιέσεις έως 20MPa^[24], ενώ η ισχύς τους κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25kW^{[3],[23]}. Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνολογίας των παραβολικών δίσκων έρχεται αντιμέτωπη με τις υψηλές τιμές των μηχανών Stirling, και για το λόγο αυτό εξετάζεται η δυνατότητα συνδυασμού τους με μικρούς αεριοστροβίλους, κύκλου Brayton^{[23],[24]}. Το κόστος αυτών των μηχανών είναι μικρότερο, λόγω μεγαλύτερων ποσοτήτων στην παραγωγή. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 25-33%, δηλαδή μικρότερη του 42% των καλύτερων μηχανών Stirling, ωστόσο η σχέση απόδοσης/κόστους θα ήταν καλύτερη.

Οι διατάξεις Δίσκων/Θερμικής Μηχανής, λόγω του γεγονότος ότι φέρουν τη θερμική μηχανή στο φορέα τους, δεν έχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ήδη υπάρχουσες θερμοληκτρικές εγκαταστάσεις. Έχουν γίνει απόπειρες εφαρμογής των παραβολικών δίσκων για την συλλογή και παραγωγή ατμού προς χρήση από ατμοστρόβιλο, όπως π.χ. από το Εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας (ANU)^[23], ωστόσο τέτοιες διατάξεις δεν έχουν βρει ακόμα εμπορική εφαρμογή.

Συνοπτική καταγραφή των ηλιοθερμικών μονάδων Δίσκου/Μηχανής

Προς το παρόν, δεν λειτουργούν εμπορικά εκμεταλλεύσιμες μονάδες τεχνολογίας Δίσκου/Μηχανής. Η μοναδική τέτοια εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας είναι η εγκατάσταση Maricopa Solar στην Αριζόνα των ΗΠΑ, ιδιοκτησίας της εταιρείας Tessera Solar, και λειτουργεί ως μονάδα αναφοράς^[5]. Ξεκίνησε τη λειτουργία της τον Ιανουάριο του 2010 και καταλαμβάνει έκταση 60 στρεμμάτων. Αποτελείται από 60 δίσκους/Stirling, της Stirling Energy Systems (SES), με συνολική ισχύ 1,5MW (25kW ονομαστικής ισχύος ο καθένας).

Δεν υπάρχουν σχέδια για μελλοντικές εγκαταστάσεις.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διατάξεων Δισκων/Μηχανής

Στα πλεονεκτήματα αυτών των διατάξεων συγκαταλέγονται:

- Υψηλός βαθμός απόδοσης: Ο υψηλότερος μεταξύ όλων των ηλιοθερμικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη συνολική απόδοση να φθάνει το 29,4% [3],[24].
- Περιοτροφή των κατόπτρων γύρω από δύο άξονες: Ελαχιστοποίηση των απωλειών σνημιτόνου.
- Αρθρωτή εγκατάσταση: Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, οι Δίσκοι/Stirling μπορούν να εγκατασταθούν μεμονωμένα, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογή σε απομονωμένες περιοχές, ή σε μικρές διατάξεις, όπου οι απαιτήσεις ισχύος είναι περιορισμένες.
- Υβριδική λειτουργία: Η προσθήκη θερμότητας στη μηχανή Stirling μπορεί να γίνει τόσο με εστίαση της ακτινοβολίας από το δίσκο, όσο και από εξωτερική συμβατική πηγή καυσίμου.

Στα μειονεκτήματα αυτών των διατάξεων συγκαταλέγονται:

- Υψηλά κόστη εγκατάστασης και συντήρησης (/kW): Εκτιμώνται περίπου στα \$7/ ppW^[23].
- Αδυναμία ενσωμάτωσης σε συμβατικές ηλιοθερμικές μονάδες. Προβληματική αποθήκευση ενέργειας: Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες CSP, προς το παρόν δεν υπάρχουν οικονομικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για τους Δίσκους/Stirling^[24].

3.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] W.B.Stine, R.W.Harrigan. "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986. Revised and updated version by William Stine and Michael Geyer. Found in <http://www.powerfromthesun.net/>
- [2] Yunus A. Cengel, Michael A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», Τόμος Α, 3η Έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [3] William B. Stine, Richard B. Diver. "A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology". Sandia National Laboratories, USA, January 1994.
- [4] Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises. "A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines". Renewable and Sustainable Energy Reviews 7 (2003) 131-154.
- [5] National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov
- [6] Sargent & Lundy LLC Consulting Group. "Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts". NREL/Subcontractor Report 550-34440.
- [7] D.E. Prapas, B. Norton, S.D. Probert. "Optics of parabolic-trough, solar-energy collectors, possessing small concentration ratios". Solar Energy Vol. 39, No. 6, pp. 541-550, 1987.
- [8] C. Christopher Newton. "A concentrated solar thermal energy system". MSc Thesis, The Florida State University, FAMU-FSU College of Engineering, 2007.

- [9] Soteris A. Kalogirou, Constantinos C. Neocleous, Christos N. Schizas. "A comparative study of methods for estimating intercept factor of parabolic trough collectors".
- [10] Guven H.M. and Bannerot R.B. "Derivation of Universal Error Parameters for Comprehensive Optical Analysis of Parabolic Troughs", Proceedings of the ASME-ISES Solar Energy Conference, 1985, Knoxville, USA, pp. 168-174.
- [11] A. Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Perez. "Parabolic-trough solar collectors and their applications". Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 1695-1721.
- [12] J.M. Cabello et al. "Optimization of the size of a solar thermal electricity plant by means of genetic algorithms". Renewable Energy 36 (2011) 3146-3153.
- [13] "Solar Power Tower". SolarPACES, An Implementing Agreement of the International Energy Agency.
- [14] Gregory J. Kolb et al. "Heliostat Cost Reduction Study". Sandia Report, SAND2007-3293, Sandia National Laboratories.
- [15] D.J. Alpert et al. "The development of stretched-membrane heliostats in the United States". Solar Energy Materials 21 (1990) 131-150.
- [16] Xiudong Wei et al. "Tracking and ray tracing equations for the target-aligned heliostat for solar tower power plants". Renewable Energy 36 (2011) 2687-2693
- [17] Steve Schell. "Design and evaluation of esolar's heliostat fields". Solar Energy 85 (2011) 614-619.
- [18] Stephen Kusek. "Low Cost Heliostat Development, DOE -CSP Program Review". HiTek Services, Inc. May 17, 2011.
- [19] Xiudong Wei et al. "A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant". Renewable Energy 35 (2010) 1970-1975.
- [20] Basil F. Ali. "Theoretical study of main factors affecting the heliostat field design of tower power plant". Energy Convers. Mgmt Vol. 30, No. 2, pp.101-106, 1990.
- [21] Hongli Zhang et al. "Design of Heliostats Field for Scale of 1MW Solar Power Tower Plant". Procedia Environmental Sciences 11 (2011) 1164 - 1170.
- [22] Antonio L. Avila-Marin. "Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review". Solar Energy 85 (2011) 891-910.
- [23] D. Mills. "Advances in solar thermal electricity technology". Solar Energy 76 (2004) 19-31.
- [24] "Solar Dish Engine". SolarPACES, An Implementing Agreement of the International Energy Agency.
- [25] Francois Nepveu, Alain Ferriere, Françoise Bataille. "Thermal model of a dish/Stirling systems". Solar Energy 83 (2009) 81-89.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ CSP ΣΤΟΝ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΟΡΩΝΗΣ ΣΤΗ ΡΟΔΟ-ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΡΥΠΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία μελέτη για την αξιοποίηση της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP), με σκοπό την εξοικονόμηση καυσίμου στο θερμοηλεκτρικό σταθμό (ΘΗΣ) της Ρόδου.

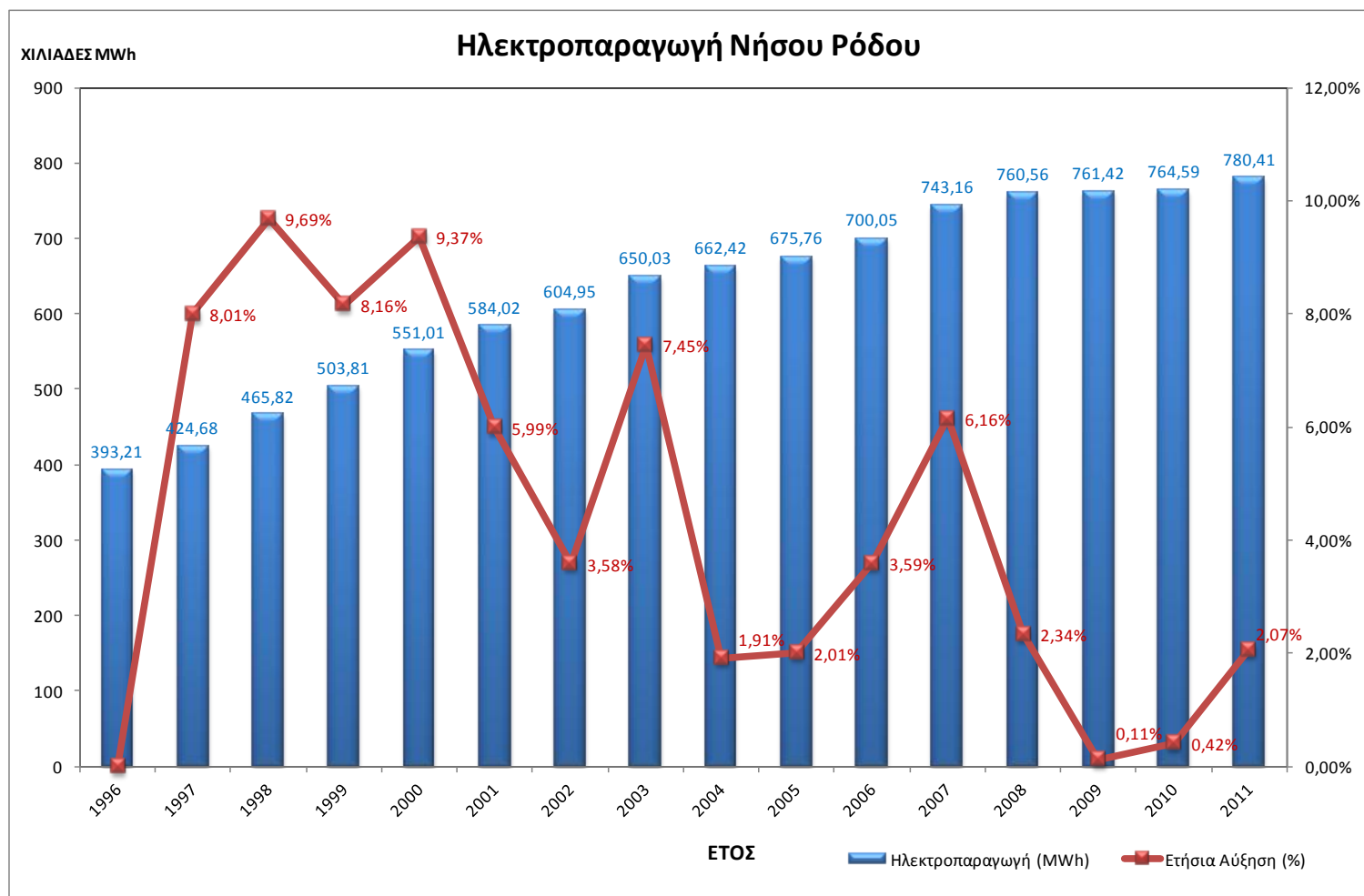
Η Ρόδος επιλέχθηκε ως πεδίο εφαρμογής για μία σειρά από λόγους, μεταξύ των οποίων και οι κάτωθι:

- Διαθέτει μία από τις μεγαλύτερες τιμές συνολικής ετήσιας ολικής ακτινοβολίας στην Ελλάδα (την 3η μεγαλύτερη κατά σειρά, μετά από την Κρήτη και τη Σάμο, βλ. Πίνακα Α1 του Παραρτήματος).
- Σε σχέση με τα δύο προαναφερθέντα νησιά, το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή της Ρόδου είναι πολύ χαμηλό^[1].
- Έχει μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βαίνει διαρκώς αύξουσα. Επίσης, η αιχμή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μέγιστο κατά τους θερινούς μήνες (Μάιο - Σεπτέμβριο), όταν δηλαδή και η παραγωγή θερμότητας από τις εγκαταστάσεις CSP μεγιστοποιείται.
- Διαθέτει εκτάσεις ικανές να φιλοξενήσουν τις, πολλές φορές εκτατικά απαιτητικές, εγκαταστάσεις συλλεκτών συγκέντρωσης της ακτινοβολίας.
- Ανήκει στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Αυτό σημαίνει ότι για την ηλεκτροπαραγωγή της χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο πετρέλαιο (μαζούτ και ντήζελ), με συνέπεια τη μεγάλη αύξηση του κόστους καυσίμου, των ρύπων κατά την παραγωγή, αλλά και την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου.

Στον πίνακα και το γράφημα που ακολουθούν παρουσιάζεται η εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής στη Ρόδο από το 1996 έως σήμερα, όπως καταγράφεται από τη ΔΕΗ, όπου και φαίνεται η ραγδαία αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην άνευ προηγουμένου αύξηση του αριθμού των κλινών τα τελευταία χρόνια, στην ανάλογη αύξηση της κατανάλωσης των υποδομών (π.χ δημοτικός ηλεκτροφωτισμός) αλλά και στην αλλαγή των καταναλωτικών συνηθειών και προτύπων λόγω και της κλιματικής αλλαγής (μεγάλη χρήση κλιματιστικών, αύξηση της οικιακής κατανάλωσης κλπ)^[2].

Έτος	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Παραγωγή σε MWh	393.205	424.684	465.816	503.812	551.009	584.018	604.954	650.025
Έτος	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Παραγωγή σε MWh	662.419	675.755	700.045	743.161	760.561	761.421	764.593	780.405

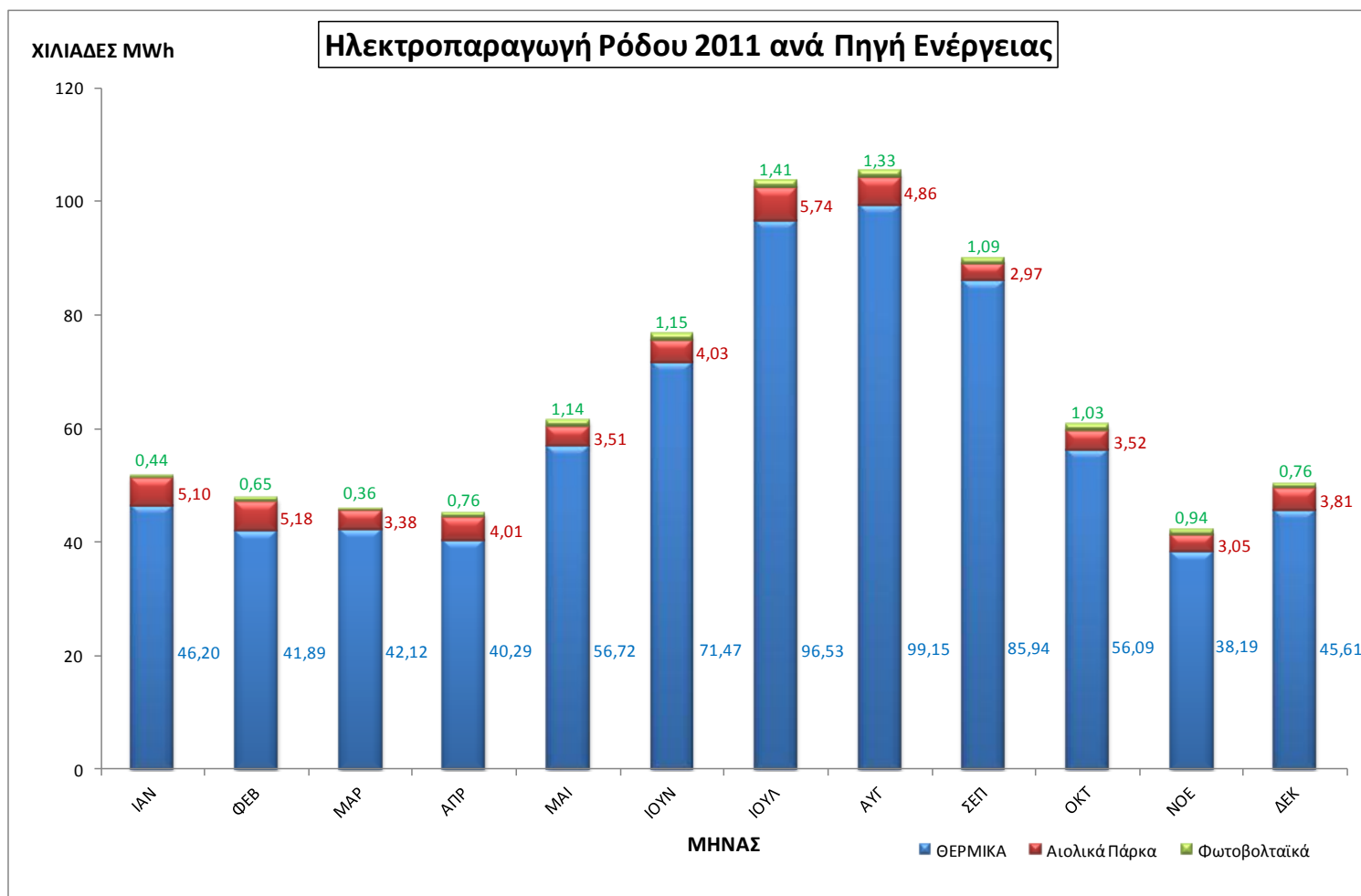
Πίνακας 4.1: Μεταβολή ηλεκτροπαραγωγής στη Ρόδο, για τα έτη 1996-2011 (Πηγή: ΔΕΗ)



Σχήμα 4.1: Μεταβολή ηλεκτροπαραγωγής στη Ρόδο, για τα έτη 1996-2011 (Πηγή: ΔΕΗ)

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η έντονη αύξηση που έχει παρουσιάσει η ηλεκτρική ζήτηση στη Ρόδο σε διάστημα 15 ετών (αθροιστικά, από το 1996, κατά 98,4%).

Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή της Ρόδου παραμένει χαμηλή. Συγκεκριμένα, η συνολική ετήσια συμμετοχή των ΑΠΕ (αιολικών πάρκων και φωτοβολταϊκών) το 2011 έφθασε μόλις το 7,71%, με συνολική παραγωγή 60.201MWh^[1]. Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η κατανομή της ηλεκτροπαραγωγής της Ρόδου για το 2011, σε μηνιαία βάση και ανά πηγή ενέργειας, όπως προκύπτει από επεξεργασία στοιχείων της ΔΕΗ για τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά.



Σχήμα 4.2: Μηνιαία Ηλεκτροπαραγωγή Νήσου Ρόδου κατά το έτος 2011, ανά πηγή ενέργειας (Πηγή: "Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για το έτος 2011", ΔΕΗ Α.Ε)

4.1. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ

Στη Ρόδο λειτουργεί ένας Θερμοηλεκτρικός Σταθμός (ΘΗΣ) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην περιοχή Σορωνή, 23 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης της Ρόδου, και καταλαμβάνει έκταση 171,2 στρεμμάτων. Ο ΘΗΣ Σορωνής ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1976, και από το 1997 αποτελεί το μοναδικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί, ο οποίος εξυπηρετεί τη Ρόδο και το γειτονικό μικρό νησί της Χάλκης^[3]. Ο σταθμός αποτελείται συνολικά από 11 μονάδες παραγωγής (2 ατμοστρόβιλους, 5 μηχανές εσωτερικής καύσης Diesel και 4 αεριοστρόβιλους). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται στοιχεία για τις επιμέρους μονάδες του σταθμού.

Μονάδα	ATM1	ATM2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3	DIESEL 4
Κατασκευαστής	ELEKTRIM & JUGOTURBINA	ELEKTRIM & JUGOTURBINA	SULZER-POZNAN	SULZER -POZNAN	PIELSTICK	PIELSTICK
Μοντέλο	007-010	007-010	9RTA5B	9RTA5B		
Έτος Έναρξης Λειτουργίας	1976	1976	1990	1991	1997	1998
Ονομαστική Ισχύς (MW)	15	15	12,28	12,28	23,41	23,41
Τύπος Καυσίμου	Μαζούτ	Μαζούτ	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
Λειτουργία	Μονάδα Βάσης	Μονάδα Βάσης	Μονάδα Βάσης	Μονάδα Βάσης	Μονάδα Βάσης	Μονάδα Βάσης
Μονάδα	DIESEL 5	AEP 1	AEP 2	AEP 3	AEP 4	
Κατασκευαστής	PIELSTICK	THOMASSEN	FIAT	A.B.B.	G.E.	
Μοντέλο		PG-5341	TG-20			
Έτος Έναρξης Λειτουργίας	1998	1986	1988	1996	2005	
Ονομαστική Ισχύς (MW)	23,41	24	36	21,32	28	
Τύπος Καυσίμου	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	
Λειτουργία	Μονάδα Βάσης	Μονάδα Αιχμής	Μονάδα Αιχμής	Μονάδα Αιχμής	Μονάδα Αιχμής	

Πίνακας 4.2: Μονάδες ΘΗΣ Σορώνης της Ρόδου (Πηγή: Ευγενία-Ευαγγελία Καλοπέτρη, "Ενεργειακή Οικονομία της νήσου Ρόδου", 2007)

Οι μονάδες του σταθμού δε λειτουργούν όλες ταυτόχρονα. Η λειτουργία τους ρυθμίζεται έτσι ώστε να πραγματοποιείται η παραγωγή ενέργειας με τον οικονομικά βέλτιστο τρόπο. Η ένταξη των μονάδων στην παραγωγή γίνεται κυρίως με οικονομικά κριτήρια, κλιμακώνοντας την ένταξη από τα τεχνικά ελάχιστα, τις οικονομικές μονάδες (μαζούτ) και στη συνέχεια τις λιγότερο οικονομικές μονάδες με καύσιμο diesel. Με τον τρόπο αυτό οι μονάδες βάσης (ατμοστρόβιλοι και diesel) φορτίζονται στο μέγιστο φορτίο ενώ η στρεφόμενη εφεδρεία προκύπτει κατά βάση από τα περιθώρια φόρτισης της εκάστοτε τελευταίας μονάδας η οποία συνήθως αναλαμβάνει και το ρόλο της ρυθμιζουσας μονάδας (σε ισόχρονη λειτουργία). Η σειρά ένταξης των μονάδων στο σύστημα παραγωγής είναι^[4]:

1. Ατμοστρόβιλος 1
2. Ατμοστρόβιλος 2
3. Diesel 3
4. Diesel 4
5. Diesel 5
6. Diesel 1
7. Diesel 2
8. Αεριοστρόβιλος 4
9. Αεριοστρόβιλος 3
10. Αεριοστρόβιλος 1
11. Αεριοστρόβιλος 2

Πέραν των παραπάνω θερμοηλεκτρικών μονάδων, στη Ρόδο έχουν εγκατασταθεί επίσης Αιολικά Πάρκα συνολικής ισχύος 31,3MW και Φωτοβολταϊκά Συστήματα ισχύος 6,6MW, με συνολική ετήσια παραγωγή 49143 και 11059 MWh αντίστοιχα, κατά το 2011^[1]. Επίσης, σε εξέλιξη βρίσκεται η κατασκευή ενός νέου ΘΗΣ, με νηζελοηλεκτρικές μονάδες συνολικής καθαρής ηλεκτρικής ισχύος 115,439 MW, αποτελούμενου από 7 ίδια Η/Ζ με τετράχρονους κινητήρες νηζελ, καύσιμο μαζούτ χαμηλού θείου και δυνατότητα καύσης φυσικού αερίου, στη θέση Πίσω Κάμπος και Πλάκα Στένη του Δήμου Νότιας Ρόδου, με ανάδοχο εταιρεία την ΤΕΡΝΑ Α.Ε.^[5].

4.1.1. Επιλογή μονάδας του ΘΗΣ Σορωνής για την ενσωμάτωση διάταξης συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας

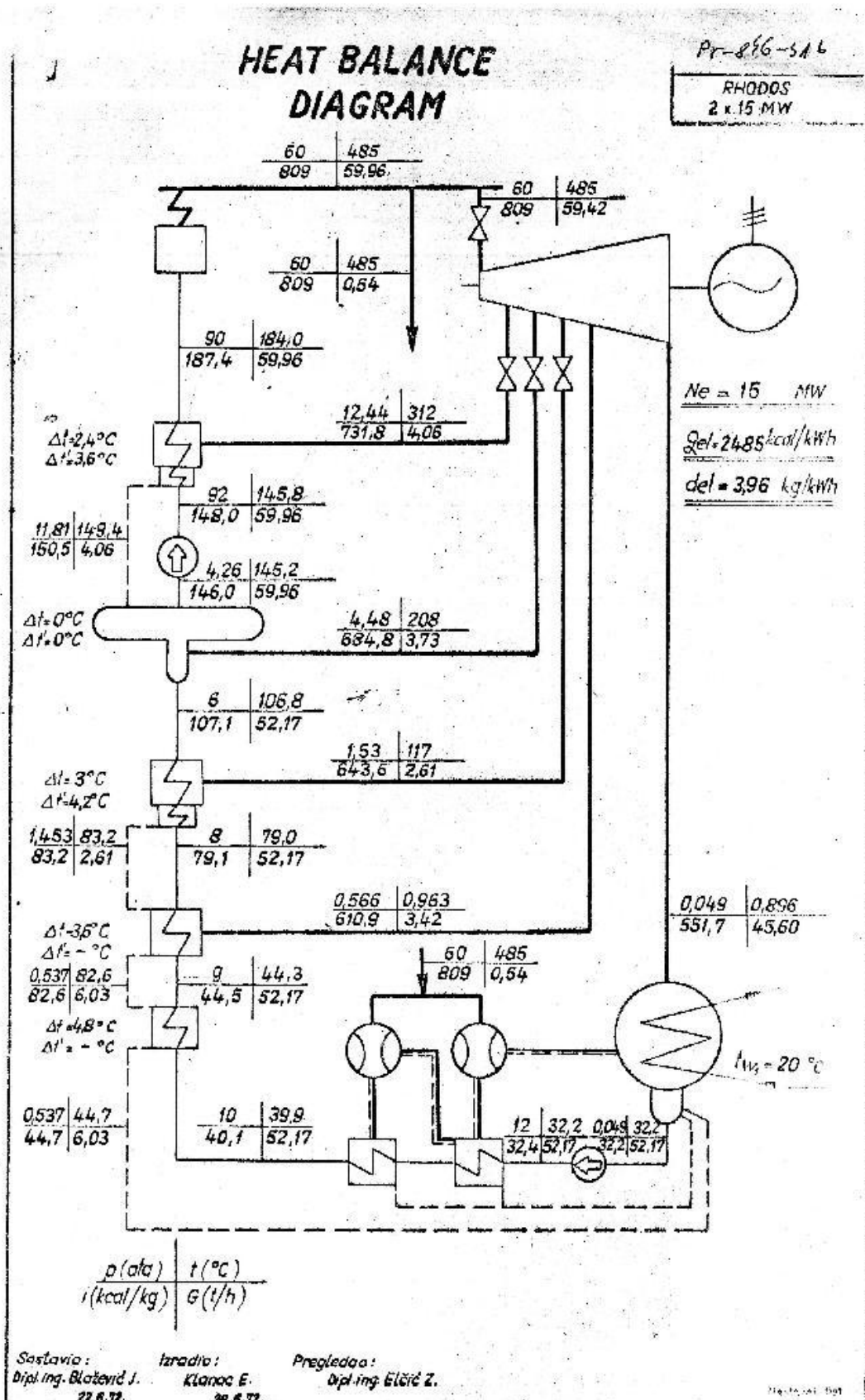
Στην παρούσα εργασία, θα γίνει μελέτη προς την αξιοποίηση της τεχνολογίας CSP για την παροχή θερμότητας στον ατμοηλεκτρικό σταθμό του ΘΗΣ Σορωνής, και την εξοικονόμηση καυσίμου που θα προέκυπτε από μία τέτοια εφαρμογή.

Ο ατμοηλεκτρικός σταθμός (ΑΗΣ) αποτελεί μονάδα βάσης του ΘΗΣ και λειτουργεί διαρκώς (πλην προγραμματισμένων διακοπών για συντήρηση), επομένως η ενσωμάτωση σε αυτόν μιας εγκατάστασης CSP για την παροχή θερμότητας στον λέβητα θα οδηγούσε στη μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες λειτουργίας του είναι αρκούντως χαμηλές ώστε να επιτρέπουν την ενσωμάτωση τέτοιων εγκαταστάσεων, με τη χρήση ευρέως εφαρμοσμένων και δοκιμασμένων εξαρτημάτων και τεχνικών. Στο ΘΗΣ Σορωνής λειτουργούν, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δύο όμοιοι ατμοστρόβιλοι (2x15MWe). Οι υπολογισμοί και η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης θα γίνουν με βάση τις απαιτήσεις σε θερμική ενέργεια του ενός εκ των δύο ατμοστρόβιλων (ισχύος 15MWe). Προφανώς, η ενσωμάτωση στο δεύτερο αεριοστρόβιλο, θα απαιτούσε μία πανομοιότυπη εγκατάσταση, αφού και οι δύο στρόβιλοι έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά.

4.2. ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΟΥ ΘΗΣ ΣΟΡΩΝΗΣ

Στο σχήμα που ακολουθεί (βλ. επόμενη σελίδα) φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας του ατμοηλεκτρικού σταθμού, όπως δόθηκε από τον ΑΗΣ Σορωνής μέσω ανταλλαγής ηλεκτρονικής αλληλογραφίας με τον κ. Σπύρο Πλατή, Δ/ντή του ΚΜΕΕΕ Χανίων - Λινοπεραμάτων - Ρόδου, με τις χαρακτηριστικές τιμές ιδιοτήτων του νερού σε κάθε σημείο του κύκλου του, καθώς και τη μαζική παροχή του.

Η παραγωγή ισχύος πραγματοποιείται με εκτέλεση του κύκλου Rankine με προθέρμανση (αναγέννηση) και υπερθέρμανση του ατμού. Ο απλός κύκλος Rankine, και οι παραλλαγές του, έχουν αναλυθεί στην παράγραφο 3.4.3. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, δε γίνεται αναθέρμανση του ατμού, καθώς δεν υπάρχει επανατροφοδότησή του στη βαθμίδα μέσης πίεσης του στρόβιλου, από τον ατμοπαραγωγό. Η προθέρμανση του συμπυκνώματος (συμπύκνωμα ονομάζεται το ρεύμα νερού τροφοδοσίας που εξέρχεται της αντλίας του συμπυκνωτή) γίνεται σε 4 στάδια, όσες και οι απομαστεύσεις ατμού από το στρόβιλο. Οι απομαστεύσεις γίνονται σε διαφορετικές βαθμίδες του στρόβιλου, πριν την τελική έξοδο του κορεσμένου μίγματος υγρού-ατμού στο συμπυκνωτή. Αν και δεν αναφέρεται ρητά στο διάγραμμα, οι προθερμαντήρες πρέπει να είναι κλειστού τύπου, εφόσον τα δύο ρεύματα (συμπυκνώματος και ατμού) βρίσκονται σε διαφορετικές πιέσεις. Η τρίτη κατά σειρά προθέρμανση γίνεται σε θερμομαντήρα ανοιχτού τύπου (απαεριοτή) για την απομάκρυνση



Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου λειτουργίας της ατμοστροβλικής μονάδας του ΘΗΣ Σορώνης (Πηγή: ΑΗΣ Σορώνης).

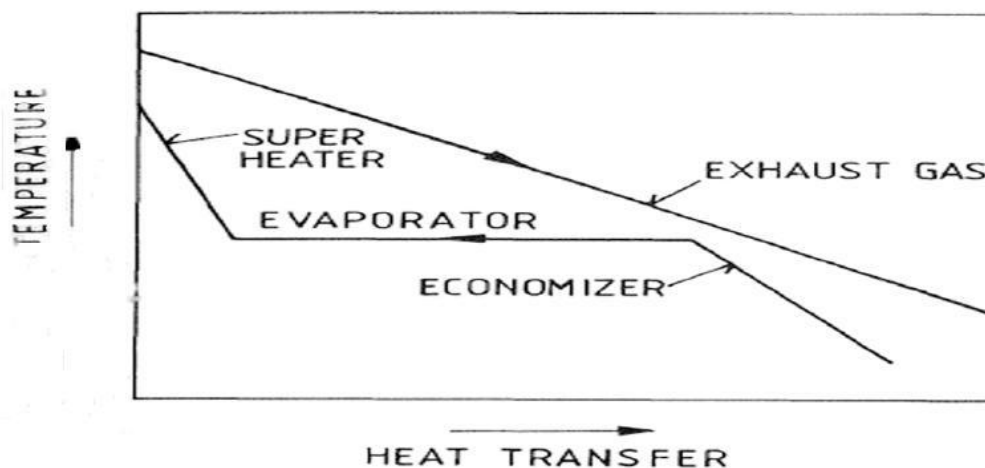
αερίων διαλυμένων στο νερό (π.χ. H_2 , O_2 , N_2 , CO_2), ενώ στην έξοδο του υπάρχει αντλία για την αύξηση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας στην πίεση εισόδου στον ατμοπαραγωγό.

4.2.1. Ατμοπαραγωγός του ΑΗΣ Σορώνης

Ο ατμοπαραγωγός (ή λέβητας) είναι το τμήμα του ατμοηλεκτρικού σταθμού στο οποίο γίνεται η παραγωγή του ατμού. Υπάρχουν πολλοί τύποι λέβητων, αλλά στις ατμοηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά υδραυλωτοί λέβητες, οι οποίοι αποτελούνται από μεγάλο αριθμό σωλήνων (αυλών), που διαμορφώνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ανάμεσά τους εξωτερικά να υπάρχει χώρος για την καύση του καυσίμου, κατά τη ροή του νερού τροφοδοσίας στο εσωτερικό τους^[6]. Τυπικά, η παραγωγή του ατμού, από την είσοδο του συμπυκνώματος, έως την έξοδο του υπέρθερμου ατμού γίνεται σε τρία στάδια^[7]:

1. Αύξηση της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος σε θερμοκρασία 30–50 °C μικρότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση λειτουργίας. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται στον **οικονομητήρα** (economizer – ECO).
2. Αύξηση της θερμοκρασίας στη θερμοκρασία κορεσμού της πίεσης λειτουργίας και πραγματοποίηση της εξάτμισης του νερού τροφοδοσίας. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται στον **ατμοποιητή** (evaporator).
3. Υπερθέρμανση του ατμού στη θερμοκρασία εισόδου του ατμοστροβίλου. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται στον **υπερθερμαντήρα** (superheater).

Η όλη διεργασία θέρμανσης του νερού, ατμοποίησης και υπερθέρμανσης γίνεται υπό σταθερή πίεση (στην πραγματικότητα υπάρχει μικρή πτώση πίεσης που οφείλεται στις απώλειες κατά τη ροή στους αγωγούς του ατμοπαραγωγού). Η μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας κατά τη ροή του μέσω των αυλών του ατμοπαραγωγού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας κατά τη ροή του στους αγωγούς του ατμοπαραγωγού (Πηγή: Λούβρου Σοφία-Άννα, “Υπολογιστική μοντελοποίηση δράσεων για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης πετρελαϊκών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στο διασυνδεδεμένο σύστημα και στην Κρήτη”, 2009)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα λειτουργίας (Σχήμα 4.3), το νερό κατά την είσοδό του στον ατμοπαραγωγό βρίσκεται στην κατάσταση του υπόψυκτου υγρού, καθώς η θερμοκρασία του (184°C) είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού (303,4 °C) στην αντίστοιχη πίεση (90atm = 9,1MPa). Αντίστοιχα, στην έξοδο του συστήματος παραγωγής ατμού, καθώς και στην είσοδο του στροβίλου, η κατάσταση του νερού είναι αυτή του υπέρθερμου ατμού, καθώς η θερμοκρασία του (485°C) είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού (275,64 °C) στην αντίστοιχη πίεση (60atm = 6,1MPa).

Ωστόσο, στο διάγραμμα δε γίνεται διαχωρισμός μεταξύ οικονομητήρα, ατμοποιητή και υπερθερμαντήρα, με αποτέλεσμα οι καταστάσεις του νερού στις επιμέρους διατάξεις του ατμοπαραγωγού να είναι άγνωστες, ενώ παρατηρείται και μία απότομη πτώση της πίεσης του νερού από τις 90atm στις 60atm μεταξύ εισόδου στο λέβητα και εισόδου στο στρόβιλο. Προκειμένου να αποσαφηνιστεί η κατάσταση, πραγματοποιήθηκε εκ νέου επικοινωνία με τον ΑΗΣ Σορώνης, όπου και δόθηκαν διευκρινίσεις, σε τηλεφωνική επικοινωνία με την κα. Φιλιά Μπέρδη, Τομεάρχη Λειτουργίας ΑΗΣ Ρόδου. Όπως διευκρινίστηκε, η πίεση στον οικονομητήρα και τον ατμοποιητή θεωρείται ίση με 65 atm (6,6MPa), ενώ στον υπερθερμαντήρα ίση με 60atm (6,1MPa). Κατά συνέπεια, η ατμοποίηση του νερού θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού στα 6,6MPa, δηλαδή στους 281,64 °C.

Κατόπιν αυτών των διευκρινίσεων, οι καταστάσεις του ρευστού λειτουργίας στα επιμέρους σημεία του κύκλου συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα (έπειτα από μετατροπή μονάδων στο σύστημα SI):

Σημείο του Κύκλου	Πίεση (kPa)	Θερμοκρασία (°C)	Ενθαλπία (kJ/kg)	Παροχή Μάζας (kg/s)
Ατμοπαραγωγός				
Είσοδος ECO ^[a,c,d]	6586	185	785,4	16,66
Έξοδος ECO – Είσοδος Ατμοποιητή ^[b,d]	6586	281,64	1244,6	16,66
Έξοδος Ατμοποιητή - Είσοδος Υπερθερμαντήρα ^d	6586	281,64	2777,5	16,66
Έξοδος Υπερθερμαντήρα	6080	485	3386,3	16,66
Ατμοστρόβιλος				
Είσοδος Στροβίλου	6080	485	3386,3	16,51
Έξοδος Στροβίλου	4,96	0,896	2309,3	12,67
Απομαστεύσεις				
4	1260	312	3063,2	1,13
3 (προς Απαεριωτή)	454	208	2866,4	1,04
2	155	117	2694	0,73
1	57,35	0,963	2557,1	0,95
<p>^a Στην είσοδο του ECO η πίεση θεωρείται ίση με 65atm. ^b Στην έξοδο του ECO, το ρευστό θεωρείται κορεσμένο υγρό στην αντίστοιχη πίεση. ^c Οι τιμές ενθαλπίας για το υπόψυκτο υγρό προκύπτουν από τις τιμές κορεσμένου υγρού υπό την ίδια πίεση. ^d Οι τιμές ενθαλπίας στο τμήμα του ατμοπαραγωγού προέκυψαν από πίνακες τιμών ενθαλπίας κορεσμένου υγρού-ατμού^[8] με γραμμική παρεμβολή.</p>				

Πίνακας 4.3: Ιδιότητες ρευστού λειτουργίας σε σημεία του κύκλου του ΑΗΣ Σορώνης.

4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ

Πριν προχωρήσουμε στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης CSP προς ενσωμάτωση στο τμήμα παροχής θερμότητας (δηλαδή τον αμοπαγωγό) του ΑΗΣ Σορώνης, πρέπει να υπολογίσουμε το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό της περιοχής, τη διαθέσιμη δηλαδή προς αξιοποίηση ηλιακή ακτινοβολία. Οι υπολογισμοί θα γίνουν σε επίπεδο μηνιαίων, ημερήσιων και ωριαίων τιμών ακτινοβολίας, βάσει της μεθοδολογίας και των σχέσεων που αναπτύχθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο.

Σε όποιους υπολογισμούς αυτές απαιτούνται, οι γεωγραφικές συντεταγμένες της υπό εξέτασης περιοχής θεωρούνται ίσες με:

$$\text{Γεωγραφικό Πλάτος } (\varphi) = 36^{\circ} 24' = 0,635 \text{ rad}$$

$$\text{Γεωγραφικό Μήκος } (L) = 28^{\circ} 07' = 0,491 \text{ rad}$$

και ταυτίζονται με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του Μετεωρολογικού Σταθμού της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας που πραγματοποίησε τις μετρήσεις^[9].

4.3.1. Υπολογισμός Μηνιαίου Μέσου Ημερήσιου Δείκτη Αιθριότητας

Αρχικά υπολογίζεται η ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία από τη σχέση (2.2.2.2) για κάθε ημέρα του χρόνου. Οι τιμές της ηλιακής απόκλισης δ υπολογίζονται από τη σχέση (2.1.1), η ηλιακή γωνία δύσης ω_s από τη σχέση (2.1.2), ενώ το γεωγραφικό πλάτος φ λαμβάνεται ίσο με 0,635 rad.

Στη συνέχεια, οι ημερήσιες τιμές αθροίζονται για κάθε μήνα, οπότε προκύπτει η συνολική μηνιαία εξωγήινη ακτινοβολία. Η τιμή της διαιρείται με τον αριθμό ημερών του κάθε μήνα, οπότε προκύπτει η τιμή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας εξωγήινης ακτινοβολίας \bar{H}_0 για κάθε μήνα.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για την μηνιαία μέση ολική ακτινοβολία \bar{H} . Στον πίνακα Π1 του Παραρτήματος υπάρχουν οι τιμές της συνολικής μηνιαίας ακτινοβολίας για το νησί της Ρόδου. Οι τιμές αυτές διαιρούνται με τον αριθμό ημερών του κάθε μήνα, οπότε προκύπτει η τιμή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας \bar{H} για κάθε μήνα.

Ο μηνιαίος μέσος ημερήσιος δείκτης αιθριότητας \bar{K}_T , για κάθε μήνα, υπολογίζεται από τη σχέση (2.2.2.4). Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα, ενώ τα αναλυτικά φύλλα υπολογισμών παρατίθενται στο Παράρτημα.

Μήνας	Συνολική Μηνιαία Εξωγήινη Ακτινοβολία $\sum_N H_0$ (kWh/m ²)	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία \bar{H}_0 (kWh/m ²)	Συνολική Μηνιαία Ολική Ακτινοβολία $\sum_N H$ (kWh/m ²)	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Ολική Ακτινοβολία \bar{H} (kWh/m ²)	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας \bar{K}_T
ΙΑΝ	150,4	4,852	69,9	2,25	0,465
ΦΕΒ	173,6	6,200	85,1	3,04	0,490
ΜΑΡ	249,8	8,058	130,8	4,219	0,5236
ΑΠΡ	296,1	9,870	164,0	5,467	0,5539
ΜΑΙ	343,6	11,08	203,0	6,548	0,5908
ΙΟΥΝ	346,7	11,56	217,2	7,240	0,6265
ΙΟΥΛ	350,2	11,30	225,1	7,261	0,6428
ΑΥΓ	319,0	10,29	204,3	6,590	0,6404
ΣΕΠ	259,7	8,657	158,9	5,297	0,6119
ΟΚΤ	208,8	6,735	120,2	3,877	0,5757
ΝΟΕ	154,3	5,143	79,2	2,64	0,513
ΔΕΚ	137,5	4,435	61,2	1,97	0,445

Τα σημαντικά ψηφία των αποτελεσμάτων προσδιορίζονται από τα σημαντικά ψηφία της Συνολικής Μηνιαίας Ολικής Ακτινοβολίας

$\bar{H}_0 = \frac{1}{N} \sum_N H_0$ N=Αριθμός Ημερών Μήνα (N=28 για τον Φεβρουάριο)	$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_N H$ N=Αριθμός Ημερών Μήνα (N=28 για τον Φεβρουάριο)
---	---

Πίνακας 4.4: Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας \bar{K}_T για το νησί της Ρόδου.

4.3.2. Υπολογισμός συνιστώσων Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου

Για τον υπολογισμό του μηνιαίου μέσου ημερήσιου δείκτη διάχυσης \bar{K}_d θα χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη πρωτοβάθμια σχέση των Lalas et al. από τις σχέσεις (2.2.2.7). Οι συνιστώσες της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (2.2.2.7) και (2.2.2.8). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήνας	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας \bar{K}_T	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Διάχυσης \bar{K}_d	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Ολική Ακτινοβολία \bar{H} (kWh/m ²)	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Διάχυτη Ακτινοβολία \bar{H}_d (kWh/m ²)	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Άμεση Ακτινοβολία \bar{H}_b (kWh/m ²)
ΙΑΝ	0,465	0,60	2,25	1,3	0,95
ΦΕΒ	0,490	0,56	3,04	1,7	1,3
ΜΑΡ	0,5236	0,51	4,219	2,1	2,1
ΑΠΡ	0,5539	0,46	5,467	2,5	3,0
ΜΑΙ	0,5908	0,41	6,548	2,7	3,8
ΙΟΥΝ	0,6265	0,35	7,240	2,5	4,7
ΙΟΥΛ	0,6428	0,33	7,261	2,4	4,9
ΑΥΓ	0,6404	0,33	6,590	2,2	4,4
ΣΕΠ	0,6119	0,37	5,297	2,0	3,3
ΟΚΤ	0,5757	0,43	3,877	1,7	2,2
ΝΟΕ	0,513	0,53	2,64	1,4	1,2
ΔΕΚ	0,445	0,63	1,97	1,2	0,77

Τα σημαντικά ψηφία των αποτελεσμάτων προκύπτουν από τον όρο με τα λιγότερα σημαντικά ψηφία

$\bar{K}_d = 1,31 - 1,53 \cdot \bar{K}_T$	$\bar{H}_d = \bar{K}_d \cdot \bar{H}$	$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d$
---	---------------------------------------	-----------------------------------

Πίνακας 4.5: Συνιστώσες Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ακτινοβολίας για το νησί της Ρόδου.

Σημείωση: Στον Πίνακα Π2 του Παραρτήματος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τον δείκτη διάχυσης \bar{K}_d από τις σχέσεις των Lalas et al. και Erbs et al. αντίστοιχα, και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Οι διαφορές είναι σημαντικές και αντικατοπτρίζουν τα αυξημένα επίπεδα διάχυτης ακτινοβολίας που εντοπίζονται στον ελληνικό χώρο, ειδικά κατά τους χειμερινούς μήνες.

4.3.3. Υπολογισμός συνιστώσων Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου

Όπως αναφέρθηκε στην αντίστοιχα παράγραφο του 2^{ου} κεφαλαίου, στην παρούσα εργασία θα υιοθετηθεί η προσέγγιση ότι κάθε μήνας αποτελείται από πανομοιότυπες μέρες. Αυτό σημαίνει ότι οι ημερήσιες τιμές του κάθε μεγέθους είναι ίσες με τη μέση μηνιαία, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Μήνας	Αριθμός Ημερών	Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας K_T	Ημερήσιος Δείκτης Διάχυσης K_d	Ημερήσια Ολική Ακτινοβολία H (kWh/m ²)	Ημερήσια Διάχυτη Ακτινοβολία H_d (kWh/m ²)	Ημερήσια Άμεση Ακτινοβολία H_b (kWh/m ²)
ΙΑΝ	31	0,465	0,60	2,25	1,3	0,95
ΦΕΒ	28	0,490	0,56	3,04	1,7	1,3
ΜΑΡ	31	0,5236	0,51	4,219	2,1	2,1
ΑΠΡ	30	0,5539	0,46	5,467	2,5	3,0
ΜΑΙ	31	0,5908	0,41	6,548	2,7	3,8
ΙΟΥΝ	30	0,6265	0,35	7,240	2,5	4,7
ΙΟΥΛ	31	0,6428	0,33	7,261	2,4	4,9
ΑΥΓ	31	0,6404	0,33	6,590	2,2	4,4
ΣΕΠ	30	0,6119	0,37	5,297	2,0	3,3
ΟΚΤ	31	0,5757	0,43	3,877	1,7	2,2
ΝΟΕ	30	0,513	0,53	2,64	1,4	1,2
ΔΕΚ	31	0,445	0,63	1,97	1,2	0,77

Τα σημαντικά ψηφία των αποτελεσμάτων προκύπτουν από τον όρο με τα λιγότερα σημαντικά ψηφία

Πίνακας 4.6: Συνιστώσες Ημερήσιας Ακτινοβολίας για το νησί της Ρόδου

4.3.4. Υπολογισμός συνιστώσων Ωριαίας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου

Στην προηγούμενη παράγραφο υπολογίστηκαν οι συνιστώσες της ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας για τη «μέση ημέρα» κάθε μήνα του έτους, ενώ θεωρήθηκε ότι κάθε μήνας αποτελείται από πανομοιότυπες ημέρες, με τιμές ακτινοβολίας ίσες με αυτές της μέσης ημέρας. Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (2.2.2.14 - 16).

Αρχικά υπολογίζεται η συνολική διάρκεια της ημέρας (αριθμός ωρών από την ανατολή ως τη δύση του Ηλίου) από τη σχέση (2.1.3), για τη μέση ημέρα κάθε μήνα. Στη σχέση αυτή η γωνία δύσης ω_s λαμβάνεται ίση με τη γωνία δύσης της διαμέσου κάθε μήνα. Διάμεσος ημέρα είναι η 16η ημέρα κάθε μήνα, πλην του Φεβρουαρίου, για τον οποίο είναι η 15η. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

Μήνας	Αριθμός Ημερών	Διάμεσος	Γωνία Δύσης ω_s (rad)	Γωνία Δύσης ω_s (Μοίρες)	Διάρκεια Ημέρας (Ωρες)
ΙΑΝ	31	16	1,2824	73,48	9,80
ΦΕΒ	28	15	1,3958	79,97	10,66
ΜΑΡ	31	16	1,5397	88,22	11,76
ΑΠΡ	30	16	1,6983	97,31	12,97
ΜΑΙ	31	16	1,8279	104,73	13,96
ΙΟΥΝ	30	16	1,8948	108,56	14,48
ΙΟΥΛ	31	16	1,8632	106,75	14,23
ΑΥΓ	31	16	1,7481	100,16	13,35
ΣΕΠ	30	15	1,5942	91,34	12,18
ΟΚΤ	31	16	1,4409	82,56	11,01
ΝΟΕ	30	16	1,3085	74,97	10,00
ΔΕΚ	31	16	1,2465	71,42	9,52

Πίνακας 4.7: Διάρκεια ημέρας για τη μέση ημέρα κάθε μήνα για το νησί της Ρόδου

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι συνιστώσες (άμεση - διάχυτη) της ολικής ωριαίας ακτινοβολίας από τις σχέσεις (2.2.2.14 -16) για κάθε ώρα της μέσης ημέρας κάθε μήνα. Υπενθυμίζεται ότι η ανάλυση γίνεται σε Τοπική Φαινόμενη Ώρα (το ηλιακό μεσημέρι, ώρα 12:00, αντιστοιχεί σε ηλιακή ωριαία γωνία $\omega=0$). Στις σχέσεις (2.2.2.14 - 16), ως ηλιακή ωριαία γωνία ω , λαμβάνεται η γωνία που αντιστοιχεί στο μέσον της κάθε ώρας (π.χ. η γωνία που αντιστοιχεί στις 11:30 για το διάστημα 11:00-12:00). Στην περίπτωση των μη ακεραίων ωρών (δεκαδικά τμήματα στον παραπάνω πίνακα), η ηλιακή ωριαία γωνία ω αντιστοιχεί στο μέσον μεταξύ ανατολής ή δύσης ηλίου και της τελευταίας ακεραίας ώρας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα των υπολογισμών για τις συνιστώσες της ωριαίας ακτινοβολίας (ολική-άμεση-διάχυτη) για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, ενώ τα αναλυτικά φύλλα υπολογισμών παρατίθενται στο Παράρτημα.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΙΑΝ			ΦΕΒ			ΜΑΡ		
	I (kWh/m ²)	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)
04:00-05:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
05:00-06:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
06:00-07:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0157	0,0128	0,0029	0,0473	0,0235	0,0237
07:00-08:00	0,0407	0,0317	0,0091	0,0863	0,0626	0,0237	0,1659	0,0826	0,0833
08:00-09:00	0,1384	0,0929	0,0455	0,2060	0,1304	0,0756	0,3055	0,1521	0,1534
09:00-10:00	0,2428	0,1458	0,0970	0,3241	0,1858	0,1383	0,4387	0,2184	0,2203
10:00-11:00	0,3278	0,1832	0,1446	0,4186	0,2250	0,1936	0,5433	0,2704	0,2729
11:00-12:00	0,3755	0,2026	0,1729	0,4710	0,2452	0,2258	0,6008	0,2990	0,3017
12:00-13:00	0,3755	0,2026	0,1729	0,4710	0,2452	0,2258	0,6008	0,2990	0,3017
13:00-14:00	0,3278	0,1832	0,1446	0,4186	0,2250	0,1936	0,5433	0,2704	0,2729
14:00-15:00	0,2428	0,1458	0,0970	0,3241	0,1858	0,1383	0,4387	0,2184	0,2203
15:00-16:00	0,1384	0,0929	0,0455	0,2060	0,1304	0,0756	0,3055	0,1521	0,1534
16:00-17:00	0,0407	0,0317	0,0091	0,0863	0,0626	0,0237	0,1659	0,0826	0,0833
17:00-18:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0157	0,0128	0,0029	0,0473	0,0235	0,0237
18:00-19:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:00-20:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Πίνακας 4.8: Συνιστώσες ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, στο οριζόντιο επίπεδο, για τη μέση ημέρα κάθε μήνα για το νησί της Ρόδου.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΑΠΡ			ΜΑΙ			ΙΟΥΝ		
	I (kWh/m ²)	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)
04:00-05:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0126	0,0063	0,0064
05:00-06:00	0,0259	0,0172	0,0087	0,0544	0,0211	0,0233	0,0855	0,0396	0,0459
06:00-07:00	0,1163	0,0698	0,0465	0,1853	0,0950	0,0903	0,2262	0,0947	0,1315
07:00-08:00	0,2584	0,1381	0,1203	0,3380	0,1572	0,1808	0,3860	0,1479	0,2381
08:00-09:00	0,4096	0,1994	0,2102	0,4960	0,2130	0,2830	0,5494	0,1956	0,3538
09:00-10:00	0,5498	0,2494	0,3004	0,6398	0,2586	0,3812	0,6968	0,2345	0,4622
10:00-11:00	0,6580	0,2848	0,3733	0,7494	0,2908	0,4586	0,8086	0,2621	0,5466
11:00-12:00	0,7170	0,3031	0,4139	0,8088	0,3075	0,5013	0,8690	0,2763	0,5927
12:00-13:00	0,7170	0,3031	0,4139	0,8088	0,3075	0,5013	0,8690	0,2763	0,5927
13:00-14:00	0,6580	0,2848	0,3733	0,7494	0,2908	0,4586	0,8086	0,2621	0,5466
14:00-15:00	0,5498	0,2494	0,3004	0,6398	0,2586	0,3812	0,6968	0,2345	0,4622
15:00-16:00	0,4096	0,1994	0,2102	0,4960	0,2130	0,2830	0,5494	0,1956	0,3538
16:00-17:00	0,2584	0,1381	0,1203	0,3380	0,1572	0,1808	0,3860	0,1479	0,2381
17:00-18:00	0,1163	0,0698	0,0465	0,1853	0,0950	0,0903	0,2262	0,0947	0,1315
18:00-19:00	0,0259	0,0172	0,0087	0,0544	0,0311	0,0233	0,0855	0,0396	0,0459
19:00-20:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0126	0,0063	0,0064

Πίνακας 4.8 (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΙΟΥΛ			ΑΥΓ			ΣΕΠ		
	I (kWh/m ²)	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)
04:00-05:00	0,0064	0,0031	0,0033	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
05:00-06:00	0,0736	0,0332	0,0404	0,0411	0,0196	0,0215	0,0052	0,0029	0,0022
06:00-07:00	0,2171	0,0880	0,1291	0,1595	0,0684	0,0911	0,0745	0,0389	0,0356
07:00-08:00	0,3816	0,1410	0,2406	0,3238	0,1245	0,1992	0,2248	0,1025	0,1223
08:00-09:00	0,5507	0,1885	0,3621	0,4965	0,1749	0,3216	0,3894	0,1596	0,2298
09:00-10:00	0,7038	0,2273	0,4765	0,6555	0,2160	0,4395	0,5448	0,2062	0,3386
10:00-11:00	0,8203	0,2548	0,5655	0,7776	0,2451	0,5325	0,6660	0,2391	0,4268
11:00-12:00	0,8833	0,2690	0,6143	0,8440	0,2602	0,5838	0,7324	0,2562	0,4762
12:00-13:00	0,8833	0,2690	0,6143	0,8440	0,2602	0,5838	0,7324	0,2562	0,4762
13:00-14:00	0,8203	0,2548	0,5655	0,7776	0,2451	0,5325	0,6660	0,2391	0,4268
14:00-15:00	0,7038	0,2273	0,4765	0,6555	0,2160	0,4395	0,5448	0,2062	0,3386
15:00-16:00	0,5507	0,1885	0,3621	0,4965	0,1749	0,3216	0,3894	0,1596	0,2298
16:00-17:00	0,3816	0,1410	0,2406	0,3238	0,1245	0,1992	0,2248	0,1025	0,1223
17:00-18:00	0,2171	0,0880	0,1291	0,1595	0,0684	0,0911	0,0745	0,0389	0,0356
18:00-19:00	0,0736	0,0332	0,0404	0,0411	0,0196	0,0215	0,0052	0,0029	0,0022
19:00-20:00	0,0064	0,0031	0,0033	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Πίνακας 4.8 (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΟΚΤ			ΝΟΕ			ΔΕΚ		
	I (kWh/m ²)	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	I (kWh/m ²)	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)
04:00-05:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
05:00-06:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
06:00-07:00	0,0285	0,0180	0,0105	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
07:00-08:00	0,1252	0,0700	0,0552	0,0507	0,0361	0,0146	0,0322	0,0265	0,0057
08:00-09:00	0,2697	0,1325	0,1372	0,1669	0,1022	0,0647	0,1159	0,0828	0,0332
09:00-10:00	0,4104	0,1835	0,2269	0,2843	0,1562	0,1281	0,2129	0,1354	0,0775
10:00-11:00	0,5224	0,2196	0,3028	0,3796	0,1944	0,1852	0,2924	0,1726	0,1198
11:00-12:00	0,5844	0,2383	0,3461	0,4328	0,2142	0,2187	0,3371	0,1919	0,1452
12:00-13:00	0,5844	0,2383	0,3461	0,4328	0,2142	0,2187	0,3371	0,1919	0,1452
13:00-14:00	0,5224	0,2196	0,3028	0,3796	0,1944	0,1852	0,2924	0,1726	0,1198
14:00-15:00	0,4104	0,1835	0,2269	0,2843	0,1562	0,1281	0,2129	0,1354	0,0775
15:00-16:00	0,2697	0,1325	0,1372	0,1669	0,1022	0,0647	0,1159	0,0828	0,0332
16:00-17:00	0,1252	0,0700	0,0552	0,0507	0,0361	0,0146	0,0322	0,0265	0,0057
17:00-18:00	0,0285	0,0180	0,0105	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18:00-19:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:00-20:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Πίνακας 4.8 (Συνέχεια)

4.3.5. Υπολογισμός Ωριαίας Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες

Ο υπολογισμός της ωριαίας ηλιακής άμεσης ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία $I_{b,n}$ για τη μέση ημέρα κάθε μήνα γίνεται χρησιμοποιώντας τις τιμές της I_b από τον Πίνακα 4.8 της προηγούμενης παραγράφου, μέσω της σχέσης (2.2.2.17).

Ο υπολογισμός της γωνίας ζενίθ θ_z γίνεται μέσω της σχέσης (2.1.4). Ως ηλιακή ωριαία γωνία ω , λαμβάνεται η γωνία που αντιστοιχεί στο μέσον της κάθε ώρας (π.χ. η γωνία που αντιστοιχεί στις 11:30 για το διάστημα 11:00-12:00). Στην περίπτωση των μη ακεραίων ωρών, η ηλιακή ωριαία γωνία ω αντιστοιχεί στο μέσον μεταξύ ανατολής ή δύσης ηλίου και της τελευταίας ακεραίας ώρας. Η ισχύς της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες $G_{b,n}$ (αλλιώς και DNI – Direct Normal Insolation) είναι αριθμητικά ίση με την $I_{b,n}$.

Οι υπολογισμοί γίνονται μόνο για τις ώρες μεταξύ ανατολής και δύσεως ηλίου για τη μέση ημέρα κάθε μήνα. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ τα αναλυτικά φύλλα υπολογισμών για τις γωνίες ζενίθ θ_z , ηλιακού ύψους a και αζιμούθιου A_z για κάθε ώρα της μέσης ημέρας κάθε μήνα παρατίθενται στο Παράρτημα.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΙΑΝ			ΦΕΒ			ΜΑΡ		
	I_b (kWh/m ²)	θ_z (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θ_z (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θ_z (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)
04:00-05:00									
05:00-06:00									
06:00-07:00				0,0029	88,09	0,0870	0,0237	84,70	0,2568
07:00-08:00	0,0091	85,24	0,1097	0,0237	80,60	0,1451	0,0833	73,58	0,2946
08:00-09:00	0,0455	75,90	0,1868	0,0756	70,10	0,2221	0,1534	62,32	0,3302
09:00-10:00	0,0970	67,53	0,2538	0,1383	60,98	0,2851	0,2203	52,20	0,3594
10:00-11:00	0,1446	61,30	0,3011	0,1936	54,03	0,3296	0,2729	44,12	0,3801
11:00-12:00	0,1729	57,93	0,3256	0,2258	50,19	0,3527	0,3017	39,44	0,3907
12:00-13:00	0,1729	57,93	0,3256	0,2258	50,19	0,3527	0,3017	39,44	0,3907
13:00-14:00	0,1446	61,30	0,3011	0,1936	54,03	0,3296	0,2729	44,12	0,3801
14:00-15:00	0,0970	67,53	0,2538	0,1383	60,98	0,2851	0,2203	52,20	0,3594
15:00-16:00	0,0455	75,90	0,1867	0,0756	70,10	0,2221	0,1534	62,32	0,3302
16:00-17:00	0,0091	85,24	0,1097	0,0237	80,60	0,1451	0,0833	73,58	0,2946
17:00-18:00				0,0029	88,09	0,0870	0,0237	84,70	0,2568
18:00-19:00									
19:00-20:00									

Πίνακας 4.9: Ωριαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία, σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες, για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, στο νησί της Ρόδου.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΑΠΡ			ΜΑΙ			ΙΟΥΝ		
	I_b (kWh/m ²)	θ_z (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θ_z (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θ_z (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)
04:00-05:00							0,0064	88,74	0,2911
05:00-06:00	0,0087	87,12	0,1731	0,0233	84,49	0,2428	0,0459	82,02	0,3306
06:00-07:00	0,0465	78,21	0,2275	0,0903	72,97	0,3084	0,1315	70,63	0,3965
07:00-08:00	0,1203	66,15	0,2975	0,1808	61,01	0,3730	0,2381	58,80	0,4596
08:00-09:00	0,2102	54,29	0,3601	0,2830	48,95	0,4309	0,3538	46,76	0,5165
09:00-10:00	0,3004	43,10	0,4114	0,3812	37,14	0,4782	0,4622	34,77	0,5627
10:00-11:00	0,3733	33,52	0,4478	0,4586	26,30	0,5116	0,5466	23,37	0,5954
11:00-12:00	0,4139	27,47	0,4665	0,5013	18,58	0,5289	0,5927	14,56	0,6124
12:00-13:00	0,4139	27,47	0,4665	0,5013	18,58	0,5289	0,5927	14,56	0,6124
13:00-14:00	0,3733	33,52	0,4478	0,4586	26,30	0,5116	0,5466	23,37	0,5954
14:00-15:00	0,3004	43,10	0,4114	0,3812	37,14	0,4782	0,4622	34,77	0,5627
15:00-16:00	0,2102	54,29	0,3601	0,2830	48,95	0,4309	0,3538	46,76	0,5165
16:00-17:00	0,1203	66,15	0,2975	0,1808	61,01	0,3730	0,2381	58,80	0,4596
17:00-18:00	0,0465	78,21	0,2275	0,0903	72,97	0,3084	0,1315	70,63	0,3965
18:00-19:00	0,0087	87,12	0,1731	0,0233	84,49	0,2428	0,0459	82,02	0,3306
19:00-20:00							0,0064	88,74	0,2911

Πίνακας 4.9 (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΙΟΥΛ			ΑΥΓ			ΣΕΠ		
	I_b (kWh/m ²)	θz (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θz (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θz (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)
04:00-05:00	0,0033	89,37	0,2994						
05:00-06:00	0,0404	83,21	0,3417	0,0215	86,06	0,3127	0,0022	89,46	0,2344
06:00-07:00	0,1291	71,70	0,4112	0,0911	76,10	0,3792	0,0356	82,89	0,2876
07:00-08:00	0,2406	59,80	0,4784	0,1992	64,05	0,4552	0,1223	70,93	0,3744
08:00-09:00	0,3621	47,75	0,5385	0,3216	52,08	0,5233	0,2298	59,43	0,4519
09:00-10:00	0,4765	35,83	0,5877	0,4395	40,61	0,5790	0,3386	48,93	0,5153
10:00-11:00	0,5655	24,68	0,6223	0,5325	30,54	0,6183	0,4268	40,36	0,5601
11:00-12:00	0,6143	16,40	0,6404	0,5838	23,91	0,6386	0,4762	35,27	0,5833
12:00-13:00	0,6143	16,40	0,6404	0,5838	23,91	0,6386	0,4762	35,27	0,5833
13:00-14:00	0,5655	24,68	0,6223	0,5325	30,54	0,6183	0,4268	40,36	0,5601
14:00-15:00	0,4765	35,83	0,5877	0,4395	40,61	0,5790	0,3386	48,93	0,5153
15:00-16:00	0,3621	47,75	0,5385	0,3216	52,08	0,5233	0,2298	59,43	0,4519
16:00-17:00	0,2406	59,80	0,4784	0,1992	64,05	0,4552	0,1223	70,93	0,3744
17:00-18:00	0,1291	71,70	0,4112	0,0911	76,10	0,3792	0,0356	82,89	0,2876
18:00-19:00	0,0404	83,21	0,3417	0,0215	86,06	0,3127	0,0022	89,46	0,2344
19:00-20:00	0,0033	89,37	0,2994						

Πίνακας 4.9 (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΟΚΤ			ΝΟΕ			ΔΕΚ		
	I_b (kWh/m ²)	θz (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θz (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	θz (Μοίρες)	$I_{b,n}$ (kWh/m ²)
04:00-05:00									
05:00-06:00									
06:00-07:00	0,0105	87,05	0,2037						
07:00-08:00	0,0552	78,42	0,2751	0,0146	84,62	0,1559	0,0057	86,07	0,0832
08:00-09:00	0,1372	67,67	0,3612	0,0647	74,61	0,2438	0,0332	77,62	0,1549
09:00-10:00	0,2269	58,25	0,4312	0,1281	66,08	0,3159	0,0775	69,47	0,2209
10:00-11:00	0,3028	50,97	0,4809	0,1852	59,70	0,3670	0,1198	63,44	0,2679
11:00-12:00	0,3461	46,90	0,5065	0,2187	56,23	0,3934	0,1452	60,19	0,2921
12:00-13:00	0,3461	46,90	0,5065	0,2187	56,23	0,3934	0,1452	60,19	0,2921
13:00-14:00	0,3028	50,97	0,4809	0,1852	59,70	0,3670	0,1198	63,44	0,2679
14:00-15:00	0,2269	58,25	0,4312	0,1281	66,08	0,3159	0,0775	69,47	0,2209
15:00-16:00	0,1372	67,67	0,3612	0,0647	74,61	0,2438	0,0332	77,62	0,1549
16:00-17:00	0,0552	78,42	0,2751	0,0146	84,62	0,1559	0,0057	86,07	0,0832
17:00-18:00	0,0105	87,05	0,2037						
18:00-19:00									
19:00-20:00									

Πίνακας 4.9 (Συνέχεια)

4.4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CSP ΠΡΟΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΟΝ ΑΗΣ ΣΟΡΩΝΗΣ

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η επιλογή της τεχνολογίας CSP προς ενσωμάτωση στον ΑΗΣ Σορώνης, μεταξύ των τριών που ανεπτύχθησαν στο 3^ο κεφάλαιο (συλλέκτες παραβολικής σκάφης, ηλιακοί πύργοι, και δίσκοι/Stirling), οι στόχοι τους οποίους θα πρέπει να εκπληροί το σύστημα, καθώς και η επιλογή των υποσυστημάτων που θα το απαρτίζουν, βάσει των ευρύτερα εφαρμοζόμενων τεχνικών σε κάθε τεχνολογία. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία σχεδίασης του συστήματος, και θα γίνει ο καθορισμός του σημείου σχεδίασης στο οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί για τη διαστασιολόγηση των υποσυστημάτων και την εύρεση των χαρακτηριστικών τιμών λειτουργίας της διάταξης.

4.4.1. Επιλογή Τεχνολογίας CSP

Στόχο της εφαρμογής αποτελεί η ενσωμάτωση της διάταξης συλλογής και εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία ήδη λειτουργούσα ατμοηλεκτρική μονάδα, για την παροχή θερμότητας σε αυτή. Βάσει των όσων λέχθησαν στο 3^ο κεφάλαιο, κάτι τέτοιο δε μπορεί να πραγματοποιηθεί με δίσκους/Stirling, καθώς η τροφοδοσία νερού και η παραγωγή ατμού στο πεδίο συλλεκτών βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Επομένως, η επιλογή θα γίνει μεταξύ ηλιακών πύργων και συλλεκτών παραβολικής σκάφης. Το μέγεθος της μονάδας (ισχύος 15MW) υποδεικνύει ότι η προσθήκη των δευτέρων θα αποτελούσε την οικονομικότερη επιλογή, καθώς οι ηλιακοί πύργοι καθίστανται συμφέρουσες επενδύσεις σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος. Επιπλέον, οι συλλέκτες παραβολικής σκάφης αποτελούν την ευρύτερα δοκιμασμένη τεχνολογία, οπότε μπορούμε να είμαστε σχετικά βέβαιοι ότι το ρίσκο της επένδυσης θα είναι μικρό.

Σε ότι αφορά στη μετάδοση θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας, αυτή θα γίνεται μέσω εναλλακτών θερμότητας, με χρήση ρευστού μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid - HTF). Η παραγωγή ατμού απευθείας στο πεδίο συλλεκτών δεν έχει βρει ακόμη εμπορική εφαρμογή, ενώ συναντά προβλήματα στην αποθήκευση της θερμότητας, όπως ειπώθηκε στην παράγραφο 3.5.1.3. Ωστόσο, η χρήση ενδιάμεσων ρευστών μεταφοράς θερμότητας επιβάλλει τους δικούς της περιορισμούς, ο κυριότερος εκ των οποίων είναι η ανώτερη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί στο πεδίο συλλεκτών, η οποία γενικά δε μπορεί να ξεπερνά τους 400°C καθώς αυτή αποτελεί τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των ρευστών. Επομένως, η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί στον εναλλάκτη δε μπορεί να ξεπερνάει αυτή την τιμή.

Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται οι θερμοκρασίες των τριών σταδίων θέρμανσης του ατμού στον ατμοπαραγωγό (185-281,64°C στον οικονομητήρα, 281,64 °C στον ατμοποιητή, και 281,64-485 °C στον υπερθερμαντήρα). Βάσει του περιορισμού για μέγιστη θερμοκρασία του HTF στους 400°C, προκύπτει ότι η παροχή θερμότητας από το πεδίο συλλεκτών μπορεί να γίνει στα στάδια του οικονομητήρα και του ατμοποιητή. Εξάλλου, από τις τιμές ενθαλπίας του νερού στον ίδιο πίνακα, προκύπτει ότι το 76,5% της θερμότητας παρέχεται σε αυτά τα δύο στάδια. Επομένως, αν μέρος της θερμότητας που καταναλώνεται σε αυτά μπορεί να προέλθει από ανανεώσιμες πηγές, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου.

4.4.2. Στόχοι Σχεδίασης

Οι στόχοι που θα πρέπει η διάταξη να εκπληροί είναι οι παρακάτω:

- Παροχή θερμότητας στο σημείο σχεδίασης από το πεδίο συλλεκτών, ίση με το 100% της ζήτησης.
- Δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας για εξυπηρέτηση δωρης ζήτησης υπό πλήρες φορτίο, στο σημείο σχεδίασης.

Σημείο Σχεδίασης

Ως σημείο σχεδίασης της διάταξης λαμβάνεται η ημέρα και ώρα με την υψηλότερη τιμή άμεσης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (συμβολίζεται με DNI ή $G_{b,n}$ και έχει μονάδες W/m^2). Η διαστασιολόγηση των υποσυστημάτων, και οι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών τιμών λειτουργίας της διάταξης, γίνονται σε αυτό το σημείο.

Από τον πίνακα 4.9 προκύπτει ότι το σημείο αυτό είναι το ηλιακό μεσημέρι (12:00 σε Τοπική Φαινόμενη Ωρα) της μέσης ημέρας του Ιουλίου, με τιμή:

$$\boxed{DNI_{\text{Design Point}} = 0,6426 \text{ kWh/m}^2 \text{ ή } 642,6 \text{ W/m}^2}$$

Υπολογισμός Ζήτησης

Η ζήτηση από τον ΑΗΣ ως ποσό θερμότητας είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς αυτός αποτελεί μονάδα βάσης για τον ΘΗΣ Σορώνης. Ο υπολογισμός της ζήτησης σε θερμική ενέργεια για τον οικονομητήρα και τον ατμοποιητή προκύπτει από τις τιμές του Πίνακα 4.3, μέσω της σχέσης:

$$\dot{Q}_{\text{demand}} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \text{ (kW)} \quad (4.4.2.1)$$

όπου: \dot{m} η μαζική παροχή

$h_{\text{in}}, h_{\text{out}}$ η ενθαλπία του ρευστού στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για τον οικονομητήρα και ατμοποιητή αντίστοιχα, προκύπτει:

Ζήτηση Οικονομητήρα

$$\dot{Q}_{\text{demand,ECO}} = 16,66 \cdot (1244,6 - 785,4) \Rightarrow$$

$$\dot{Q}_{\text{demand,ECO}} = 7650,272 \text{ kW}$$

Ζήτηση Ατμοποιητή

$$\dot{Q}_{\text{demand,EVAP}} = 16,66 \cdot (2777,5 - 1244,6) \Rightarrow$$

$$\dot{Q}_{\text{demand,EVAP}} = 25538,114 \text{ kW}$$

Υπολογισμός Χωρητικότητας Αποθήκευσης για την κάλυψη της ζήτησης στο Σημείο Σχεδίασης

Εφόσον η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια πρέπει να καλύπτει, στο σημείο σχεδίασης, τη σταθερή ζήτηση επί 8 ώρες, η τιμή της προκύπτει από το γινόμενο της συνολικής ζήτησης, δηλαδή του αθροίσματος της ζήτησης οικονομητήρα και ατμοποιητή, επί το χρόνο αυτό. Επομένως, προκύπτει:

$$Q_{storage} = (\dot{Q}_{demand,ECO} + \dot{Q}_{demand,EVAP}) \cdot 8h \Rightarrow$$
$$Q_{storage} = 265507,088kWh$$

4.4.3. Επιλογή Υποσυστημάτων

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει η επιλογή των υποσυστημάτων που απαρτίζουν την εγκατάσταση CSP, και συγκεκριμένα των συλλεκτών και του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας.

Στους συλλέκτες θα γίνει επιλογή των κατόπτρων και του δέκτη που τους αποτελούν, ενώ κατά την επιλογή του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης (το οποίο είναι σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, δύο δεξαμενών) θα γίνει η επιλογή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, η επιλογή μεταξύ συστήματος άμεσης και έμμεσης αποθήκευσης, και η επιλογή του μέσου αποθήκευσης (εφόσον αυτό είναι διαφορετικό από το ρευστό μεταφοράς) και των εναλλακτών θερμότητας, εάν αυτοί απαιτούνται.

Επιλογή και Χαρακτηριστικά Συλλεκτών

Για την κατασκευή του πεδίου συλλεκτών επιλέγονται συλλέκτες Eurotrough ET-150. Σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις συλλεκτών παραβολικής σκάφης(Luz LS-1, LS-2, LS-3) οι συλλέκτες Eurotrough χαρακτηρίζονται από αυξημένη οπτική απόδοση, μικρότερες απώλειες σκίασης, μειωμένο κατά 14% βάρος, ευκολότερη μεταφορά και εγκατάσταση και χαμηλότερες απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης. Επίσης, αποτελούνται από 12 στοιχεία, με το συνολικό μήκος να ανέρχεται στα 150m, έτσι ώστε να αυξάνεται η συνολική επιφάνεια ανά συλλέκτη, και να μειώνονται τα κόστη των κινητήρων, στηρίξεων, σωληνώσεων διασύνδεσης και συστημάτων ελέγχου κατά 10%. Οι συλλέκτες αυτοί χρησιμοποιούν κάτοπτρα της Flabeg, της γερμανικής εταιρείας που κατασκευάζει ανακλαστικά πάνελ για όλες τις εγκαταστάσεις CSP.

Κάθε στοιχείο αποτελείται από πάνελ RP-3 της Flabeg, πάχους 4mm και διαστάσεων 1700x1641mm για τα εσωτερικά πάνελ, και 1700x1501mm για τα εξωτερικά^[10]. Η συνολική επιφάνεια ανοίγματος κάθε συλλέκτη ανέρχεται στα 820m²^[11].

Ο δέκτης είναι κατασκευής της εταιρείας Schott, και συγκεκριμένα το μοντέλο Schott PTR70, το οποίο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε πολλές εγκαταστάσεις συλλεκτών παραβολικής σκάφης (βλ. Πίνακα 3.5.2). Ο κυλινδρικός αγωγός απορρόφησης του δέκτη είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα DIN 1.4541, και περιέχεται σε ομόκεντρο δακτύλιο από βοριοπυριτικό γυαλί με αντι-ανακλαστική επιστρώση^[11]. Μεταξύ γυάλινου δακτυλίου και χαλύβδινου αγωγού εφαρμόζεται πίεση κενού για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας μέσω συναγωγής. Σύμφωνα με την

εταιρεία, οι θερμικές απώλειες του δέκτη είναι εξαιρετικά χαμηλές, με τιμές μικρότερες των 250W/m στους 400°C, 175W/m στους 350°C και 125W/m στους 300°C αντίστοιχα.

Τα οπτικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ το συνολικό τους κόστος εκτιμάται στα €200/m²[12].

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συλλεκτών	
Αριθμός στοιχείων (module) ανά συλλέκτη	12
Μήκος Στοιχείου (m)	12,27
Μήκος ανακλαστικής επιφάνειας ανά στοιχείο (m)	11,9
Πλάτος στοιχείου (m)	5,74
Συνολική επιφάνεια ανοίγματος (aperture area) στοιχείου (m ²)	68,3
Συνολική επιφάνεια ανοίγματος (aperture area) συλλέκτη (m ²)	820
Εξωτερική διάμετρος αγωγού απορρόφησης (m)	0,07
Εσωτερική διάμετρος αγωγού απορρόφησης (m)	0,055
Εξωτερική διάμετρος γυάλινου δακτυλίου (m)	0,115
Εσωτερική διάμετρος γυάλινου δακτυλίου (m)	0,109
Οπτικά χαρακτηριστικά συλλεκτών	
Ανακλαστικότητα ρ	0,94
Συντελεστής Ανακοπής Γ	0,93
Οπτική διαπερατότητα δέκτη τ	0,96
Απορροφητικότητα δέκτη α	0,96
Συντελεστής εκπομπής δέκτη ε (400°C)	0,095
Θερμικές Απώλειες Δέκτη* (T σε °C)	15,572 x e ^{0,0069T} (W/m)
Κόστος Συλλεκτών (€/m²)	200
* Όπως προέκυψε με προσέγγιση εκθετικής συνάρτησης σε τιμές απωλειών που δίνονται από τον κατασκευαστή σε 3 θερμοκρασίες	

Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά συλλεκτών Eurotrough ET-150

Επιλογή Ρευστού Μεταφοράς Θερμότητας (HTE)

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας πρέπει να πληροί τις παρακάτω προδιαγραφές:

- Δυνατότητα λειτουργίας στις απαιτούμενες θερμοκρασίες συναλλαγής θερμότητας.
- Ικανό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας στον εναλλάκτη.
- Μεγάλη θερμοχωρητικότητα (στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί και ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας).
- Χαμηλή πίεση ατμών στις θερμοκρασίες λειτουργίας (στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί και ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας).
- Χαμηλό κόστος.

Στις ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις, ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται ή έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν παράγωγα του πετρελαίου (αρωματικοί υδρογονάνθρακες όπως το διφαινύλιο και μεταλλικά έλαια), συνθετικά έλαια, καθώς και τήγματα αλάτων. Τα τελευταία δε χρησιμοποιούνται ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας στις εγκαταστάσεις συλλεκτών παραβολικής σκάφης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών πήξης τους (>120°C), του υψηλού ιξώδους τους, καθώς

και των αυξημένων θερμικών απωλειών στις εκτεταμένες σωληνώσεις αυτών των συλλεκτών, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας εξόδου τους από το πεδίο^[13]. Στον επόμενο πίνακα, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές ιδιότητες των μεταλλικών και συνθετικών ελαίων που χρησιμοποιούνται ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας στους συλλέκτες παραβολικής σκάφης.

Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Θερμοκρασία (°C)		Μέση Πυκνότητα (kg/m ³)	Μέση Θερμική Αγωγιμότητα (W/m.K)	Μέση Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg.K)	Κόστος (\$/kg)
Μεταλλικά Έλαια	200	300	770	0,12	2,6	0,30
Συνθετικά Έλαια	250	350	900	0,11	2,3	3,00

Πίνακας 4.11: Μέσες ιδιότητες ρευστών μεταφοράς θερμότητας (Πηγή: Antoni Gil et al. "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation", 2010)

Στην περίπτωση του ΑΗΣ Σορώνης, η θερμοκρασία του νερού μεταξύ εισόδου στον οικονομητήρα και εξόδου από τον ατμοποιητή κυμαίνεται μεταξύ 185°C και 282°C. Επομένως, η μεταφορά θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα ρευστό με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 300°C, όπως είναι τα μεταλλικά έλαια, τα οποία έχουν επιπλέον το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλού κόστους.

Ως τέτοιο επιλέγεται το Therminol® XP της εταιρείας Solutia. Στον επόμενο πίνακα, δίνονται οι τιμές ιδιοτήτων του Therminol® XP σε θερμοκρασίες 200 και 300°C, όπως δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg.K)	Ενθαλπία (kJ/kg)	Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης (kJ/kg)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/m.K)	Συντελεστής Ιξώδους μ (mPa.s)	Πίεση Ατμών (kPa)
200	760	2,60	465,9	295,5	0,1129	0,839	1,76
300	689	2,96	744,1	224,3	0,1034	0,374	30,3

Πίνακας 4.12: Ιδιότητες Therminol® XP στους 200 και 300°C (Πηγή: Φυλλάδιο Κατασκευαστή)

Στα πλεονεκτήματα του Therminol® XP συμπεριλαμβάνονται επίσης η πολύ χαμηλή θερμοκρασία πήξης (-20°C), και η χαμηλή πίεση ατμών του στις θερμοκρασίες λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι σε εφαρμογή σε ένα κλίμα σαν της Ρόδου, δεν απαιτούνται επιπρόσθετα μέτρα αντιψυκτικής προστασίας στις σωληνώσεις διασύνδεσης των συλλεκτών στο πεδίο, που πολλές φορές μπορούν να αυξήσουν υπέρμετρα το κόστος κατασκευής, ενώ λόγω τις χαμηλής πίεσης ατμών στις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης σε συμβατικές δεξαμενές (ώστε να μην απαιτούνται δοχεία πίεσης).

Επιλογή Μέσου Αποθήκευσης Θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε, για την αποθήκευση θερμότητας θα χρησιμοποιηθούν δύο δεξαμενές (θερμή και ψυχρή δεξαμενή). Σε ότι αφορά τη διαμόρφωση του συστήματος, υπάρχουν δύο πιθανές επιλογές, ανάλογα με το μέσο αποθήκευσης που θα επιλεγεί και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας:

- Η πρώτη επιλογή είναι το ρευστό μεταφοράς θερμότητας να αποτελεί και το μέσο αποθήκευσης. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα διαθέτει *άμεση αποθήκευση*. Η ποσότητα ηλιακής ενέργειας που υπερκαλύπτει τη ζήτηση αποθηκεύεται ως αισθητή ενέργεια του ρευστού μεταφοράς στη θερμή δεξαμενή και, όταν απαιτηθεί, αντλείται από αυτή για την παροχή θερμότητας στον κύκλο και επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή. Και οι δύο δεξαμενές πρέπει να έχουν χωρητικότητα που να καλύπτει τις απαιτήσεις αποθήκευσης στο σημείο σχεδίασης.
- Η δεύτερη επιλογή είναι το μέσο αποθήκευσης να είναι διαφορετικό από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτή την περίπτωση, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευστού και μέσου αποθήκευσης γίνεται μέσω εναλλακτών θερμότητας, και το σύστημα διαθέτει *έμμεση αποθήκευση*. Σε αυτή τη διαμόρφωση, το ρευστό μεταφοράς που εξέρχεται του πεδίου ανταλλάσσει θερμότητα με το μέσο αποθήκευσης που αντλείται από την ψυχρή στη θερμή δεξαμενή σε εναλλάκτη αντιρροής, και επιστρέφει στην είσοδο του πεδίου για την επαναθέρμανσή του. Στην περίπτωση που απαιτηθεί θερμότητα από την αποθήκευση, το μέσο αποθήκευσης αντλείται από τη θερμή στην ψυχρή δεξαμενή και, κατά τη διαδρομή του, θερμαίνει το ψυχρό ρευστό μεταφοράς μέσω του εναλλάκτη. Και σε αυτή την περίπτωση, και οι δύο δεξαμενές πρέπει να έχουν χωρητικότητα που να καλύπτει τις απαιτήσεις αποθήκευσης στο σημείο σχεδίασης.

Η έμμεση αποθήκευση χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις εκείνες, όπου οι θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το πεδίο συλλεκτών είναι υψηλές, και η πίεση ατμών του καθιστά απαγορευτική την αποθήκευσή του σε συμβατικές δεξαμενές. Αυτό σημαίνει ότι για την αποθήκευσή του σε υψηλές θερμοκρασίες απαιτούνται δοχεία πίεσης, τα οποία είναι αδύνατο, ή ασύμφορο οικονομικά, να κατασκευαστούν στα μεγέθη που απαιτούνται για την αποθήκευση τόσο μεγάλων ποσοτήτων ρευστού, όσο αυτές που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις παραβολικής σκάφης. Για το λόγο αυτό, σε αυτές τις περιπτώσεις, ως μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιούνται τήγματα νιτρικών αλάτων, τα οποία έχουν μικρή πίεση ατμών σε υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλη θερμοχωρητικότητα προς τον όγκο τους.

Ωστόσο, για την έμμεση αποθήκευση θερμότητας απαιτείται η εγκατάσταση εναλλακτών θερμότητας, για τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευστού λειτουργίας και μέσου αποθήκευσης, οι οποίοι αποτελούν επίσης μία σεβαστή επένδυση (ενδεικτικά, το κόστος των εναλλακτών ελαιού-άλματος, σε τιμές 2004, εκτιμάται στα \$147/m²)^{[14],[15]}.

Στην περίπτωση της εγκατάστασης υπό μελέτη, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας έχει πίεση ατμών χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής στις θερμοκρασίες αποθήκευσης (περίπου 200°C και 300°C για την ψυχρή και θερμή δεξαμενή αντίστοιχα), επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο αποθήκευσης, δηλαδή σε σύστημα άμεσης αποθήκευσης.

Για τη λήψη, ωστόσο, της τελικής απόφασης μεταξύ άμεσης και έμμεσης αποθήκευσης, θα γίνει μία σύγκριση του κόστους που η κάθε μία λύση θα απαιτούσε. Στο κόστος θα συμπεριληφθεί το κόστος του μέσου αποθήκευσης και το κόστος κατασκευής και μόνωσης των δεξαμενών. Αν απαιτηθεί, θα υπολογιστεί και το κόστος του εναλλάκτη στην περίπτωση της έμμεσης αποθήκευσης.

Τα κριτήρια καταλληλότητας για τα υποψήφια μέσα αποθήκευσης θερμότητας είναι:

- Θερμοκρασία πήξης χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του ψυχρού δοχείου (εδώ θεωρείται ίση με 200°C)
- Πίεση ατμών χαμηλότερη ή περίπου ίση με την ατμοσφαιρική στη θερμοκρασία του θερμού δοχείου (300°C).

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, τα υποψήφια μέσα αποθήκευσης με τις ιδιότητές τους αναγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Μέσο Αποθήκευσης	Σύσταση	Θερμοκρασία Πήξης (°C)	Πυκνότητα στους 300°C (kg/m ³)	Πίεση Ατμών στους 300°C (kPa)	Ενθαλπία στους 200°C (kJ/kg)	Ενθαλπία στους 300°C (kJ/kg)	Κόστος (\$/kg)
Therminol® XP	Μεταλλικό έλαιο	-20	689	30,3	465,9	744,1	0,3
HITEC®	7% NaNO ₃ , 53% KNO ₃ , 40% NaNO ₂	142	1860	<1	312 ^a	468 ^a	0,93
HITEC® XL	7% NaNO ₃ , 53% KNO ₃ , 48% Ca(NO ₃) ₂	120	1992	<1	301,6 ^b	448 ^b	1,19

^a Χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $h = 1,56 \times T$, από SAM v.2.5, Draft CSP Reference Manual, NREL
^b Χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $h = (-3,79667 \times 10^{-8} \times T^3) - (1,312 \times 10^{-4} \times T^2) + (1,536 \times T)$, από SAM v.2.5, Draft CSP Reference Manual, NREL

Πίνακας 4.13: Ιδιότητες υποψηφίων ρευστών αποθήκευσης θερμότητας (Πηγές: [14], [16], [17])

Η μάζα του μέσου αποθήκευσης που απαιτείται για την κάλυψη των σχεδιαστικών απαιτήσεων (8 ώρες αποθήκευσης) προκύπτει από τη σχέση:

$$m = \frac{Q_{storage}}{\Delta h} \quad (4.4.3.1)$$

όπου:

$$Q_{storage} = 265507,088 \text{ kWh} = 955825516,8 \text{ kJ}$$

Δh : Η διαφορά ενθαλπίας μεταξύ 300 και 200°C

ενώ το κόστος που απαιτείται για κάθε μέσο προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{Κόστος (\$)} = m \times \text{Κόστος (\$/kg)} \quad (4.4.3.2)$$

και ο όγκος που απαιτείται για την αποθήκευση σε κάθε θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

$$V_{storage} = m / \rho_{@T} \quad (4.4.3.3)$$

όπου:

$\rho_{@T}$: Η πυκνότητα στην αντίστοιχη θερμοκρασία

Το κόστος κατασκευής και μόνωσης των δεξαμενών αποθήκευσης δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Κόστος} = V_{\text{storage}} \times \text{Κόστος } (\$/\text{m}^3)$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κόστους για τα 3 υποψήφια ρευστά αποθήκευσης θερμότητας φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Μέσο Αποθήκευσης	Θερμότητα Αποθήκευσης (kJ)	Μάζα Μέσου (kg)	Κόστος Μέσου Αποθήκευσης (\$)	Όγκος Ψυχρής Δεξαμενής (m ³)	Όγκος Θερμής Δεξαμενής (m ³)	Κόστος Ψυχρής Δεξαμενής ^c (\$)	Κόστος Θερμής Δεξαμενής ^c (\$)	Συνολικό Κόστος (\$)
Therminol® XP	955825516,8	3435750	1030725	4521	4987	1297447,517	1431146,753	3759319
HITEC®	955825516,8	6127087	5698191	3169 ^a	3294 ^a	909524,0858	945365,2317	7553080
HITEC® XL	955825516,8	6528863	7769347	3147 ^b	3277 ^b	903167,5387	940644,9881	9613160
^a Χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $\rho = -7,33 \times 10^{-1} \times T + 2,080 \times 10^3$, από SAM v.2.5, Draft CSP Reference Manual, NREL ^b Χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $\rho = -8,266 \times 10^{-1} \times T + 2,240 \times 10^3$, από SAM v.2.5, Draft CSP Reference Manual, NREL ^c Το κόστος κατασκευής και μόνωσης των δεξαμενών θεωρήθηκε ίσο με 287\$/m ³ , μετά από επεξεργασία στοιχείων κόστους από [14] για δεξαμενές αντίστοιχου μεγέθους								

Πίνακας 4.14: Υπολογισμός κόστους αποθήκευσης για τα 3 υποψήφια ρευστά αποθήκευσης θερμότητας

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι η επιλογή του Therminol® XP ως μέσου αποθήκευσης θερμότητας, ακόμη και χωρίς τον συνυπολογισμό του κόστους των απαραίτητων (και ακριβών) εναλλακτών θερμότητας για τις περιπτώσεις των HITEC® και HITEC®XL, αποτελεί σαφώς πολύ περισσότερο συμφέρουσα επιλογή. Επομένως, ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας, καθώς και ρευστό μεταφοράς θερμότητας για την εγκατάσταση επιλέγεται το Therminol® XP.

4.4.4. Διαμόρφωση Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης - Συνοπτική Παρουσίαση της Λειτουργίας του Συστήματος

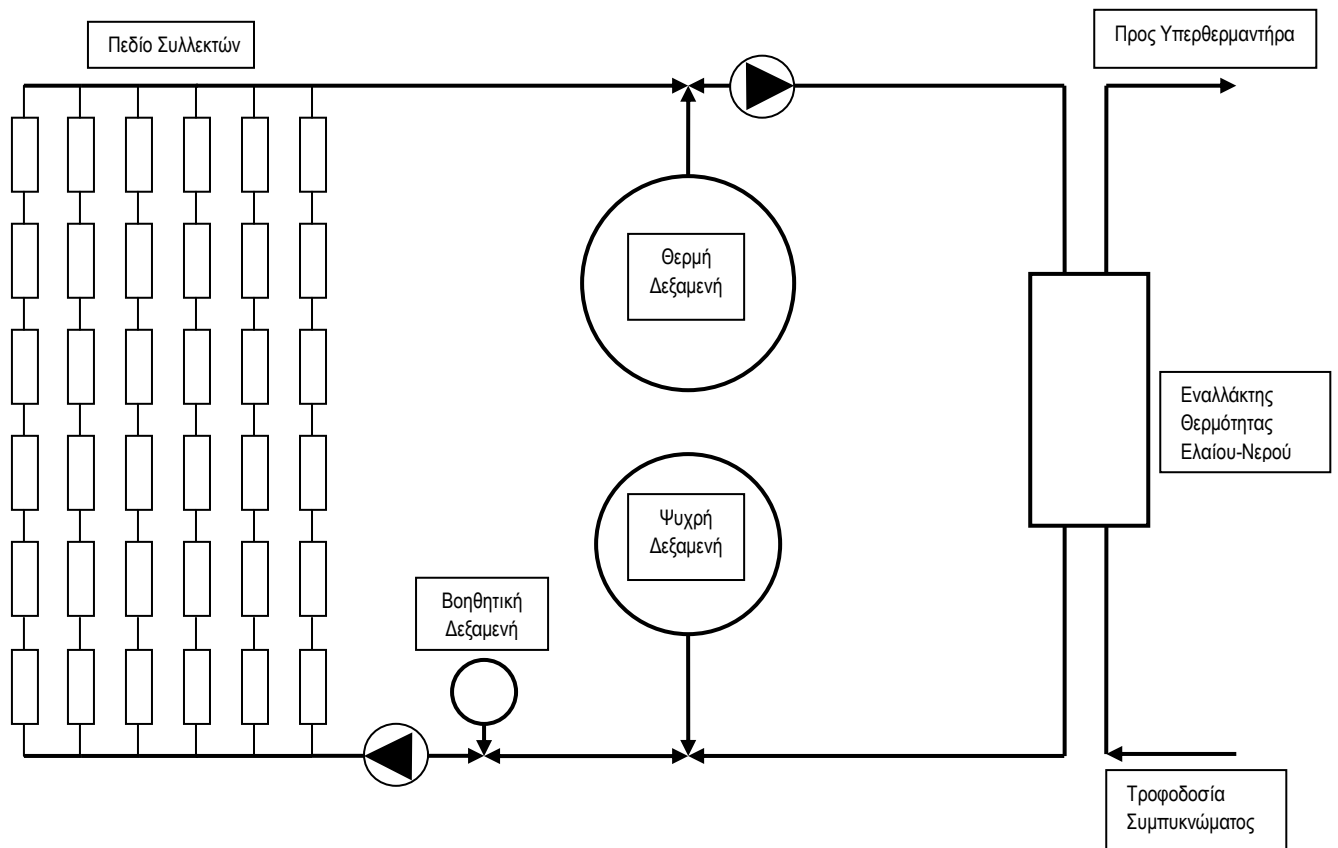
Διαμόρφωση εγκατάστασης

Η εγκατάσταση περιλαμβάνει:

- Το πεδίο συλλεκτών (προσανατολισμένο κατά τον άξονα Βορρά-Νότου για τη μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους θερινούς μήνες).
- Τις δύο δεξαμενές αποθήκευσης (ψυχρή και θερμή).
- Τη βοηθητική δεξαμενή για την παροχή θερμότητας στο πεδίο κατά τη διάρκεια μη λειτουργίας του.
- Τις σωληνώσεις διασύνδεσης των σειρών συλλεκτών μεταξύ τους και με την κεντρική παροχή
- Τον εναλλάκτη θερμότητας για τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ Therminol και νερού κατά την προθέρμανσή του στον οικονομητήρα (ECO) και την ατμοποίησή του στον ατμοποιητή (EVAP).
- Ρυθμιστικές βαλβίδες στην είσοδο του πεδίου και την έξοδο των δεξαμενών για τη ρύθμιση της παροχής ανάλογα με την ώρα της ημέρας και τη διαθέσιμη ακτινοβολία.

- Αντλίες στην είσοδο του πεδίου και την έξοδο της θερμής δεξαμενής ώστε να εξασφαλίζεται η ροή στους αγωγούς (οι απαιτήσεις πίεσης είναι χαμηλές, λόγω της χαμηλής πίεσης ατμών του Therminol και η πίεση πρέπει απλώς να υπερκαλύπτει τις απώλειες κατά τη ροή, περίπου 2-3bar ανάλογα με το μήκος των αγωγών).

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η γενική διαμόρφωση της εγκατάστασης.



Σχήμα 4.5: Λειτουργικό διάγραμμα εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης με δύο δεξαμενές αποθήκευσης

Συνοπτική Παρουσίαση της Λειτουργίας του Συστήματος

Μετά την ανατολή του Ηλίου, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας ωθείται μέσα στους αγωγούς του πεδίου συλλεκτών για τη θέρμανσή του. Η παροχή του ρυθμίζεται έτσι ώστε στην έξοδο του πεδίου να έχει συγκεκριμένη θερμοκρασία (οι υπολογισμοί για την εύρεση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού γίνονται στην επόμενη ενότητα). Το σύστημα σχεδιάζεται λοιπόν ως σύστημα σταθερής θερμοκρασίας σε μόνιμη κατάσταση. Μετά την έξοδό του από το πεδίο, το Therminol®XP περνά σε εναλλάκτη θερμότητας για την προθέρμανση και ατμοποίηση του νερού τροφοδοσίας στα στάδια του οικονομητήρα και ατμοποιητή, αντίστοιχα, του ΑΗΣ. Μετά την έξοδό του από τον εναλλάκτη, το ρευστό επιστρέφει στην είσοδο του πεδίου για την επαναθέρμανση και ανατροφοδότησή του.

Μέρος του ρευστού, μετά την έξοδό του από το πεδίο, προωθείται στη θερμή δεξαμενή προκειμένου να αποθηκευθεί για χρήση κατά τις νυχτερινές ώρες ή τις ώρες που δεν υπάρχει

ηλιοφάνεια. Επομένως, το σύστημα μπορεί να παρέχει θερμότητα και κατά εκείνες τις ώρες, με άντληση του ρευστού από τη θερμή δεξαμενή, προώθησή του στον εναλλάκτη θερμότητας, και επιστροφή του ρευστού στην ψυχρή δεξαμενή προς αποθήκευση (οι απαιτήσεις αποθήκευσης έχουν οριστεί και οι υπολογισμοί για τον όγκο και το κόστος των δεξαμενών γίνονται στην επόμενη ενότητα). Επομένως, απαιτείται και οι δύο δεξαμενές να έχουν ικανή χωρητικότητα για την αποθήκευση ολόκληρης της ποσότητας ρευστού που απαιτείται από το σχεδιασμό.

Η βοηθητική δεξαμενή (buffer storage) περιέχει μικρή ποσότητα ρευστού (συγκριτικά με τις δεξαμενές αποθήκευσης) στη θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής, και σκοπός της είναι η παροχή θερμότητας για την κάλυψη των απωλειών θερμότητας του πεδίου κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επιτρέπει, επομένως, τη γρήγορη εκκίνηση του συστήματος, χωρίς ανάγκη προθέρμανσης του ρευστού από την ηλιακή ακτινοβολία. Στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν, το ρευστό που ρέει στους αγωγούς του πεδίου συλλεκτών θεωρείται πως βρίσκεται στη θερμοκρασία λειτουργίας του, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Οι απώλειες θερμότητας των δεξαμενών είναι μικρές. Σε δεξαμενές αποθήκευσης αλάτων, τα οποία έχουν πολλαπλάσιο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από το ρευστό της συγκεκριμένης εφαρμογής, έχει παρατηρηθεί πτώση θερμοκρασίας της δεξαμενής μόλις κατά 28°C σε διάστημα 45 ημερών^[14]. Οι απώλειες θερμότητας των δεξαμενών δεν ξετάζονται στην παρούσα εργασία. Θεωρείται ότι οι δεξαμενές διατηρούν τη θερμοκρασία που έχουν στο σημείο σχεδίασης.

4.4.5. Υπολογισμός παροχών και θερμοκρασιών στο σημείο σχεδίασης - Διαστασιολόγηση Υποσυστημάτων - Υπολογισμός Κόστους Εγκατάστασης

Ο υπολογισμός των τιμών παροχών και θερμοκρασιών στα διάφορα σημεία της εγκατάστασης σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης θα προκύψουν από μία διαδικασία ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους των υποσυστημάτων που απαιτούνται.

Στη διαδικασία ελαχιστοποίησης του κόστους λαμβάνονται υπόψη το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας, των δεξαμενών αποθήκευσης και των ηλιακών συλλεκτών. Τα κόστη αντλιών και βοηθητικής δεξαμενής δε λαμβάνονται υπόψη σε αυτή τη διαδικασία, ως πολύ μικρά σε σχέση με αυτά των προαναφερθέντων υποσυστημάτων.

Το κόστος αυτών των υποσυστημάτων μπορεί να συνδεθεί ευθέως με τη θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας, επομένως και το συνολικό κόστος της εγκατάστασης μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (ακριβέστερα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής).

Στη συνέχεια, η παροχή ρευστού μεταφοράς θερμότητας θα βρεθεί από την παροχή θερμότητας που απαιτείται στον εναλλάκτη, προς τη διαφορά των τιμών ενθαλπίας του ρευστού (οι οποίες είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του) στην είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη.

Στον πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται συγκεντρωτικά οι τιμές διαφόρων μεγεθών στο σημείο σχεδίασης (ηλιακό μεσημέρι της μέσης ημέρας του Ιουλίου), οι οποίες απαιτούνται για τους υπολογισμούς.

Πίνακας 4.15: Συνθήκες ακτινοβολίας και τιμές ζήτησης και ιδιοτήτων νερού στο σημείο σχεδίασης

Ακτινοβολία DNI (W/m ²)	Ζήτηση ECO (kW)	Ζήτηση EVAP (kW)	Αποθήκευση (kWh)	Παροχή Νερού (kg/s)	Θερμοκρασία Νερού Εισόδου ECO (°C)	Θερμοκρασία Νερού Εξόδου ECO (°C)	Ενθαλπία Νερού – Είσοδος ECO (kJ/kg)
642,6	7650,272	25538,114	265507,088	16,66	185	281,64	785,4
Ενθαλπία Νερού – Έξοδος ECO (kJ/kg)	Διαφορά Ενθαλπίας Νερού ECO (kJ/kg)	Θερμοκρασία Νερού Εισόδου EVAP (°C)	Θερμοκρασία Νερού Εξόδου EVAP (°C)	Ενθαλπία Νερού – Είσοδος EVAP (kJ/kg)	Ενθαλπία Νερού – Έξοδος EVAP (kJ/kg)	Διαφορά Ενθαλπίας Νερού EVAP (kJ/kg)	
1244,6	459,2	281,64	281,64	1244,6	2777,5	1532,9	

Κόστος εναλλάκτη θερμότητας ως συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας

Η θερμοροή που συναλλάσσεται μεταξύ των δύο ρευστών (Therminol® και νερού) στον εναλλάκτη δίνεται από τη σχέση^[18]:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (\text{W}) \quad (4.4.5.1)$$

όπου:

U : Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη (W/m²·°C)

A : Η συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη (m²)

ΔT_m : Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά των ρευστών (°C), η οποία για εναλλάκτες αντιρροής δίνεται από τη σχέση^[18]:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{1i} - T_{2o}) - (T_{1o} - T_{2i})}{\ln[(T_{1i} - T_{2o}) / (T_{1o} - T_{2i})]} \quad (4.4.5.2)$$

όπου:

T_{1i}, T_{1o} : Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του Therminol®

T_{2i}, T_{2o} : Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα νερού (ατμού)

Από τη σχέση (4.4.5.1) προκύπτει ότι η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη, δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_m} \quad (\text{m}^2) \quad (4.4.5.3)$$

επομένως, είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς των ρευστών. Επίσης, το κόστος των εναλλακτών είναι ευθέως ανάλογο της επιφάνειάς τους, επομένως

προκύπτει ότι το κόστος του εναλλάκτη είναι αντιστρόφως ανάλογο της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς.

Για την εξαγωγή της σχέσης κόστους - μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς στον εναλλάκτη λαμβάνονται υπόψιν οι παρακάτω περιορισμοί και παραδοχές:

1. Η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας δεν μπορεί να υπερβαίνει τους 315°C. Αυτή η τιμή αποτελεί το θερμοκρασιακό όριο ασφαλούς λειτουργίας για το Therminol® XR^[19]. Η ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του Therminol® είναι 283 °C, λίγο μεγαλύτερη δηλαδή από τη θερμοκρασία εξόδου του ατμού.
2. Η ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρευστού από τον εναλλάκτη είναι οι 186 °C, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εισόδου του συμπυκνωμένου νερού τροφοδοσίας του ΑΗΣ. Η μέγιστη θερμοκρασία εξόδου του είναι οι 283 °C.
3. Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U του εναλλάκτη θεωρείται ίσος με 230W/m²·°C. Η τιμή αυτή αποτελεί το μέσο όρο μεταξύ 110-350W/m²·°C, οι οποίες αποτελούν ενδεικτικές τιμές των εναλλακτών θερμότητας νερού-ελαίου, σύμφωνα με το ΚΑΠΕ^[18].
4. Το κόστος του εναλλάκτη αυλών-κελύφους εκτιμάται στα \$100/m².

Κατόπιν των παραπάνω, το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Κόστος Εναλλάκτη (\$)} = 100 \cdot \frac{\dot{Q}_{demand}}{U \cdot \Delta T_m} = 14429733,04 \cdot \frac{\ln\left[\frac{(T_{li} - 282)/(T_{lo} - 185)}{(T_{li} - 282) - (T_{lo} - 185)}\right]}{(T_{li} - 282) - (T_{lo} - 185)} \quad (4.4.5.4)$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } T_{li,min} &= 283^\circ\text{C} \\ T_{li,max} &= 315^\circ\text{C} \\ T_{lo,min} &= 186^\circ\text{C} \\ T_{lo,max} &= 283^\circ\text{C} \end{aligned}$$

και είναι, όπως φαίνεται, συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του Therminol από τον εναλλάκτη.

Κόστος αποθήκευσης ως συνάρτηση των θερμοκρασιών ψυχρής και θερμής δεξαμενής

Ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με την προηγούμενη για την έκφραση του κόστους αποθήκευσης ως συνάρτηση των θερμοκρασιών ψυχρής και θερμής δεξαμενής. Λαμβάνονται υπόψιν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Η θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής θεωρείται ίση με την θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον εναλλάκτη T_{1o} , δηλαδή αγνοούνται οι απώλειες θερμότητας κατά τη διαδρομή του ρευστού από τον εναλλάκτη στη δεξαμενή.
2. Παρόμοια, η θερμοκρασία θερμής δεξαμενής θεωρείται ίση με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον εναλλάκτη T_{1i} .

Όπως αναφέρθηκε και κατά τη διαδικασία επιλογής του μέσου αποθήκευσης, το κόστος αποθήκευσης συμπεριλαμβάνει:

- Το κόστος του μέσου αποθήκευσης. Η απαιτούμενη μάζα του μέσου αποθήκευσης δίνεται από τη σχέση (4.4.3.1). Το κόστος του μέσου αποθήκευσης είναι:

$$\text{Κόστος Therminol (\$)} = 0,3 \cdot m = 0,3 \cdot \frac{Q_{storage}}{\Delta h} = 0,3 \cdot \frac{Q_{storage}}{h_{T_{1i}} - h_{T_{1o}}} \quad (4.4.5.5)$$

όπου

$h_{T_{1i}}, h_{T_{1o}}$ η ενθαλπία του ρευστού στις θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής δεξαμενής αντίστοιχα

- Το κόστος κατασκευής και μόνωσης των δεξαμενών έχει οριστεί στα \$287/m³ (βλ. Πίνακα 4.14), επομένως:

$$\text{Κόστος Δεξαμενών (\$)} = 287 \times V_{tot} = 287 \times (V_{hot} + V_{cold}) = 287 \cdot \left(\frac{m}{\rho_{@T_{1i}}} + \frac{m}{\rho_{@T_{1o}}} \right) \quad (4.4.5.6)$$

όπου

$\rho_{@T_{1i}}, \rho_{@T_{1o}}$ η πυκνότητα του ρευστού στις θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής δεξαμενής αντίστοιχα

Αντικαθιστώντας τη μάζα του ρευστού από τη σχέση (4.4.3.1) στη σχέση (4.4.5.6) και αθροίζοντας τα κόστη, προκύπτει για το συνολικό κόστος αποθήκευσης:

$$\boxed{\text{Κόστος Αποθήκευσης (\$)} = \frac{955825516,8}{h_{T_{1i}} - h_{T_{1o}}} \times \left(0,3 + \frac{287}{\rho_{@T_{1i}}} + \frac{287}{\rho_{@T_{1o}}} \right)} \quad (4.4.5.7)$$

Όπως φαίνεται στην παραπάνω σχέση, το κόστος αποθήκευσης σχετίζεται έμμεσα με τις θερμοκρασίες αποθήκευσης, μέσω των ιδιοτήτων του ρευστού σε αυτές.

Κόστος συλλεκτών ως συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας

Για τον υπολογισμό του κόστους των συλλεκτών γίνονται παραδοχές όμοιες με εκείνες που έγιναν στον υπολογισμό του κόστους αποθήκευσης:

1. Η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο πεδίο θεωρείται ίση με την θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον εναλλάκτη T_{1o} , δηλαδή αγνοούνται οι απώλειες θερμότητας κατά τη διαδρομή του ρευστού από τον εναλλάκτη στο πεδίο.
2. Παρόμοια, η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το πεδίο θεωρείται ίση με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον εναλλάκτη T_{1i} .

Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου από το πεδίο στο κόστος των συλλεκτών, υπενθυμίζεται ότι οι δέκτες των συλλεκτών παρουσιάζουν απώλειες θερμότητας οι οποίες έχουν προσεγγιστεί από την εξίσωση (βλ. Πίνακα 4.10):

$$Q_{loss,rec} = 15,572 \times e^{0,0069T} \quad (\text{W/m}) \quad (4.4.5.8)$$

επομένως, αυτές αυξάνονται με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στο πεδίο συλλεκτών (ως μέση θερμοκρασία ορίζεται $T = \frac{T_{1i} + T_{1o}}{2}$).

Η αύξηση των απωλειών σημαίνει ότι μικρότερο ποσοστό της προσπίπτουσας, στα κάτοπτρα των συλλεκτών, ακτινοβολίας απορροφάται ως ωφέλιμη θερμότητα στο δέκτη για την αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, το οποίο συνεπάγεται αύξηση της επιφάνειας των συλλεκτών για την κάλυψη της ζήτησης σε θερμότητα. Από μία μέση θερμοκρασία και άνω, όλη η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια χάνεται σε απώλειες θερμότητας, και οι δέκτες δε μπορούν πλέον να προσφέρουν θερμότητα στο ρευστό. Αυτή η θερμοκρασία ονομάζεται *θερμοκρασία στασιμότητας (stagnation temperature)*^[20]. Αντίστοιχα, οι δέκτες δε δύνανται να λειτουργήσουν σε επίπεδα άμεσης ακτινοβολίας (DNI) χαμηλότερα εκείνων που απαιτούνται για την κάλυψη των θερμικών απωλειών τους.

Για να εξαχθεί η συνάρτηση που συσχετίζει τις θερμικές απώλειες με την επιφάνεια ανοίγματος (aperture area) των συλλεκτών, πρέπει αυτές να εκφραστούν ανά μονάδα επιφάνειας. Το πλάτος των κατόπτρων του συλλέκτη είναι 5,74m (βλ. Πίνακα 4.10). Επομένως, σε κάθε μέτρο μήκους δέκτη αντιστοιχούν 5,74m² επιφάνειας ανοίγματος. Άρα, οι απώλειες μπορούν να εκφραστούν ανά μονάδα επιφάνειας ανοίγματος συλλεκτών διαιρώντας το δεξιό μέλος της σχέσης (4.4.5.8) με τον αντίστοιχο παράγοντα. Προκύπτει:

$$Q_{loss,rec} = 2,713 \times e^{0,0069T} \quad (\text{W/m}^2 \text{ συλλεκτών}) \quad (4.4.5.9)$$

$$\text{όπου } T = \frac{T_{1i} + T_{1o}}{2} \quad (^\circ\text{C})$$

Υπενθυμίζεται ότι η ροή θερμότητας που φθάνει στο ρευστό από το δέκτη, δίνεται από τη σχέση (βλ. σχέση 3.5.1.24):

$$\dot{Q}_{abs,rec} = \dot{E}_{opt} - \dot{Q}_{loss,rec} \quad (W) \quad (4.4.5.10)$$

ενώ η προσπίπτουσα στο δέκτη ακτινοβολία \dot{E}_{opt} , βρίσκεται από τη σχέση (βλ. σχέση 3.5.1.23):

$$\dot{E}_{opt} = \Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \eta_{field} \cdot \dot{E}_{inc} \quad (W) \quad (4.4.5.11)$$

και η προσπίπτουσα στη συνολική επιφάνεια των κατόπτρων ακτινοβολία \dot{E}_{inc} δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{E}_{inc} = DNI \cdot A_a \quad (W) \quad (4.4.5.12)$$

όπου A_a η συνολική επιφάνεια ανοίγματος των συλλεκτών του πεδίου.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (4.4.5.10) προκύπτει:

$$\dot{Q}_{abs,rec} = (\Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \eta_{field} \cdot DNI - 2,713 \cdot e^{0,0069T}) \cdot A_a \quad (W) \quad (4.4.5.13)$$

Η συνολική επιφάνεια ανοίγματος των συλλεκτών του πεδίου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να παρέχει θερμοροή που να καλύπτει τη συνολική ζήτηση στο σημείο σχεδίασης (33188,386kW) και επιπλέον να παρέχει ικανή θερμότητα για αποθήκευση 8 ωρών (δηλαδή ενέργεια ίση με 265507,088kWh).

Για την εύρεση της συνολικής επιφάνειας των συλλεκτών, θα γίνουν επομένως δύο επιμέρους υπολογισμοί:

- Ο υπολογισμός της επιφάνειας συλλεκτών που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης (33188,386kW)
- Ο υπολογισμός της επιφάνειας συλλεκτών που απαιτείται για την παροχή θερμότητας στην αποθήκευση (265507,088kWh)

Σημείωση: Προφανώς το πεδίο συλλεκτών είναι ενιαίο, και υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς το που παροχετεύεται η ενέργεια που συλλέγεται (στη ζήτηση ή στην αποθήκευση). Η θεώρηση ωστόσο δύο «ξεχωριστών» πεδίων διευκολύνει ιδιαίτερα τους υπολογισμούς.

Η συνολική επιφάνεια συλλεκτών που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης βρίσκεται από τη σχέση (4.4.5.13) αντικαθιστώντας $\dot{Q}_{abs,rec} = \dot{Q}_{demand}$:

$$A_a = \frac{\dot{Q}_{demand}}{\Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \eta_{field} \cdot DNI - 2,713 \cdot e^{0,0069T}} \quad (m^2) \quad (4.4.5.14)$$

Οι τιμές των Γ , ρ , τ και α δίνονται στον Πίνακα 4.10.

Η απόδοση του πεδίου η_{field} δίνεται από τη σχέση (βλ. σχέση 3.5.1.22):

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \cdot \eta_{shade} \quad (4.4.5.15)$$

όπου

$$\eta_{cos} = \cos \theta_i = \sqrt{1 - \cos^2(a) \cdot \cos^2(A_z)} \quad (4.4.5.16)$$

το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης για πεδίο συλλεκτών προσανατολισμένο στον άξονα Βορρά-Νότου

και η η_{shade} λαμβάνεται ίση με 0,9 (παράγοντας χρήσης γης ίσος με 2)

Αντικαθιστώντας τις τιμές της ζήτησης που βρέθηκαν στην παράγραφο 4.4.2, τις τιμές των οπτικών ιδιοτήτων από τον Πίνακα 4.10, την τιμή $DNI = 642,6W/m^2$ στο σημείο σχεδίασης και τις τιμές των ηλιακών γωνιών a και A_z από τις σχέσεις (2.1.4) και (2.1.5) προκύπτει:

$$A_a = \frac{33188386}{449,97 - 2,713 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)}} \quad (m^2) \quad (4.4.5.17)$$

Για την εύρεση της επιφάνειας συλλεκτών που απαιτούνται για την παροχή θερμότητας αποθήκευσης ίση με την κάλυψη 8 ωρών λειτουργίας του ΑΗΣ υπό πλήρες φορτίο, θα ακολουθηθεί μία ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση. Ο σχεδιαστικός στόχος της εγκατάστασης είναι για πλήρη κάλυψη της ζήτησης (σε Watt) του ΑΗΣ **στο σημείο σχεδίασης**. Αυτό σημαίνει ότι οι διαστάσεις του πεδίου επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης, όταν η τιμή της ισχύος της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας DNI είναι ίση με την τιμή σχεδίασης ($642,6W/m^2$). Η τιμή της DNI βεβαίως μεταβάλλεται (μειώνεται) όσο απομακρυνόμαστε από το ηλιακό μεσημέρι (βλ. πίνακα 4.9). Επομένως, ένας υπολογισμός της απαιτούμενης επιφάνειας των συλλεκτών για την αποθήκευση, βασισμένος στην τιμή $DNI=642,6W/m^2$ θα οδηγούσε σε υπερεκτίμηση των δυνατοτήτων του συστήματος (μικρότερη επιφάνεια συλλεκτών από την πραγματικά απαιτούμενη).

Η λύση είναι ο υπολογισμός να γίνει βάσει της συνολικής ενέργειας που απορροφούν οι συλλέκτες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, για τη μέση ημέρα του Ιουλίου. Η ενέργεια αυτή πρέπει να είναι ίση με τις απαιτήσεις σε αποθήκευση, δηλαδή ίση με την τιμή $Q_{\text{storage}}=265507,088\text{kWh}$.

Στον επόμενο πίνακα αναγράφονται οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς:

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	Προσπίπτουσα Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	Απόδοση Συλλεκτών (Γ.ρ.τ.α)	Συνημίτονο Πρόσπτωσης ($\cos\theta_i$)	Απόδοση Σκίασης (η_{shade})	Απώλειες Δέκτη (kWh)
04:00-05:00	0,2994	0,81	0,896	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
05:00-06:00	0,3417	0,81	0,931	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
06:00-07:00	0,4112	0,81	0,975	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
07:00-08:00	0,4784	0,81	0,997	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
08:00-09:00	0,5385	0,81	0,999	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
09:00-10:00	0,5877	0,81	0,989	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
10:00-11:00	0,6223	0,81	0,976	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
11:00-12:00	0,6404	0,81	0,967	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
12:00-13:00	0,6404	0,81	0,967	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
13:00-14:00	0,6223	0,81	0,976	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
14:00-15:00	0,5877	0,81	0,989	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
15:00-16:00	0,5385	0,81	0,999	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
16:00-17:00	0,4784	0,81	0,997	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
17:00-18:00	0,4112	0,81	0,975	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
18:00-19:00	0,3417	0,81	0,931	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$
19:00-20:00	0,2994	0,81	0,896	0,9	$0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)}$

Πίνακας 4.16: Ωριαίες τιμές ηλιακής ενέργειας και απόδοσης πεδίου συλλεκτών για τη μέση ημέρα του Ιουλίου

Η συνολική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (σε kWh/m²) που παρέχεται στο ρευστό από το συλλέκτη, κατά τη μέση ημέρα του Ιουλίου, είναι ίση με το άθροισμα των ωριαίων τιμών, δηλαδή ίση με:

$$Q_{\text{abs,rec,day}} = \sum_{04:00}^{20:00} \left(\Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \cos \theta_i \cdot \eta_{\text{shade}} \cdot I_{b,n} \right) - 0,002713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_i+T_{i0}}{2}\right)} \quad (\text{kWh/m}^2) \quad (4.4.5.18)$$

η οποία μετά τον υπολογισμό του αθροίσματος καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας, δίνει:

$$Q_{abs,rec,day} = 5,5551 - 0,043408 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)} \quad (\text{kWh/m}^2) \quad (4.4.5.19)$$

Επομένως, η συνολική επιφάνεια συλλεκτών που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αποθήκευσης, δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{storage} = \left(5,5551 - 0,043408 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)} \right) \cdot A_a \Rightarrow$$

$$A_a = \frac{265507,088}{5,5551 - 0,043408 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)}} \quad (\text{m}^2) \quad (4.4.5.20)$$

Η **συνολική επιφάνεια συλλεκτών** που απαιτείται τόσο για την κάλυψη της ζήτησης στο σημείο σχεδίασης, όσο και των απαιτήσεων αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της ημέρας δίνεται από το άθροισμα των σχέσεων (4.4.5.17) και (4.4.5.20), ως:

$$A_{a,tot} = \frac{33188386}{449,97 - 2,713 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)}} + \frac{265507,088}{5,5551 - 0,043408 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)}} \quad (\text{m}^2) \quad (4.4.5.21)$$

και πολλαπλασιάζοντας με το κόστος συλλεκτών ανά μονάδα επιφάνειας (€200/m²), μετά τη μετατροπή σε \$/m² (θεωρήθηκε 1,3 €/€), προκύπτει για το κόστος συλλεκτών:

$$\text{Κόστος συλλεκτών (\$)} = \frac{8628980360}{449,97 - 2,713 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)}} + \frac{69031842,88}{5,5551 - 0,043408 \cdot e^{0,0069 \left(\frac{T_{li} + T_{lo}}{2} \right)}} \quad (4.4.5.22)$$

Όπως φαίνεται το κόστος συλλεκτών είναι άμεσα εξαρτώμενο από τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ρευστού από το πεδίο, ενώ δεν εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο ρευστό μεταφοράς, καθώς είναι ανεξάρτητο των ιδιοτήτων του.

Συνολικό Κόστος Εναλλάκτη Θερμότητας, Δεξαμενών Αποθήκευσης και Πεδίου Συλλεκτών, ως Συνάρτηση των Θερμοκρασιών Εισόδου και Εξόδου

Το συνολικό κόστος προς ελαχιστοποίηση δίνεται από το άθροισμα του κόστους των επιμέρους υποσυστημάτων, όπως αυτό έχει βρεθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Προκύπτει λοιπόν:

$$\text{Συνολικό Κόστος (\$)} = \text{Κόστος Εναλλάκτη (\$)} + \text{Κόστος Αποθήκευσης (\$)} + \text{Κόστος Συλλεκτών (\$)}$$

και αντικαθιστώντας από τις σχέσεις (4.4.5.4), (4.4.5.7) και (4.4.5.22) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Συνολικό Κόστος (\$)} = & \\ & 14429733,04 \cdot \frac{\ln\left[\frac{(T_{1i} - 282)/(T_{1o} - 185)}{(T_{1i} - 282) - (T_{1o} - 185)}\right] + \frac{955825516,8}{h_{T_{1i}} - h_{T_{1o}}} \times \left(0,3 + \frac{287}{\rho_{@T_{1i}}} + \frac{287}{\rho_{@T_{1o}}}\right) + \\ & \frac{8628980360}{449,97 - 2,713 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_{1i}+T_{1o}}{2}\right)}} + \frac{69031842,88}{5,5551 - 0,043408 \cdot e^{0,0069\left(\frac{T_{1i}+T_{1o}}{2}\right)}} \end{aligned} \quad (4.4.5.23)$$

Η σχέση (4.4.5.23) είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση, και είναι συνάρτηση δύο μεταβλητών (των θερμοκρασιών T_{1i} και T_{1o}).

Οι περιορισμοί στο εύρος των τιμών των θερμοκρασιών έχουν αναφερθεί στις παραγράφους υπολογισμού του κόστους των επιμέρους υποσυστημάτων, και εδώ συνοψίζονται ως εξής:

$$284^{\circ} C \leq T_{1i} \leq 315^{\circ} C$$

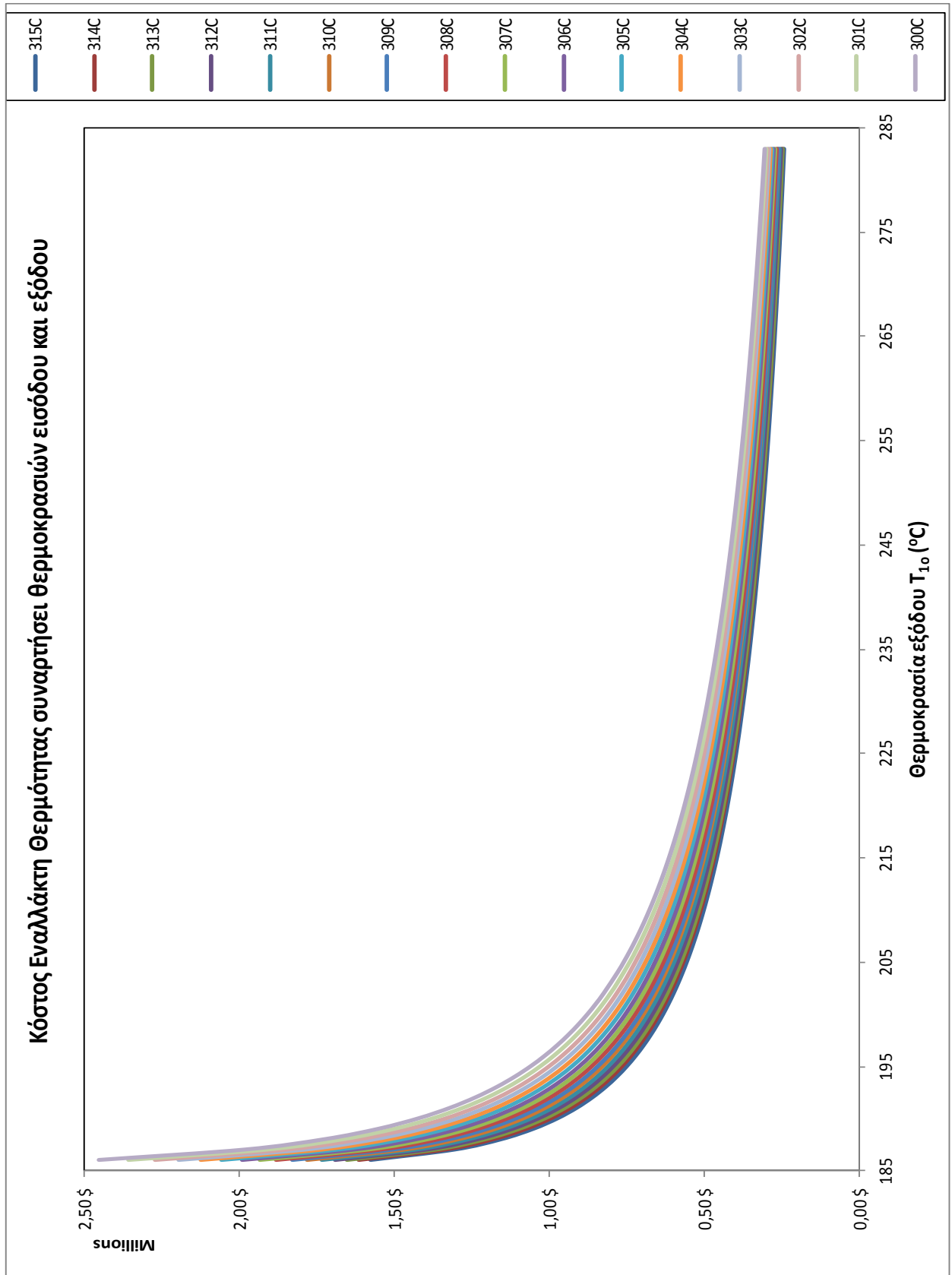
$$186^{\circ} C \leq T_{1o} \leq 283^{\circ} C$$

Η εύρεση του ελαχίστου έγινε με χρήση του Excel, με εύρεση του κόστους για κάθε ζεύγος τιμών θερμοκρασιών, ενώ βήμα μεταβολής των θερμοκρασιών ήταν ο $1^{\circ}C$ ($97 \times 32 = 3104$ ζεύγη τιμών).

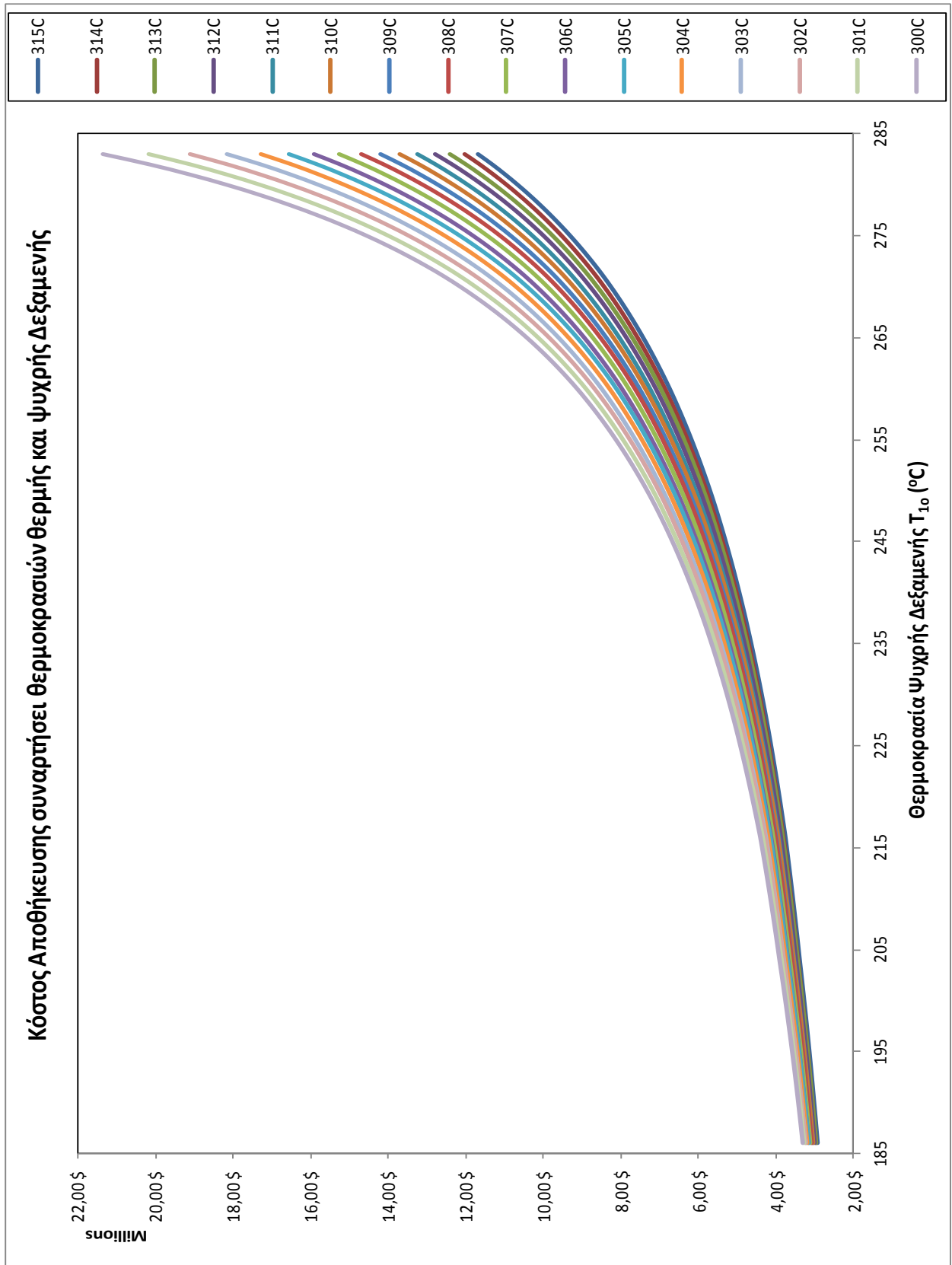
Οι ελάχιστες τιμές κόστους των υποσυστημάτων και συνολικού κόστους που προέκυψαν σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών είναι οι εξής:

- Ελάχιστο Κόστος Εναλλάκτη: \$241.633,63 για $T_{1i} = 315^{\circ}C$ και $T_{1o} = 283^{\circ}C$
- Ελάχιστο Κόστος Αποθήκευσης: \$2.933.948,34 για $T_{1i} = 315^{\circ}C$ και $T_{1o} = 186^{\circ}C$
- Ελάχιστο Κόστος Συλλεκτών: \$32.718.726,92 για $T_{1i} = 284^{\circ}C$ και $T_{1o} = 186^{\circ}C$
- Ελάχιστο Συνολικό Κόστος: \$36.786.270,80 για $T_{1i} = 315^{\circ}C$ και $T_{1o} = 195^{\circ}C$

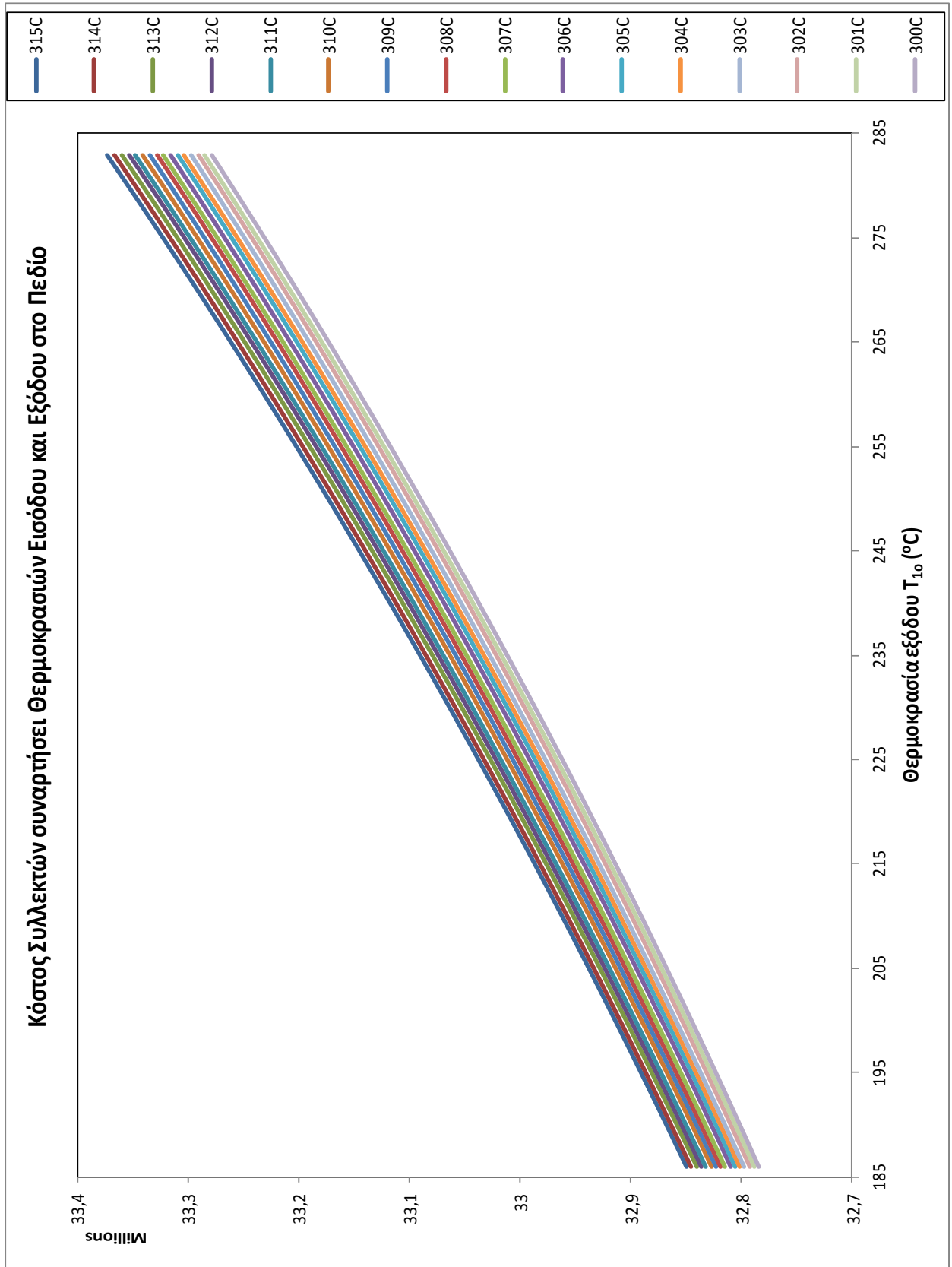
Στα ακόλουθα διαγράμματα αποτυπώνεται η μεταβολή του κόστους των υποσυστημάτων και του συνόλου συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου σε αυτά. Χάριν ευκρίνειας, έχουν χαραχθεί μόνο οι καμπύλες για $T_{1i} = 300-315^{\circ}C$. Η τάση του κόστους, ωστόσο, είναι σαφής.



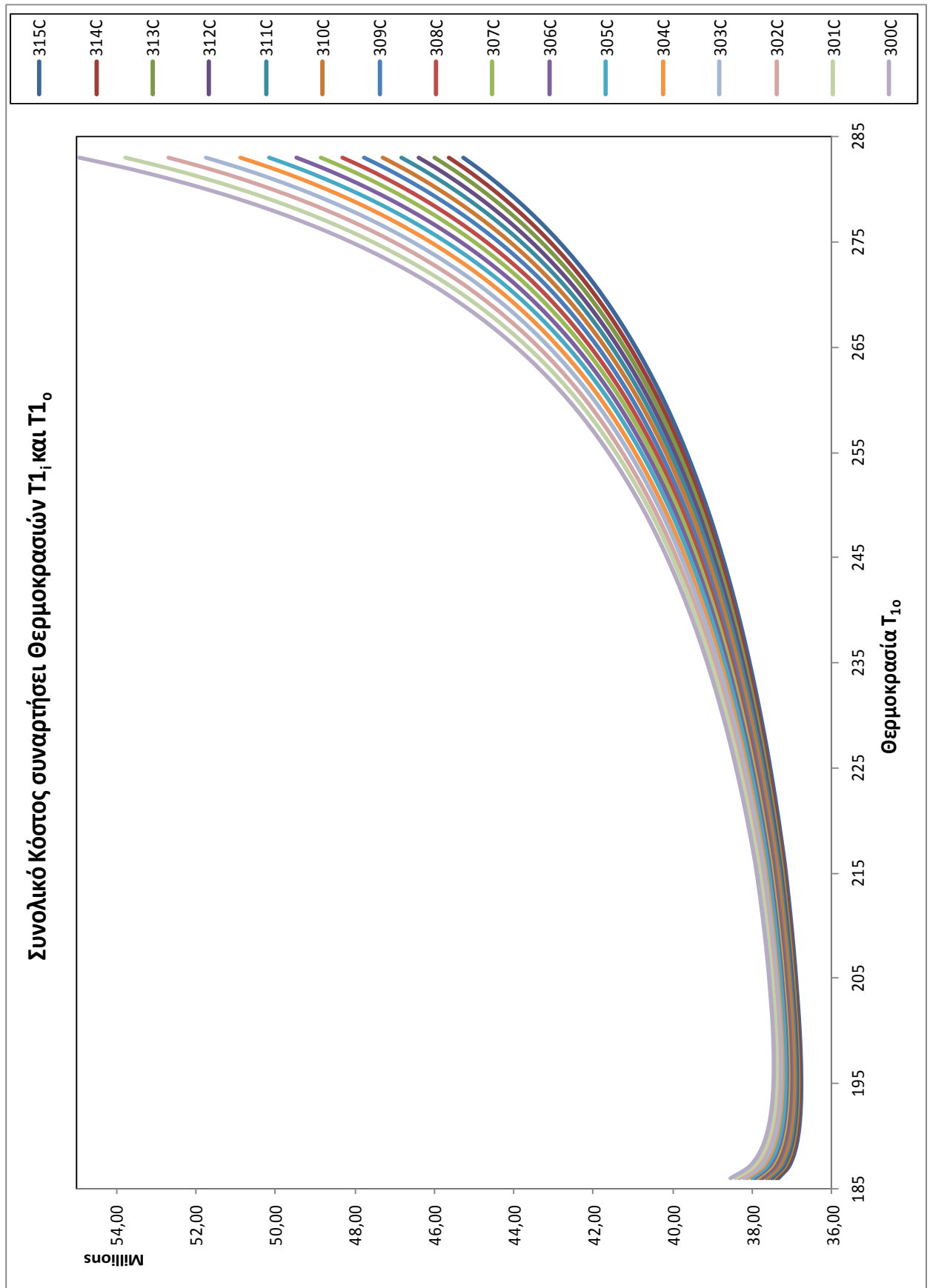
Σχήμα 4.6: Κόστος Εναλλάκτη Θερμότητας συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως.



Σχήμα 4.7: Κόστος Αποθήκευσης συναρτήσει των θερμοκρασιών θερμής και ψυχρής δεξαμενής T_{11} και T_{10} αντιστοίχως.



Σχήμα 4.8: Κόστος Συλλεκτών συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T_{1i} και T_{1o} αντιστοίχως.



Σχήμα 4.9: Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης συναρτήσει των θερμοκρασιών του ρευστού μεταφοράς θερμότητας T1i και T1o αντιστοίχως.

Διαστασιολόγηση Υποσυστημάτων - Υπολογισμός Παροχής Ρευστού Μεταφοράς Θερμότητας στο Σημείο Σχεδίασης

Οι βέλτιστες τιμές θερμοκρασιών που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος της εγκατάστασης βρέθηκαν:

- Θερμοκρασία εξόδου ρευστού από το πεδίο συλλεκτών, Θερμοκρασία θερμής δεξαμενής, Θερμοκρασία εισόδου ρευστού στον εναλλάκτη: 315°C
- Θερμοκρασία εισόδου ρευστού στο πεδίο συλλεκτών, Θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής, Θερμοκρασία εξόδου ρευστού από τον εναλλάκτη: 195°C

Η διαστασιολόγηση των υποσυστημάτων γίνεται με την εισαγωγή αυτών των τιμών θερμοκρασίας στις αντίστοιχες σχέσεις. Έτσι προκύπτει:

➤ <u>Επιφάνεια Εναλλάκτη (σχ. 4.4.5.3):</u>	7.490,43 m ²
➤ <u>Επιφάνεια Συλλεκτών για κάλυψη της ζήτησης (σχ. 4.4.5.17):</u>	76.434,17 m ²
➤ <u>Επιφάνεια Συλλεκτών για κάλυψη της αποθήκευσης (σχ. 4.4.5.20):</u>	50.068,09 m ²
➤ <u>Συνολική Επιφάνεια Συλλεκτών:</u>	126.502,27 m ²
➤ <u>Μάζα Ρευστού για κάλυψη της αποθήκευσης (σχ. 4.4.3.1):</u>	2.865.210,43 kg
➤ <u>Όγκος Θερμής Δεξαμενής (σχ. 4.4.5.6):</u>	4.221,30 m ³
➤ <u>Όγκος Ψυχρής Δεξαμενής (σχ. 4.4.5.6):</u>	3.747,60 m ³

Πέραν αυτών των υποσυστημάτων της εγκατάστασης, πρέπει επιπλέον να υπολογιστούν:

- Η μάζα του ρευστού στη βοηθητική δεξαμενή
- Ο όγκος της βοηθητικής δεξαμενής
- Η μάζα του ρευστού στους αγωγούς απορρόφησης των δεκτών του πεδίου συλλεκτών
- Η παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο σημείο σχεδίασης
- Η ισχύς των αντλιών

Μάζα Ρευστού στη Βοηθητική Δεξαμενή

Η μάζα του ρευστού στη βοηθητική δεξαμενή είναι εκείνη που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών θερμότητας κατά τη διάρκεια παύσης λειτουργίας της εγκατάστασης.

Η ελάχιστη μέση θερμοκρασία εξωτερικού αέρα για τη Ρόδο είναι ίση με 12°C (τον Ιανουάριο^[21]), επομένως οι απώλειες θερμότητας στους αγωγούς απορρόφησης του πεδίου

$$\text{λαμβάνουν χώρα σε μέση θερμοκρασία } T_m = \frac{\left(\frac{T_{li} + T_{l0}}{2}\right) + 12}{2} = 133,5^{\circ}\text{C}$$

Ο συνολικός ρυθμός απωλειών θερμότητας στο πεδίο συλλεκτών δίνεται από τη σχέση (4.4.5.9) πολλαπλασιασμένη επί τη συνολική επιφάνεια συλλεκτών. Προκύπτει:

$$\dot{Q}_{loss,field} = A_a \cdot \dot{Q}_{loss,rec} = 126502,27 \cdot 2,713e^{0,0069T_m} \quad (\text{W}) \quad (4.4.5.24)$$

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας του πεδίου δίνονται από τη σχέση (4.4.5.24) πολλαπλασιασμένη επί το μέγιστο αριθμό ωρών παύσης λειτουργίας του πεδίου (14 για τον Ιανουάριο). Προκύπτει:

$$Q_{loss,field} = \dot{Q}_{loss,field} \cdot 14h = 862181W \cdot 14h = 12070,5kWh$$

Για να καλυφθούν οι απώλειες αυτές από ρευστό μεταφοράς θερμότητας σε θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής (195°C) απαιτείται μάζα ρευστού ίση με:

$$m = \frac{Q_{loss,field}}{h_{@195} - h_{12}} = \frac{12070,5kWh \cdot 3600kJ/kWh}{452,8kJ/kg - 50,5kJ/kg} \Rightarrow m = 107.995kg$$

Όγκος Βοηθητικής Δεξαμενής

Ο όγκος της βοηθητικής δεξαμενής βρίσκεται από τη διαίρεση της παραπάνω τιμής για τη μάζα του ρευστού, προς την πυκνότητά του στη θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής (κοινή με εκείνη της βοηθητικής δεξαμενής). Προκύπτει:

$$V_{buffer} = \frac{m}{\rho_{@195}} = \frac{107995}{764,55} = 141,25m^3$$

Μάζα Ρευστού στους αγωγούς απορρόφησης του Πεδίου Συλλεκτών

Η μάζα ρευστού που απαιτείται για την πλήρωση των αγωγών απορρόφησης των δεκτών του πεδίου, βρίσκεται από τον συνολικό όγκο των αγωγών επί την πυκνότητα του ρευστού στη θερμοκρασία εξόδου από το πεδίο (315°C). Ο όγκος των αγωγών βρίσκεται από το γινόμενο του εμβαδού τους επί το συνολικό τους μήκος, το οποίο συνδέεται με τη συνολική επιφάνεια των συλλεκτών με λόγο 1/5,74 (βλ. παράγραφο 4.4.5.3). Η εσωτερική διάμετρος των αγωγών είναι 0,055m (βλ. Πίνακα 4.10). Επομένως είναι:

$$L_{rec,tot} = \frac{A_{a,tot}}{5,74} = 22038,72m$$

$$V_{rec,tot} = L_{rec,tot} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{inner}}{2}\right)^2 = 52,36m^3$$

$$m_{rec} = V_{rec,tot} \cdot \rho_{@315} = 35.539,52kg$$

Παροχή Ρευστού στο Σημείο Σχεδίασης

Η μαζική παροχή του ρευστού στο σημείο σχεδίασης υπολογίζεται από την εξίσωση διατήρησης ενέργειας στον εναλλάκτη:

$$\dot{Q}_{demand} = \dot{m}_T (h_{Ti} - h_{To}) = \dot{m}_W (h_{Wo} - h_{Wi})$$

όπου:

\dot{Q}_{demand} : Η συνολική ζήτηση (33.188,386kW)

\dot{m}_T, \dot{m}_W : Η μαζική παροχή του Therminol και του νερού αντίστοιχα στον εναλλάκτη

h_{Ti}, h_{To} : Η ενθαλπία του Therminol κατά την είσοδο και έξοδο του από τον εναλλάκτη αντίστοιχα

h_{Wi}, h_{Wo} : Η ενθαλπία του νερού κατά την είσοδο και έξοδο του από τον εναλλάκτη αντίστοιχα

Αντικαθιστώντας τις τιμές των ιδιοτήτων στις αντίστοιχες θερμοκρασίες, προκύπτει:

$$\dot{m}_T = 99,5 \text{ kg/s}$$

Η ογκομετρική του παροχή βρίσκεται από τον πολλαπλασιασμό της προηγούμενης τιμής με την πυκνότητα του ρευστού στη θερμοκρασία εισόδου, και είναι:

$$\dot{V}_T = \dot{m}_T \cdot \rho_{@315} = 0,1466 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Ισχύς αντλιών

Η ισχύς των αντλιών που απαιτούνται για τη ροή του ρευστού στους αγωγούς βρίσκεται από τον πολλαπλασιασμό της ογκομετρικής παροχής με την πίεση. Η πίεση ατμών του Therminol στις θερμοκρασίες λειτουργίας είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής, επομένως η πίεση στις αντλίες είναι αυτή που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών. Θεωρώντας ότι οι απώλειες πίεσης κατά τη ροή είναι ίσες με 5 bar προκύπτει για την ισχύ των αντλιών:

$$\dot{W}_{(HP)} = P_{(Pa)} \cdot \dot{V}_{(m^3/s)} / 745,7 = 500.000 \cdot 0,1466 / 745,7 \Rightarrow$$

$$\dot{W}_{(HP)} = 98,3 \text{ HP}$$

Συγκεντρωτικά, οι διαστάσεις και η κοστολόγηση των απαιτούμενων υποσυστημάτων της εγκατάστασης παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα. Για τη μετατροπή του κόστους σε ευρώ θεωρήθηκε ότι 1€ = 1,3\$:

Πεδίο Συλλεκτών	Επιφάνεια Συλλεκτών (m ²)	Κόστος (€/m ²)	Κόστος (€)
		126.502,27	200
Απαιτούμενη Έκταση (m ²) (Παράγοντας Χρήσης Γης =2)	Κόστος (€/m ²)	Κόστος (€)	
	253.004,54	10	2.530.045
Εναλλάκτης	Επιφάνεια Εναλλάκτη (m ²)	Κόστος (€/m ²)	Κόστος (€)
	7490,43	76,92	576.187
Δεξαμενές Αποθήκευσης	Όγκος (m ³)	Κόστος (€/m ³)	Κόστος (€)
	Θερμή Δεξαμενή	4.221,3	220,77
Ψυχρή Δεξαμενή	3.747,6	220,77	827.358
Βοηθητική Δεξαμενή	141,25	220,77	31.184
Σύνολο	8.110,15	220,77	1.790.478
Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας	Μάζα (kg)	Κόστος (€/kg)	Κόστος (€)
	Δεξαμενές Αποθήκευσης	2.865.210,43	0,23
Βοηθητική Δεξαμενή	107.995	0,23	24.838,85
Αγωγοί Απορρόφησης	35.539,52	0,23	8.174,09
Σύνολο	3.008.744,95	0,23	692.011,34
Λοιπά			
Αντλίες (2x100HP)			
Ρυθμιστικές Βαλβίδες			
Συστήματα Ελέγχου Ροής			
Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης (€)			30.312.988,34

Πίνακας 4.17: Διαστασιολόγηση και κοστολόγηση εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορώνης

4.4.6. Ενεργειακή Παραγωγή της Εγκατάστασης - Εξοικονόμηση Καυσίμου και Ρύπων με την Ενσωμάτωσή της στον ΑΗΣ Σορώνης

Υπολογισμός Ενεργειακής Παραγωγής

Για τον υπολογισμό της ποσότητας ενέργειας που παράγεται από την εγκατάσταση των συλλεκτών παραβολικής σκάφης, ακολουθείται διαδικασία όμοια με αυτή κατά το σχεδιασμό της. Η εξίσωση (4.4.5.14) που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επιφάνειας συλλεκτών που απαιτούνται για την παραγωγή συγκεκριμένης ισχύος, μπορεί να γραφεί σε μορφή που δίνει την παραγόμενη ισχύ των συλλεκτών, υπό συγκεκριμένες τιμές ακτινοβολίας, ως εξής:

$$\dot{Q} = A_a \cdot (\Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \eta_{field} \cdot DNI - 2,713 \cdot e^{0,0069T}) \quad (4.4.6.1)$$

όπου:

\dot{Q} :	Η παραγόμενη ισχύς (W)
A_a :	Η επιφάνεια των συλλεκτών (m ²)
$\Gamma, \rho, \tau, \alpha$:	Οπτικές ιδιότητες του συλλέκτη, όπως ορίζονται στον Πίνακα 4.10
η_{field} :	Η απόδοση του πεδίου, όπως δίνεται από τη σχέση (4.4.5.15)
DNI :	Direct Normal Insolation, η ισχύς της άμεσης ακτινοβολίας, προσπίπτουσας σε επίπεδο κάθετο σε αυτή (W/m ²)
$2,713 \cdot e^{0,0069T}$:	Οι απώλειες του πεδίου ανά μονάδα επιφάνειας των συλλεκτών, στη μέση θερμοκρασία του ρευστού στο πεδίο ($T_{ii} + T_{10}/2$) (W/m ²)

Αντικαθιστώντας τις γνωστές τιμές για τα παραπάνω μεγέθη, η παραγόμενη ισχύς εκφράζεται ως συνάρτηση της DNI και του συνημιτόνου πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στους συλλέκτες $\cos\theta_i$, ως εξής:

$$\dot{Q} = 91650,9 \cos \theta_i \cdot DNI - 1993835 \quad (W) \quad (4.4.6.2)$$

δηλαδή η παραγόμενη ισχύς είναι πρωτοβάθμια συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας και του συνημιτόνου πρόσπτωσης, τα οποία εξαρτώνται και τα δύο από τη θέση του Ήλιου, δηλαδή την ώρα της ημέρας.

Επίσης, υπενθυμίζεται ότι η DNI (ή $G_{b,n}$ όπως έχει συμβολιστεί στο 2^ο Κεφάλαιο) θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια κάθε μίας ώρας της ημέρας (βλ. Ενότητα 2.2.2). Αυτό ισχύει και για το συνημίτονο πρόσπτωσης, καθώς οι ηλιακές γωνίες έχουν υπολογισθεί σε ωριαία βάση. Επομένως, η παραγόμενη ισχύς του πεδίου θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια κάθε μίας ώρας της ημέρας, και η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ωριαίας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας $I_{b,n}$, οι τιμές της οποίας δίνονται στον Πίνακα 4.9. Η σχέση (4.4.6.2) γίνεται επομένως, για την ωριαία παραγόμενη ενέργεια από το πεδίο συλλεκτών:

$$Q_{hour} = 91650,9 \cos \theta_i \cdot I_{b,n} - 1993,835 \quad (\text{kWh}) \quad (4.4.6.3)$$

όπου το συνημίτονο $\cos \theta_i$ δίνεται από τη σχέση (2.2.3.9)

Υπολογισμός Εξοικονόμησης Καυσίμου

Η εξοικονόμηση καυσίμου υπολογίζεται βάσει της ποσότητας καυσίμου που εκτοπίζεται από την ενεργειακή παραγωγή του πεδίου των συλλεκτών. Ο ΑΗΣ Σορώνης είναι πετρελαϊκός σταθμός παραγωγής, και το καύσιμο που χρησιμοποιείται στο λέβητα είναι μαζούτ χαμηλού θείου.

Για την εκτέλεση των υπολογισμών, πάρθηκαν οι ακόλουθες τιμές ιδιοτήτων για το καύσιμο:

- Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη: $LHV = 40.000 \text{ kJ/kg}^{[7]}$
- Πυκνότητα: $\rho = 975 \text{ kg/m}^3$ (Μέση τιμή μεταξύ 970 και 980 kg/m^3 για Μαζούτ Χαμηλού Θείου Νο.1 και Νο.3) *Πηγή: Υπουργείο Ανάπτυξης*
- Κόστος: $582,6 \text{ €/m}^3$ (Μέση τιμή μεταξύ 591,15 και 574,05 €/m^3 για Μαζούτ Νο.180 και Νο.380, τιμές Διυλιστηρίου Ασπροπόργου, 24/1/2012) *Πηγή: Energia.gr*

Η εξοικονόμηση καυσίμου σε kg/hr βρίσκεται μέσω του τύπου:

$$m_{\mu\alpha\zeta\omicron\upsilon\tau,hr} = \frac{Q}{LHV} = \frac{Q_{hour} \cdot 3600 \text{ kJ/kWh}}{40000 \text{ kJ/kg}} \quad (4.4.6.4)$$

ενώ η εξοικονόμηση σε κόστος καυσίμου βρίσκεται από τη σχέση:

$$\text{Εξοικονόμηση} (\text{€/hr}) = m_{\mu\alpha\zeta\omicron\upsilon\tau,hr} \frac{\text{Κόστος}}{\rho} \quad (4.4.6.4)$$

Αποτελέσματα Υπολογισμών

Στους πίνακες που ακολουθούν αποτυπώνονται τα αποτελέσματα για την ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης, και της εξοικονόμησης καυσίμου που προκύπτει από την ενσωμάτωσή της στον ΑΗΣ Σορώνης, βάσει των παραπάνω εξισώσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μηνιαία βάση, για τη μέση ημέρα κάθε μήνα. Η ζήτηση του ΑΗΣ είναι σταθερή και ίση με 33.188,36 kWh/hr.

Σε ότι αφορά τον χρονικό προγραμματισμό της παραγωγής, οι συλλέκτες παρέχουν ενέργεια, κατά προτεραιότητα, για την κάλυψη της ζήτησης. Όταν η παραγόμενη ενέργεια στο πεδίο ξεπερνά το 100% της ζήτησης, η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται προς χρήση σε μετέπειτα χρόνο.

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία I _{b,n} (kWh/m ²)	cosθi	Q _{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00								
06:00-07:00								
07:00-08:00	0,1097	0,8612	7634,20	23,00%	0	0	687,08	410,56
08:00-09:00	0,1868	0,7792	12841,21	38,69%	0	0	1155,71	690,58
09:00-10:00	0,2538	0,6846	15713,80	47,35%	0	0	1414,24	845,06
10:00-11:00	0,3011	0,5984	16368,95	49,32%	0	0	1473,21	880,30
11:00-12:00	0,3256	0,5447	16082,32	48,46%	0	0	1447,41	864,88
12:00-13:00	0,3256	0,5447	16082,32	48,46%	0	0	1447,41	864,88
13:00-14:00	0,3011	0,5984	16368,95	49,32%	0	0	1473,21	880,30
14:00-15:00	0,2538	0,6846	15713,80	47,35%	0	0	1414,24	845,06
15:00-16:00	0,1867	0,7792	12833,27	38,67%	0	0	1155,00	690,15
16:00-17:00	0,1097	0,8612	7634,20	23,00%	0	0	687,08	410,56
17:00-18:00								
18:00-19:00								
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			137273,01		0	0	12354,57	7382,33
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			4255463,31		0	0	382991,70	228852,27

Πίνακας 4.18: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Ιανουαρίου

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία I _{b,n} (kWh/m ²)	cosθi	Q _{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00								
06:00-07:00	0,087	0,9507	6435,75	19,39%	0	0	579,22	346,10
07:00-08:00	0,1451	0,9139	11520,63	34,71%	0	0	1036,86	619,56
08:00-09:00	0,2221	0,8438	17107,35	51,55%	0	0	1539,66	920,01
09:00-10:00	0,2851	0,7657	20254,92	61,03%	0	0	1822,94	1089,28
10:00-11:00	0,3296	0,6954	21367,54	64,38%	0	0	1923,08	1149,11
11:00-12:00	0,3527	0,6527	21468,94	64,69%	0	0	1932,20	1154,57
12:00-13:00	0,3527	0,6527	21468,94	64,69%	0	0	1932,20	1154,57
13:00-14:00	0,3296	0,6954	21367,54	64,38%	0	0	1923,08	1149,11
14:00-15:00	0,2851	0,7657	20254,92	61,03%	0	0	1822,94	1089,28
15:00-16:00	0,2221	0,8438	17107,35	51,55%	0	0	1539,66	920,01
16:00-17:00	0,1451	0,9139	11520,63	34,71%	0	0	1036,86	619,56
17:00-18:00	0,087	0,9506	6435,75	19,39%	0	0	579,22	346,10
18:00-19:00								
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			196310,29		0	0	17667,93	10557,27
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			5496688,15		0	0	494701,93	295603,43

Πίνακας 4.19: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Φεβρουαρίου

ΜΑΡΤΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία I _{b,n} (kWh/m ²)	cosθi	Q _{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00								
06:00-07:00	0,2568	0,9927	23988,15	72,28%	0	0	2158,93	1290,05
07:00-08:00	0,2946	0,9654	26991,82	81,33%	0	0	2429,26	1451,58
08:00-09:00	0,3302	0,9187	28924,57	87,15%	0	0	2603,21	1555,52
09:00-10:00	0,3594	0,8635	29636,13	89,30%	0	0	2667,25	1593,79
10:00-11:00	0,3801	0,8133	29516,29	88,94%	0	0	2656,47	1587,34
11:00-12:00	0,3907	0,7832	29192,65	87,96%	0	0	2627,34	1569,94
12:00-13:00	0,3907	0,7832	29192,65	87,96%	0	0	2627,34	1569,94
13:00-14:00	0,3801	0,8133	29516,29	88,94%	0	0	2656,47	1587,34
14:00-15:00	0,3594	0,8635	29636,13	89,30%	0	0	2667,25	1593,79
15:00-16:00	0,3302	0,9187	28924,57	87,15%	0	0	2603,21	1555,52
16:00-17:00	0,2946	0,9653	26991,82	81,33%	0	0	2429,26	1451,58
17:00-18:00	0,2568	0,9927	23988,15	72,28%	0	0	2158,93	1290,05
18:00-19:00								
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			336499,22		0	0	30284,93	18096,41
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			10431475,8		0	0	938832,82	560988,72

Πίνακας 4.20: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Μαρτίου

ΑΠΡΙΛΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία I _{b,n} (kWh/m ²)	cosθi	Q _{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00	0,1731	0,9847	15378,93	46,34%	0	0	1384,10	827,05
06:00-07:00	0,2275	0,9982	21150,16	63,73%	0	0	1903,51	1137,42
07:00-08:00	0,2975	0,9962	28211,79	85,01%	0	0	2539,06	1517,18
08:00-09:00	0,3601	0,9757	33814,09	101,89%	625,70	0,018	3043,26	1818,46
09:00-10:00	0,4114	0,9450	37627,65	113,38%	4439,26	0,133	3386,48	2023,55
10:00-11:00	0,4478	0,9150	39764,74	119,82%	6576,35	0,198	3578,82	2138,48
11:00-12:00	0,4665	0,8965	40630,69	122,42%	7442,30	0,224	3656,76	2185,05
12:00-13:00	0,4665	0,8965	40630,69	122,42%	7442,30	0,224	3656,76	2185,05
13:00-14:00	0,4478	0,9150	39764,74	119,82%	6576,35	0,198	3578,82	2138,48
14:00-15:00	0,4114	0,9450	37627,65	113,38%	4439,26	0,133	3386,48	2023,55
15:00-16:00	0,3601	0,9757	33814,09	101,89%	625,70	0,018	3043,26	1818,46
16:00-17:00	0,2975	0,9962	28211,79	85,01%	0	0	2539,06	1517,18
17:00-18:00	0,2275	0,9982	21150,16	63,73%	0	0	1903,51	1137,42
18:00-19:00	0,1731	0,9847	15378,93	46,34%	0	0	1384,10	827,05
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			433156,11		38167,24	1,15	38984,05	23294,46
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			12994683,46		1145017,4	34,50	1169521,51	698834,08

Πίνακας 4.21: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Απριλίου

ΜΑΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ωρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00	0,2428	0,9424	21327,60	64,26%	0	0	1919,48	1146,96
06:00-07:00	0,3084	0,9819	28869,84	86,99%	0	0	2598,28	1552,57
07:00-08:00	0,373	0,9988	35978,23	108,41%	2789,84	0,084	3238,04	1934,85
08:00-09:00	0,4309	0,9968	41785,26	125,90%	8596,876	0,259	3760,67	2247,14
09:00-10:00	0,4782	0,9831	45923,97	138,37%	12735,58	0,383	4133,15	2469,72
10:00-11:00	0,5116	0,9667	48412,34	145,87%	15223,95	0,458	4357,11	2603,54
11:00-12:00	0,5289	0,9558	49532,83	149,25%	16344,44	0,492	4457,95	2663,79
12:00-13:00	0,5289	0,9558	49532,83	149,25%	16344,44	0,492	4457,95	2663,79
13:00-14:00	0,5116	0,9667	48412,34	145,87%	15223,95	0,458	4357,11	2603,54
14:00-15:00	0,4782	0,9831	45923,97	138,37%	12735,58	0,383	4133,15	2469,72
15:00-16:00	0,4309	0,9968	41785,26	125,90%	8596,87	0,259	3760,67	2247,14
16:00-17:00	0,373	0,9988	35978,23	108,41%	2789,84	0,084	3238,04	1934,85
17:00-18:00	0,3084	0,9819	28869,84	86,99%	0	0	2598,28	1552,57
18:00-19:00	0,2428	0,9424	21327,60	64,26%	0	0	1919,48	1146,96
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			543660,17		111381,42	3,356	48929,41	29237,20
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			16853465,56		3452824,24	104,037	1516811,9	906353,44

Πίνακας 4.22: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Μαΐου

ΙΟΥΝΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ωρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00	0,2911	0,8793	24092,17	72,59%	0	0	2168,30	1295,64
05:00-06:00	0,3306	0,9207	29029,62	87,47%	0	0	2612,67	1561,17
06:00-07:00	0,3965	0,9688	37154,69	111,95%	3966,30	0,120	3343,92	1998,12
07:00-08:00	0,4596	0,9939	44560,45	134,27%	11372,06	0,343	4010,44	2396,39
08:00-09:00	0,5165	0,9999	50642,73	152,59%	17454,34	0,526	4557,85	2723,49
09:00-10:00	0,5627	0,9936	54987,23	165,68%	21798,85	0,657	4948,85	2957,13
10:00-11:00	0,5954	0,9829	57649,24	173,70%	24460,85	0,737	5188,43	3100,29
11:00-12:00	0,6124	0,9753	58876,62	177,40%	25688,23	0,774	5298,90	3166,29
12:00-13:00	0,6124	0,9753	58876,62	177,40%	25688,23	0,774	5298,90	3166,29
13:00-14:00	0,5954	0,9829	57649,24	173,70%	24460,85	0,737	5188,43	3100,29
14:00-15:00	0,5627	0,9936	54987,23	165,68%	21798,85	0,657	4948,85	2957,13
15:00-16:00	0,5165	0,9999	50642,73	152,59%	17454,34	0,526	4557,85	2723,49
16:00-17:00	0,4596	0,9939	44560,45	134,27%	11372,06	0,343	4010,44	2396,39
17:00-18:00	0,3965	0,9688	37154,69	111,95%	3966,30	0,120	3343,92	1998,12
18:00-19:00	0,3306	0,9207	29029,62	87,47%	0	0	2612,67	1561,17
19:00-20:00	0,2911	0,8793	24092,17	72,59%	0	0	2168,30	1295,64
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			713985,47		209481,27	6,312	64258,69	38397,04
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			21419564,24		6284438,06	189,357	1927760,78	1151911,21

Πίνακας 4.23: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Ιουνίου

ΙΟΥΛΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ωρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00	0,2994	0,8959	25343,84	76,36%	0	0	2280,95	1362,95
05:00-06:00	0,3417	0,9309	30425,90	91,68%	0	0	2738,33	1636,26
06:00-07:00	0,4112	0,9753	38879,22	117,15%	5690,84	0,171	3499,13	2090,86
07:00-08:00	0,4784	0,9967	46601,30	140,41%	13412,91	0,404	4194,12	2506,15
08:00-09:00	0,5385	0,9991	52837,45	159,20%	19649,07	0,592	4755,37	2841,52
09:00-10:00	0,5877	0,9894	57267,02	172,55%	24078,64	0,726	5154,03	3079,73
10:00-11:00	0,6223	0,9761	59911,08	180,52%	26722,69	0,805	5392,00	3221,93
11:00-12:00	0,6404	0,9670	61119,06	184,16%	27930,67	0,842	5500,72	3286,89
12:00-13:00	0,6404	0,9670	61119,06	184,16%	27930,67	0,842	5500,72	3286,89
13:00-14:00	0,6223	0,9761	59911,08	180,52%	26722,69	0,805	5392,00	3221,93
14:00-15:00	0,5877	0,9894	57267,02	172,55%	24078,64	0,726	5154,03	3079,73
15:00-16:00	0,5385	0,9991	52837,45	159,20%	19649,07	0,592	4755,37	2841,52
16:00-17:00	0,4784	0,9967	46601,30	140,41%	13412,91	0,404	4194,12	2506,15
17:00-18:00	0,4112	0,9753	38879,22	117,15%	5690,84	0,171	3499,13	2090,86
18:00-19:00	0,3417	0,9309	30425,90	91,68%	0	0	2738,33	1636,26
19:00-20:00	0,2994	0,8959	25343,84	76,36%	0	0	2280,95	1362,95
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			744769,74		234969,63	7,080	67029,28	40052,57
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			23087861,89		7284058,56	219,476	2077907,57	1241629,69

Πίνακας 4.24: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Ιουλίου

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ωρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00	0,3127	0,9712	28957,18	87,25%	0	0	2606,15	1557,27
06:00-07:00	0,3792	0,9937	36410,58	109,71%	3222,19	0,097	3276,95	1958,10
07:00-08:00	0,4552	0,9994	44373,15	133,70%	11184,77	0,337	3993,58	2386,32
08:00-09:00	0,5233	0,9865	50617,36	152,52%	17428,97	0,525	4555,56	2722,12
09:00-10:00	0,579	0,9627	54815,44	165,16%	21627,06	0,652	4933,39	2947,89
10:00-11:00	0,6183	0,9383	57131,89	172,14%	23943,50	0,721	5141,87	3072,47
11:00-12:00	0,6386	0,9230	58076,56	174,99%	24888,17	0,750	5226,89	3123,27
12:00-13:00	0,6386	0,9230	58076,56	174,99%	24888,17	0,750	5226,89	3123,27
13:00-14:00	0,6183	0,9383	57131,89	172,14%	23943,50	0,721	5141,87	3072,47
14:00-15:00	0,579	0,9627	54815,44	165,16%	21627,06	0,652	4933,39	2947,89
15:00-16:00	0,5233	0,9865	50617,36	152,52%	17428,97	0,525	4555,56	2722,12
16:00-17:00	0,4552	0,9994	44373,15	133,70%	11184,77	0,337	3993,58	2386,32
17:00-18:00	0,3792	0,9937	36410,58	109,71%	3222,19	0,097	3276,95	1958,10
18:00-19:00	0,3127	0,9712	28957,18	87,25%	0	0	2606,15	1557,27
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			660764,32		204589,33	6,164	59468,79	35534,89
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			20483693,89		6342269,19	191,099	1843532,45	1101581,54

Πίνακας 4.25: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Αυγούστου

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00	0,2344	0,9995	21883,22	65,94%	0	0	1969,49	1176,85
06:00-07:00	0,2876	0,9987	27278,28	82,19%	0	0	2455,05	1466,98
07:00-08:00	0,3744	0,9795	35381,73	106,61%	2193,35	0,066	3184,36	1902,78
08:00-09:00	0,4519	0,9420	41392,22	124,72%	8203,83	0,247	3725,30	2226,01
09:00-10:00	0,5153	0,8955	45036,30	135,70%	11847,92	0,357	4053,27	2421,98
10:00-11:00	0,5601	0,8526	46679,10	140,65%	13490,72	0,406	4201,12	2510,33
11:00-12:00	0,5833	0,8268	47155,97	142,09%	13967,59	0,421	4244,04	2535,98
12:00-13:00	0,5833	0,8268	47155,97	142,09%	13967,59	0,421	4244,04	2535,98
13:00-14:00	0,5601	0,8526	46679,10	140,65%	13490,72	0,406	4201,12	2510,33
14:00-15:00	0,5153	0,8955	45036,30	135,70%	11847,92	0,357	4053,27	2421,98
15:00-16:00	0,4519	0,9420	41392,22	124,72%	8203,83	0,247	3725,30	2226,01
16:00-17:00	0,3744	0,9795	35381,73	106,61%	2193,35	0,066	3184,36	1902,78
17:00-18:00	0,2876	0,9987	27278,28	82,19%	0	0	2455,05	1466,98
18:00-19:00	0,2344	0,9995	21883,22	65,94%	0	0	1969,49	1176,85
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			529613,66		99406,80	2,995	47665,23	28481,81
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			15888409,94		2982204,13	89,857	1429956,89	854454,24

Πίνακας 4.26: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Σεπτεμβρίου

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00								
06:00-07:00	0,2037	0,9675	18091,34	54,51%	0	0	1628,22	972,92
07:00-08:00	0,2751	0,9318	24131,74	72,71%	0	0	2171,86	1297,77
08:00-09:00	0,3612	0,8688	29990,47	90,36%	0	0	2699,14	1612,84
09:00-10:00	0,4312	0,7978	33064,98	99,63%	0	0	2975,85	1778,18
10:00-11:00	0,4809	0,7339	33975,56	102,37%	787,18	0,024	3057,80	1827,15
11:00-12:00	0,5065	0,6953	33896,18	102,13%	707,80	0,021	3050,66	1822,88
12:00-13:00	0,5065	0,6953	33896,18	102,13%	707,80	0,021	3050,66	1822,88
13:00-14:00	0,4809	0,7339	33975,56	102,37%	787,18	0,024	3057,80	1827,15
14:00-15:00	0,4312	0,7978	33064,98	99,63%	0	0	2975,85	1778,18
15:00-16:00	0,3612	0,8688	29990,47	90,36%	0	0	2699,14	1612,84
16:00-17:00	0,2751	0,9318	24131,74	72,71%	0	0	2171,86	1297,77
17:00-18:00	0,2037	0,9675	18091,34	54,51%	0	0	1628,22	972,92
18:00-19:00								
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			346300,56		2989,95	0,090	31167,05	18623,51
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			10735317,27		92688,33	2,792	966178,55	577328,85

Πίνακας 4.27: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Οκτωβρίου

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00								
06:00-07:00								
07:00-08:00	0,1559	0,8766	11933,89	35,96%	0	0	1074,05	641,79
08:00-09:00	0,2438	0,7941	17736,51	53,44%	0	0	1596,29	953,84
09:00-10:00	0,3159	0,7030	20640,12	62,19%	0	0	1857,61	1109,99
10:00-11:00	0,367	0,6204	21213,15	63,92%	0	0	1909,18	1140,81
11:00-12:00	0,3934	0,5694	20835,17	62,78%	0	0	1875,16	1120,48
12:00-13:00	0,3934	0,5694	20835,17	62,78%	0	0	1875,16	1120,48
13:00-14:00	0,367	0,6204	21213,15	63,92%	0	0	1909,18	1140,81
14:00-15:00	0,3159	0,7030	20640,12	62,19%	0	0	1857,61	1109,99
15:00-16:00	0,2438	0,7941	17736,51	53,44%	0	0	1596,29	953,84
16:00-17:00	0,1559	0,8766	11933,89	35,96%	0	0	1074,05	641,79
17:00-18:00								
18:00-19:00								
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			184717,67		0	0	16624,59	9933,83
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			5541530,24		0	0	498737,72	298014,97

Πίνακας 4.28: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Νοεμβρίου

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ								
Τοπική Φαινόμενη Ώρα	Άμεση Ακτινοβολία $I_{b,n}$ (kWh/m ²)	cosθi	Q_{hour} (kWh)	Κάλυψη Ζήτησης (%)	Αποθήκευση (kWh)	Αποθήκευση (hr)	Εκτόπιση Καυσίμου (kg)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (€)
04:00-05:00								
05:00-06:00								
06:00-07:00								
07:00-08:00	0,0832	0,8395	5124,70	15,44%	0	0	461,22	275,60
08:00-09:00	0,1549	0,7592	9991,08	30,10%	0	0	899,20	537,31
09:00-10:00	0,2209	0,6598	12860,26	38,75%	0	0	1157,42	691,60
10:00-11:00	0,2679	0,5687	13533,26	40,78%	0	0	1217,99	727,80
11:00-12:00	0,2921	0,5114	13229,55	39,86%	0	0	1190,66	711,47
12:00-13:00	0,2921	0,5114	13229,55	39,86%	0	0	1190,66	711,47
13:00-14:00	0,2679	0,5687	13533,26	40,78%	0	0	1217,99	727,80
14:00-15:00	0,2209	0,6598	12860,26	38,75%	0	0	1157,42	691,60
15:00-16:00	0,1549	0,7592	9991,08	30,10%	0	0	899,20	537,31
16:00-17:00	0,0832	0,8395	5124,70	15,44%	0	0	461,22	275,60
17:00-18:00								
18:00-19:00								
19:00-20:00								
ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			109477,71		0	0	9852,99	5887,54
ΜΗΝΙΑΙΟ ΣΥΝΟΛΟ			3393808,97		0	0	305442,81	182513,83

Πίνακας 4.29: Ενεργειακή Παραγωγή και Εξοικονόμηση Καυσίμου μηνός Δεκεμβρίου

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την παραγωγή ενέργειας και την εξοικονόμηση καυσίμου και ρύπων σε ετήσια βάση, μετά από επεξεργασία των στοιχείων των προηγούμενων πινάκων. Για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία εκπεμπόμενων ρύπων (mg/MJ) για το μαζούτ^[22]. Για τη μετατροπή τους σε g/kg χρησιμοποιήθηκε η τιμή κατώτερης θερμογόνου δύναμης LHV=40.000kJ/kg:

Σωματίδια		NO _x		SO ₂		CO		CO ₂	
(mg/MJ)	(g/kg)	(mg/MJ)	(g/kg)	(mg/MJ)	(g/kg)	(mg/MJ)	(g/kg)	(mg/MJ)	(g/kg)
89	3,56	158	6,32	1364	54,56	15	0,6	83.768	3350,72

Πίνακας 4.30: Μέσες τιμές εκπεμπόμενων ρύπων κατά την καύση του μαζούτ.

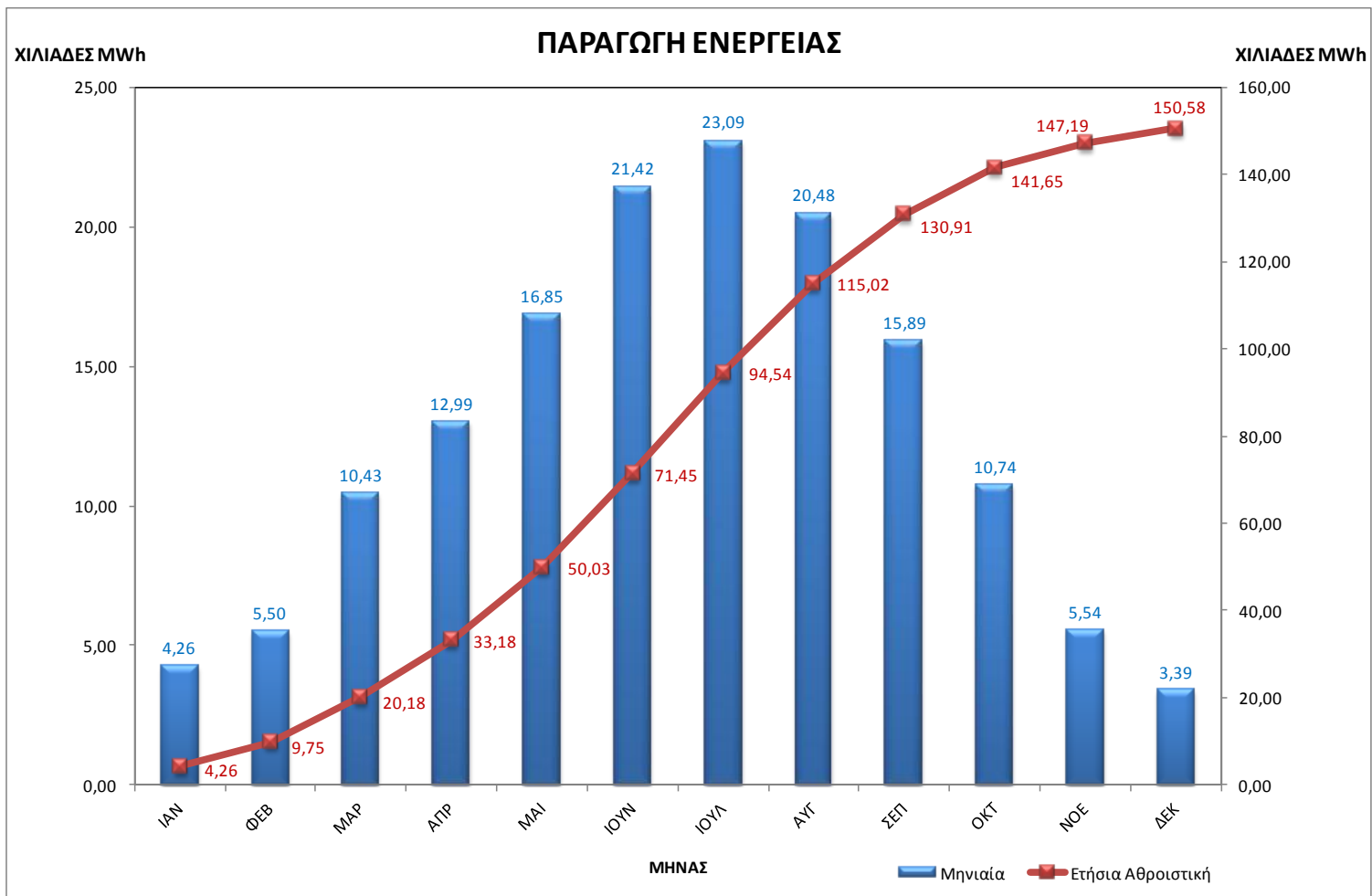
Στον πίνακα αναγράφονται οι μηνιαίες τιμές παραγόμενης ενέργειας, συνολικής ημερήσιας κάλυψης της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε θερμότητα (σε ώρες, αυτή η τιμή προκύπτει από τη διαίρεση της τιμής παραγωγής ενέργειας προς την ωριαία ζήτηση του ΑΗΣ και περιέχει και τις ώρες που εξυπηρετούνται από τις δεξαμενές αποθήκευσης), της εκτόπισης και εξοικονόμησης καυσίμου, της κάλυψης της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε θερμότητα (ως ποσοστό %) καθώς και της εξοικονόμησης ρύπων ανά ρυπογόνο ουσία.

ΜΗΝΑΣ	Παραγωγή Ενέργειας (MWh)	Ημερήσια Κάλυψη Ζήτησης (Ωρες)	Εκτόπιση Καυσίμου (Τόνοι)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (Χιλ. €)	Εξοικονόμηση Καυσίμου (%)
ΙΑΝ	4255,46	4,14	382,99	228,85	17,23%
ΦΕΒ	5496,69	5,92	494,70	295,60	24,65%
ΜΑΡ	10431,48	10,14	938,83	560,99	42,25%
ΑΠΡ	12994,68	13,05	1169,52	698,83	54,38%
ΜΑΙ	16853,47	16,38	1516,81	906,35	68,25%
ΙΟΥΝ	21419,56	21,51	1927,76	1151,91	89,64%
ΙΟΥΛ	23087,86	22,44	2077,91	1241,63	93,50%
ΑΥΓ	20483,69	19,91	1843,53	1101,58	82,96%
ΣΕΠ	15888,41	15,96	1429,96	854,45	66,49%
ΟΚΤ	10735,32	10,43	966,18	577,33	43,48%
ΝΟΕ	5541,53	5,57	498,74	298,01	23,19%
ΔΕΚ	3393,81	3,30	305,44	182,51	13,74%
ΕΤΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ	150581,96		13552,38	8098,07	51,79%
ΜΗΝΑΣ	Εξοικονόμηση Σωματιδίων (Τόνοι)	Εξοικονόμηση NO _x (Τόνοι)	Εξοικονόμηση SO ₂ (Τόνοι)	Εξοικονόμηση CO (Τόνοι)	Εξοικονόμηση CO ₂ (Τόνοι)
ΙΑΝ	1,36	2,42	20,90	0,23	1283,30
ΦΕΒ	1,76	3,13	26,99	0,30	1657,61
ΜΑΡ	3,34	5,93	51,22	0,56	3145,77
ΑΠΡ	4,16	7,39	63,81	0,70	3918,74
ΜΑΙ	5,40	9,59	82,76	0,91	5082,41
ΙΟΥΝ	6,86	12,18	105,18	1,16	6459,39
ΙΟΥΛ	7,40	13,13	113,37	1,25	6962,49
ΑΥΓ	6,56	11,65	100,58	1,11	6177,16
ΣΕΠ	5,09	9,04	78,02	0,86	4791,39
ΟΚΤ	3,44	6,11	52,71	0,58	3237,39
ΝΟΕ	1,78	3,15	27,21	0,30	1671,13
ΔΕΚ	1,09	1,93	16,66	0,18	1023,45
ΕΤΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ	48,25	85,65	739,42	8,13	45410,22

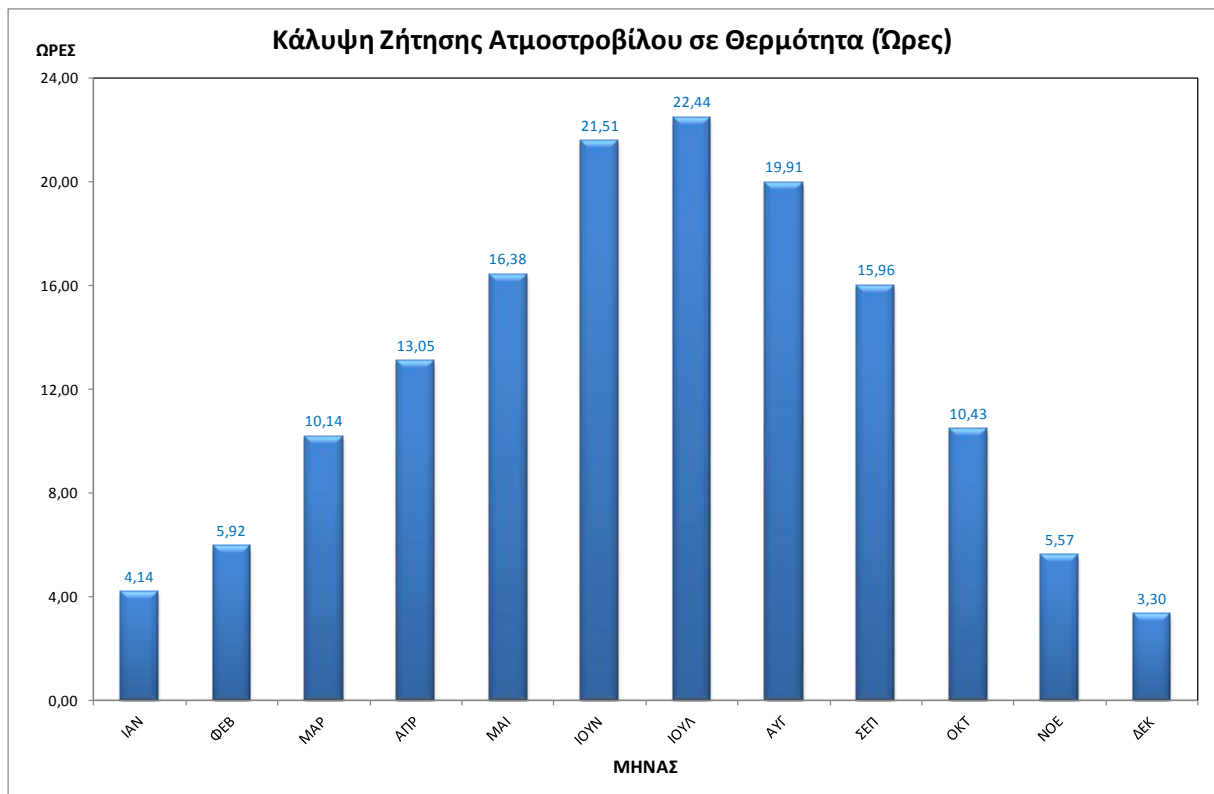
Πίνακας 4.31: Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας και Εξοικονόμηση Καυσίμου και Ρύπων στον ΑΗΣ Σορώνης

Στα επόμενα γραφήματα αποτυπώνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την παραγωγή ενέργειας, την κάλυψη της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε θερμότητα (εκπεφρασμένης σε ώρες λειτουργίας του ατμοστροβίλου και ως ποσοστό επί τοις εκατό), και την εξοικονόμηση καυσίμου και ρύπων που επιτυγχάνονται από την ενσωμάτωση των συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορώνης.

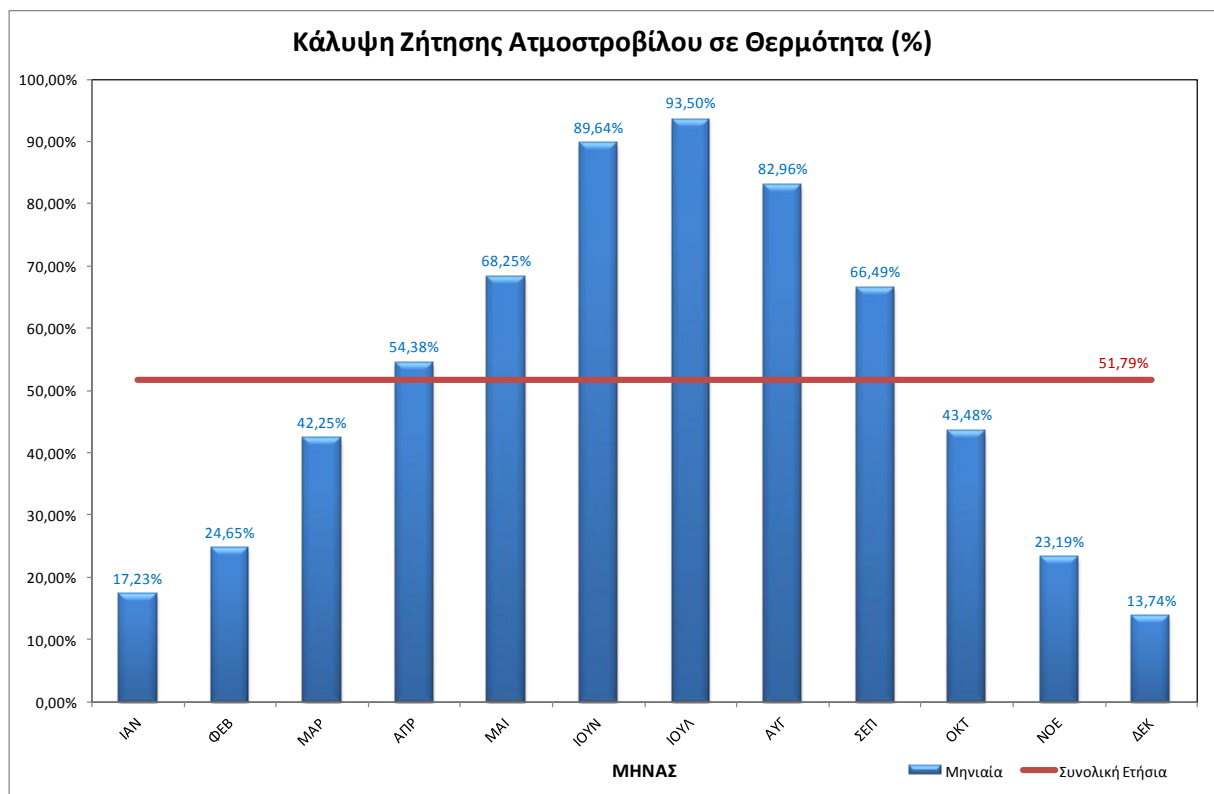
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μηνιαία και ετήσια αθροιστική βάση, και απεικονίζουν τη μεταβολή των παραπάνω μεγεθών στη διάρκεια ενός τυπικού έτους λειτουργίας της εγκατάστασης.



Σχήμα 4.10: Παραγωγή Ενέργειας Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης του ΑΗΣ Σορώνης (Μηνιαίες και Ετήσιες Αθροιστικές τιμές)

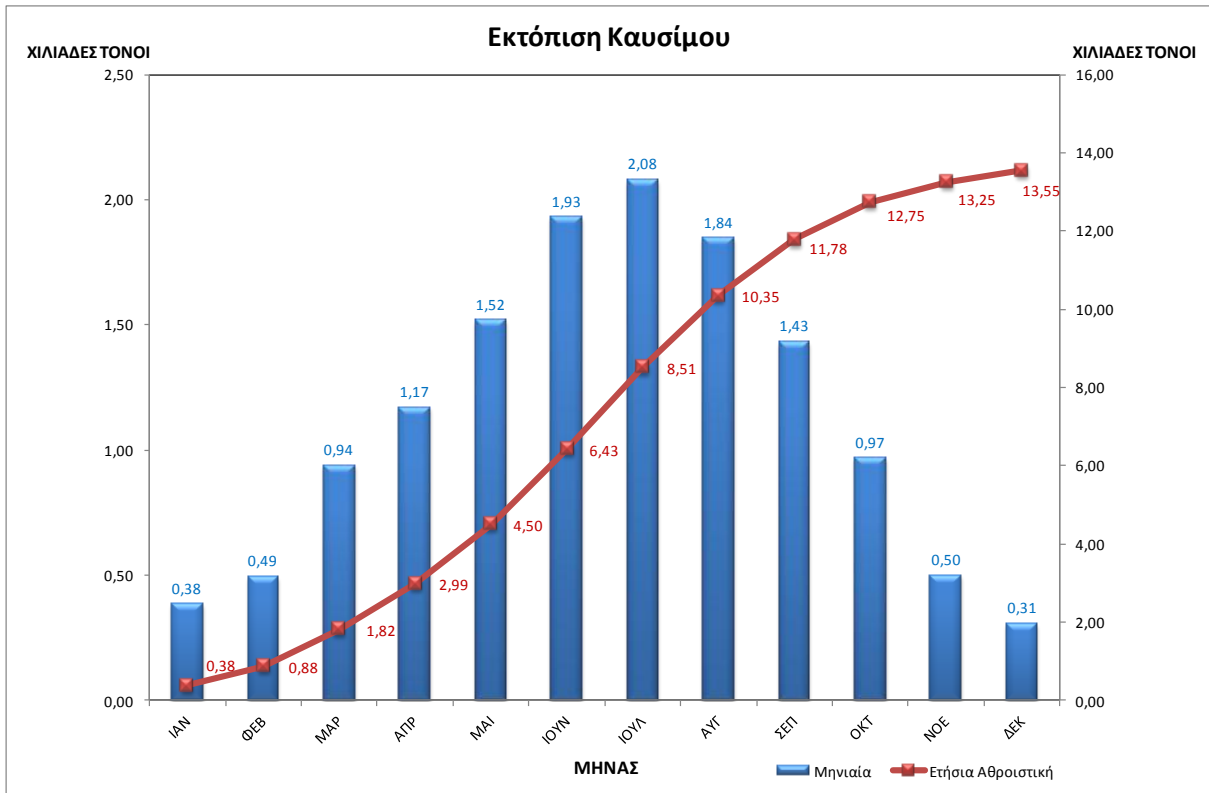


(α)

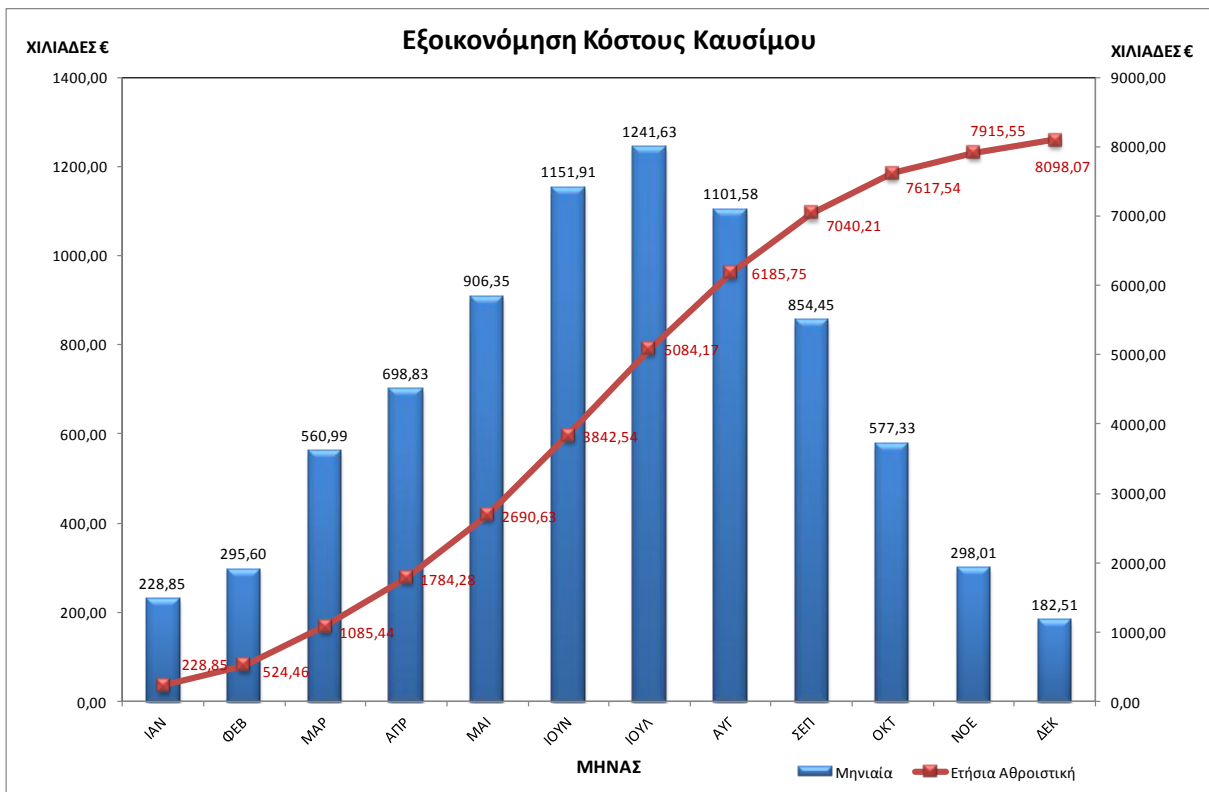


(β)

Σχήμα 4.11: Κάλυψη Ζήτησης Ατμοστροβίλου του ΑΗΣ Σορώνης σε θερμότητα: (α) εκπερασμένη σε ώρες λειτουργίας του ατμοστροβίλου και (β) ως ποσοστό επί τοις εκατό, από την ενσωμάτωση πεδίου συλλεκτών παραβολικής σκάφης

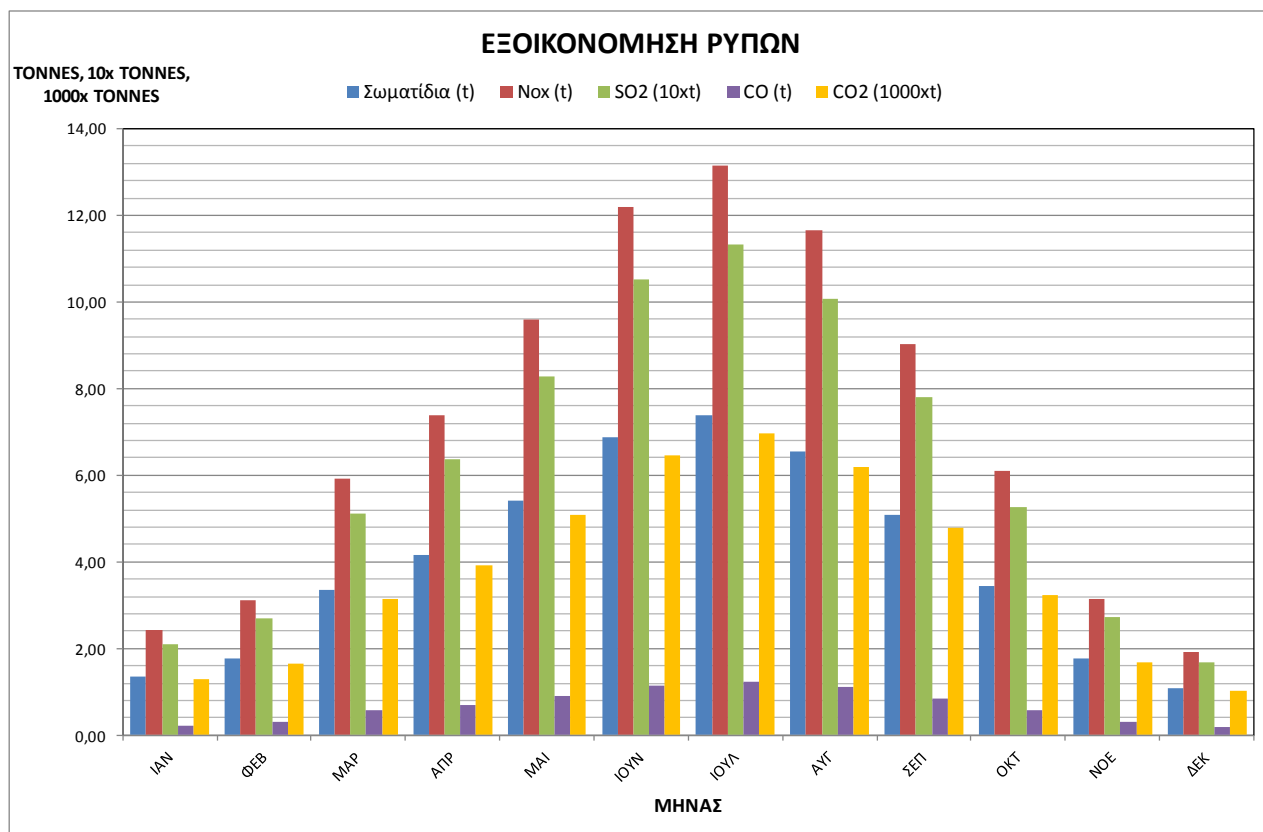


(α)



(β)

Σχήμα 4.12: (α) Εκτόπιση Καυσίμου και (β) Εξοικονόμηση Κόστους Καυσίμου (Μηνιαίες και Ετήσιες Αθροιστικές τιμές), από την ενσωμάτωση εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορώνης.



Σχήμα 4.13: Εξοικονόμηση Ρύπων, ανά ρυπογόνο ουσία, (Μηνιαίες Τιμές) από την ενσωμάτωση εγκατάστασης συλλεκτών παραβολικής σκάφης στον ΑΗΣ Σορώνης.

Από τα προηγούμενα γραφήματα γίνεται φανερή η σχέση μεταξύ των τιμών της παραγόμενης ενέργειας και της τιμής της μέσης μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με πρωτοβάθμια σχέση. Επίσης παρατηρείται ότι η μηνιαία εξέλιξη των τιμών παραγωγής ενέργειας και εξοικονόμησης καυσίμων και ρύπων παρουσιάζουν παρόμοια μορφή. Το γεγονός αυτό είναι επίσης αναμενόμενο, καθώς τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα.

Από τα διαγράμματα γίνεται επίσης φανερή η λογική της επιλογής του Ιουλίου ως σημείου σχεδίασης της εγκατάστασης. Κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της, επομένως οι τιμές της ενεργειακής παραγωγής και όλων των υπόλοιπων μεγεθών, ως ανάλογα με αυτή, παρουσιάζουν επίσης μέγιστο. Κατ' επέκταση, η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης γίνεται βάση τη μέγιστη παραγωγή που αυτή μπορεί να αποδώσει, και οι τιμές όλων των υπολοίπων μηνών μπορούν να εκφραστούν ως ποσοστά επί της μέγιστης. Η επιλογή του προσανατολισμού του πεδίου συλλεκτών κατά τον άξονα Βορρά-Νότου έχει επίσης σαφή επίδραση στο ύψος των τιμών της μέγιστης ακτινοβολίας. Ένας τέτοιος προσανατολισμός επιτρέπει τη μεγαλύτερη αξιοποίηση της άμεσης ακτινοβολίας κατά τους θερινούς μήνες, καθώς το συνημίτονο πρόσπτωσης $\cos\theta_i$ παρουσιάζει τιμές κοντά στη μονάδα κατά τη θερινή περίοδο. Μία διάταξη συλλεκτών προσανατολισμένη κατά τον άξονα Ανατολής-Δύσης έχει μεγαλύτερη απόδοση κατά τη χειμερινή περίοδο, ωστόσο οι μέσες τιμές ακτινοβολίας έχουν χαμηλότερες τιμές το χειμώνα, επομένως και το συνολικό όφελος από έναν τέτοιο προσανατολισμό θα ήταν μικρότερο.

Σε ότι αφορά στην ενεργειακή παραγωγή, αυτή φθάνει στη μέγιστη τιμή της κατά τον Ιούλιο, με τη μέση μηνιαία τιμή να αγγίζει τις 23.090MWh. Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας από το

πεδίο συλλεκτών φθάνει τις 150.580MWh. Τον Ιούλιο, η ενεργειακή παραγωγή από το πεδίο συλλεκτών επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε θερμότητα επί 22,44 ώρες ημερησίως, ή διαφορετικά οι ενεργειακές απαιτήσεις της λειτουργίας του ατμοστροβίλου καλύπτονται σε ποσοστό 93,5% από το πεδίο συλλεκτών. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας από το πεδίο συλλεκτών επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης του ατμοστροβίλου σε ποσοστό 51,79%. Με άλλα λόγια, περισσότερη από τη μισή ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του ατμοστροβίλου, σε ετήσια βάση, δύναται να δοθεί από ΑΠΕ μέσω του πεδίου συλλεκτών. Επιπλέον, η παροχή θερμότητας στον ΑΗΣ από το πεδίο συλλεκτών ξεπερνά αυτό το ποσοστό 6 μήνες το χρόνο (Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο), με το μέγιστο ποσοστό τον Ιούλιο να αγγίζει, όπως αναφέρθηκε, το 93,5%.

Η παραγωγή ενέργειας από το πεδίο συλλεκτών και η παροχή θερμότητας στον ατμοστροβίλο της Σορώνης Ρόδου έχει φυσικά ως αποτέλεσμα τη σημαντική εκτόπιση καυσίμου που απαιτείται για τη λειτουργία του. Η μηνιαία εκτόπιση είναι ανάλογη της παραγόμενης, από το πεδίο συλλεκτών, ενέργειας και η συνολική ετήσια τιμή της φθάνει τους 13.550 τόνους. Αυτή η τιμή, με τις σημερινές τιμές διωλιστηρίου για το μαζούτ χαμηλού θείου που χρησιμοποιείται στο λέβητα του ατμοστροβίλου, αντιστοιχεί σε ετήσια εξοικονόμηση κόστους καυσίμου κατά 8.098.000 €, μειώνοντας σημαντικά το κόστος λειτουργίας της μονάδας.

Αντίστοιχη είναι και η μείωση της εκπομπής ρύπων που επιτυγχάνεται από την ενσωμάτωση του πεδίου ηλιακών συλλεκτών στον ΑΗΣ Σορώνης, μέσω της μείωσης του καταναλισκόμενου καυσίμου. Η ετήσια μείωση ρύπων αντιστοιχεί σε 45.410 τόνους CO₂, 739 τόνους SO₂, 85,65 τόνους NO_x, 48,25 τόνους σωματιδίων και 8,13 τόνους CO. Οι μέγιστες τιμές εξοικονόμησης ρύπων εμφανίζονται, όπως αναμενόταν, κατά τη θερινή περίοδο.

4.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] "Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για το έτος 2011", ΔΕΗ Α.Ε., Διαχειριστής Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών.
- [2] www.ecorodos.gr
- [3] Ευγενία-Ευαγγελία Καλοπέτρη. Διπλωματική Εργασία "Ενεργειακή Οικονομία της νήσου Ρόδου". Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2007.
- [4] Ειρήνη Δ. Γαϊτάνου. Διπλωματική Εργασία "Μοντελοποίηση και Ανάλυση λειτουργίας αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος Νήσου Ρόδου". Ε.Μ.Π. Τμήμα ΗΜΜΥ, 2007.
- [5] "Απόσπασμα Πρακτικών της 15ης/28.4.2011 Συνεδρίασης Δ.Σ.", ΔΕΗ Α.Ε.
- [6] Γ. Κυραναστάσης. "Σημειώσεις Βιομηχανικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας". Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής, Τ.Ε.Ι Καβάλας, 2001.
- [7] Λούβρου Σοφία-Άννα. Διπλωματική Εργασία "Υπολογιστική μοντελοποίηση δράσεων για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης πετρελαϊκών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στο διασυνδεδεμένο σύστημα και στην Κρήτη". Ε.Μ.Π. Τμήμα Μηχ/Μηχ, 2009.
- [8] Yunus A. Cengel, Michael A.Boles. «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», Τόμος Β, 3η Έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [9] "Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών". Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Α' Έκδοση, Ιούνιος 2010.
- [10] Flabeg. "Parabolic Mirrors for Concentrating Solar Power (CSP)". Product Information.
- [11] Schott Solar. "Schott PTR®70 Receiver". Product Information.

- [12] M.J. Montes et al. "Performance analysis of an Integrated Solar Combined Cycle using Direct Steam Generation in parabolic trough collectors". Applied Energy 88 (2011) 3228–3238.
- [13] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana Lazaro, Pablo Dolado, Belen Zalba, Luisa F. Cabeza. "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation". Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010).
- [14] Ulf Herrmann, Bruce Kelly, Henry Price. "Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants". Energy 29 (2004) 883–893
- [15] B. Kelly, D. Kearney. "Thermal Storage Commercial Plant Design Study for a 2-Tank Indirect Molten Salt System". Final Report May 13 2002 – December 31 2004. Subcontract Report NREL/SR 550-40166, July 2006
- [16] D. Kearney et al. "ASSESSMENT OF A MOLTEN SALT HEAT TRANSFER FLUID IN A PARABOLIC TROUGH SOLAR FIELD". Submission to JSEE April 2002
- [17] Solar Advisor Model v.2.5, Draft CSP Reference Manual, NREL, 2008.
- [18] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. "Οδηγός Εξοικονόμησης Ενέργειας με Συστήματα Ανάκτησης Θερμότητας".
- [19] "Therminol®XP, Heat Transfer Fluid by Mosanto". Φυλλάδιο κατασκευαστή.
- [20] W.B.Stine, R.W.Harrigan. "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986. Revised and updated version by William Stine and Michael Geyer. Found in <http://www.powerfromthesun.net/>
- [21] "Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών". Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Α' Έκδοση, Ιούνιος 2010.
- [22] Αθ. Κόκκαλης, Ν. Παπαγεωργίου. "Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Μέτρα Αντιμετώπισης της Αστικής Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (κυκλοφορία, καύσιμα κλπ)". HELECO 2011- Προσυνεδριακή Ημερίδα, Λάρισα 4 Ιουνίου 2010.
- [23] Στοιχεία και διαγράμματα λειτουργίας ΑΗΣ Σορώνης Ρόδου από τηλεφωνική και ηλεκτρονική επικοινωνία με τον κ. Σπύρο Πλατή, Δ/ντή του ΚΜΕΕΕ Χανίων - Λινοπεραμάτων - Ρόδου, και την κα. Φιλιώ Μπέρδη, Τομέαρχη Λειτουργίας ΑΗΣ Ρόδου.
-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Ο Ήλιος είναι μία αστείρευτη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας έχει βρει πολλές εφαρμογές, που κινούνται από την παθητική θέρμανση χώρων, μέχρι την ηλεκτροπαραγωγή, την ενεργή θέρμανση και την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Ωστόσο, η διείσδυση της ηλιακής ενέργειας ως αξιόπιστης και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Κυριότερη αιτία γι' αυτό είναι η ίδια η φύση της ηλιακής ενέργειας, ως διαλείπουσας μορφής ενέργειας που εμπεριέχει σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας όσον αφορά στην ποσότητα και διαθεσιμότητά της. Σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά και υγρά καύσιμα, ή ακόμη και άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, όπως η γεωθερμική, η ποσότητα και διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας δε μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη βεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή δεν οφείλεται στην πηγή της, τον Ήλιο, ο οποίος την παρέχει με σταθερό και προβλέψιμο ρυθμό, αλλά στις παρεμβολές της γήινης ατμόσφαιρας, και τις κλιματικές διακυμάνσεις κάθε περιοχής. Είναι σαφές ότι μία επένδυση με σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας είναι μία επένδυση υψηλού ρίσκου. Πολλώ δε μάλλον μία επένδυση εντάσεως κεφαλαίου, όπως είναι η κατασκευή μίας μεγάλης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Μία επένδυση υψηλού ρίσκου, χωρίς προσδοκώμενα οφέλη, που να εξισορροπούν το ρίσκο είναι μία επένδυση που δε βρίσκει επενδυτές.

Ένας αξιόπιστος τρόπος για να αυξηθεί η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι να αυξηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί. Όχι βεβαίως άμεσα, καθώς δε μπορούμε να παρέμβουμε στη διάρκεια της ημέρας, αλλά έμμεσα, με την αποθήκευσή της σε κάποια κατάλληλη μορφή και την αξιοποίησή της όταν ζητηθεί. Οι μορφές ενέργειας στις οποίες μπορεί να αποθηκευθεί, όπως η αισθητή, η λανθάνουσα και η χημική είναι προβλέψιμες και διαθέσιμες.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της μελέτης, η ενσωμάτωση ενός συστήματος συλλεκτών παραβολικής σκάφης, που θα συγκέντρωνε την ηλιακή ακτινοβολία και θα λειτουργούσε ως πηγή θερμότητας στον ατμοστρόβιλο του σταθμού Σορώνης Ρόδου, θα είχε πολλαπλά **οφέλη**:

- **Ευελιξία στην παραγωγή ενέργειας:** Ένα τέτοιο σύστημα που θα λειτουργούσε με αποκλειστικά ηλιακή ενέργεια, έχει ένα συνολικό capacity factor περίπου 25%. Ωστόσο, η αρχική υπερδιαστασιολόγησή του ως προς τις απαιτήσεις της ζήτησης και η προσθήκη ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, όχι μόνο αυξάνει το χρόνο λειτουργίας του, αλλά και προσδίδει μεγάλη ευελιξία στο σύστημα, το οποίο δεν εξαρτάται αποκλειστικά πλέον από την ηλιοφάνεια για τη λειτουργία του. Με την προσθήκη ενός τέτοιου υποσυστήματος αποθήκευσης, η μέση παροχή θερμότητας κατά τους θερινούς μήνες καλύπτει τις απαιτήσεις του ατμοστρόβιλου για 20 και πλέον ώρες ημερησίως, ενώ τον Ιούλιο ξεπερνά τις 22 ώρες. Στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής, η ζήτηση είναι σταθερή, εφόσον ο ατμοστρόβιλος έχει δεδομένη ισχύ και λειτουργεί ως μονάδα βάσης του Θερμοηλεκτρικού Σταθμού. Η προσθήκη, ωστόσο, ενός συστήματος αποθήκευσης στην εγκατάσταση προσδίδει επιπλέον ευελιξία στο χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής στην περίπτωση που η ζήτηση είναι κυμαινόμενη, ή υπάρχει επιπλέον οικονομικό κίνητρο ή επιδότηση στην ηλεκτροπαραγωγή κάποιας συγκεκριμένης περιόδου της ημέρας.
- **Περιβαλλοντικά οφέλη:** Ένα επιπλέον όφελος που προκύπτει από την ενσωμάτωση των συλλεκτών στον ΑΗΣ είναι το περιβαλλοντικό. Η ποσότητα καυσίμου που εκτοπίζεται και αντικαθίσταται από ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι ιδιαίτερα μεγάλη, με φυσικό επακόλουθο τη μεγάλη μείωση των εκπομπών ρύπων από τη λειτουργία του ατμοστρόβιλου.

Ως προς τις ρυπογόνες ουσίες κατά την καύση του μαζούτ, η μέση ετήσια εξοικονόμηση αγγίζει τους 45.410 τόνους CO₂, 739 τόνους SO₂, 85,65 τόνους NO_x, 48,25 τόνους σωματιδίων και 8,13 τόνους CO, με ευεργετικές επιπτώσεις για το περιβάλλον και την περιοχή της Σορώνης.

- **Οικονομικά οφέλη:** Το τρίτο όφελος που προκύπτει από την ενσωμάτωση των συλλεκτών στη λειτουργία του σταθμού είναι, βεβαίως, το οικονομικό. Η εγκατάσταση έχει ένα αρκετά σημαντικό κόστος επένδυσης, που εδώ εκτιμήθηκε στα 30.313 χιλ. ευρώ. Ταυτόχρονα, όμως, η εξοικονόμηση κόστους καυσίμου που επιτυγχάνεται είναι πολύ σημαντική, με τη μέση ετήσια τιμή της να φθάνει τις 8.098 χιλ. ευρώ. Προκύπτει ότι, ακόμα και χωρίς να συνοπολογίσει κανείς τη μελλοντική (και πιθανότατα αυξητική) πορεία της τιμής του αργού πετρελαίου, με τις τωρινές τιμές η απόσβεση του κόστους επένδυσης ολοκληρώνεται σε λιγότερο από 4 χρόνια. Έτσι λοιπόν, ένα καλά μελετημένο επενδυτικό πλάνο, με τμηματική καταβολή του κόστους κεφαλαίου, είναι δυνατόν να αποδώσει καρπούς από την έναρξη κιάλας της λειτουργίας της εγκατάστασης.

Φυσικά, η μελέτη αυτή δεν είναι οριστική. Αποτελεί, ωστόσο, μία πρώτη προσέγγιση της πραγματικότητας, και μία ρεαλιστική βάση για την εκπόνηση πιο λεπτομερών και ενδεδειγμένων μελετών. Η κύρια πηγή αβεβαιότητας κατά τη σύνταξη της παρούσας εργασίας ήταν, βεβαίως, η διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Δυστυχώς, για την περιοχή της Ρόδου δεν υπάρχουν στοιχεία στη μορφή Τυπικών Μετεωρολογικών Ετών. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν μέσες μηνιαίες τιμές ακτινοβολίας και ενέργειας, οι οποίες εισήχθησαν σε ευρέως εφαρμοσμένες εξισώσεις για την παραγωγή των ημερήσιων και ωριαίων τιμών. Η προσέγγιση αυτή δεν οδηγεί σε σημαντική απομάκρυνση από την προσδοκώμενη τιμή της ακτινοβολίας ή από τις τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος. Επιηρεάζει, ωστόσο, τον ακριβή χρονοπρογραμματισμό της εγκατάστασης, και βέβαια το μέγεθος της απαιτούμενης αποθήκευσης. Μία περιοχή με μακρές περιόδους έντονης ηλιοφάνειας, ακολουθούμενες από παρατεταμένη συννεφιά έχει την ίδια μέση τιμή ακτινοβολίας με μία περιοχή σταθερής, αλλά χαμηλότερης τιμής ημερήσιας ακτινοβολίας, αλλά οι ανάγκες σε αποθηκευμένη ενέργεια των δύο περιοχών διαφέρουν σημαντικά.

Καταλήγοντας, η τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας για χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή είναι μία πολλά υποσχόμενη και εξελίξιμη τεχνολογία. Ακόμα και για τον ελληνικό χώρο ο οποίος, αν και διαθέτει σχετικά υψηλές τιμές ολικής ακτινοβολίας, διακρίνεται από επίσης υψηλές τιμές διάχυτης ακτινοβολίας, η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σε έναν Θερμοηλεκτρικό Σταθμό που χρησιμοποιεί συμβατικά καύσιμα, και η υβριδοποίηση της λειτουργίας του, μπορεί να δώσει σημαντικά και πολλαπλά οφέλη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1: Μέση Μηνιαία και Ετήσια Ολική Ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m².mo)] (Πηγή: «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών». Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Α' Έκδοση, Ιούνιος 2010)

Περιοχή/Μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Συνολική Ετήσια
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7	1636,5
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4	1613,1
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1	1624,1
Αγχίαλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5	1572,4
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7	1506,3
Αλίαρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0	1609
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1	1701,4
Άραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6	1625,5
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2	1704,7
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1	1677
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2	1616,9
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2	1722,6
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5	1466,1
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0	1780
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1	1476,3
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3	1674,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7	1491,6
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7	1592
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0	1517
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0	1521
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2	1667,9
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0	1709
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1	1566,7
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8	1554,2
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0	1584,2
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0	1668
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0	1690
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0	1625
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6	1679,8
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0	1699
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0	1607
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3	1684,5
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0	1687
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2	1718,9
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5	1729,4
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7	1481,9
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9	1733,6
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7	1578,2
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3	1729,1
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	109,0	74,0	57,0	1691
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2	1604,1
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1	1489,8
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7	1786,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0	1704
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0	1664
Χρυσούπολη (Καβάλα)	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3	1519,6

Πίνακας Π2: Σύγκριση Μηνιαίων Μέσων Ημερήσιων Δεικτών Διάχυσης \bar{K}_d κατά Lalas et al. και κατά Erbs et al για την περιοχή της Ρόδου.

Μήνας	Μέση Ημέρα	Γωνία δύσης Ηλίου ω_s (rad)	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας \bar{K}_T	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Διάχυσης \bar{K}_d (κατά Lalas et al. ^[11])	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Διάχυσης \bar{K}_d (κατά Erbs et al. ^[10])	Διαφορά
ΙΑΝ	16	1,2824	0,465	0,60	0,427	0,17
ΦΕΒ	14	1,3912	0,490	0,56	0,401	0,16
ΜΑΡ	16	1,5397	0,5236	0,51	0,407	0,10
ΑΠΡ	15	1,6934	0,5539	0,46	0,379	0,08
ΜΑΙ	16	1,8279	0,5908	0,41	0,346	0,06
ΙΟΥΝ	15	1,8941	0,6265	0,35	0,315	0,04
ΙΟΥΛ	16	1,8632	0,6428	0,33	0,301	0,03
ΑΥΓ	16	1,7481	0,6404	0,33	0,303	0,03
ΣΕΠ	15	1,5993	0,6119	0,37	0,328	0,05
ΟΚΤ	16	1,4409	0,5757	0,43	0,360	0,07
ΝΟΕ	15	1,3119	0,513	0,53	0,379	0,15
ΔΕΚ	16	1,2465	0,445	0,63	0,448	0,18

Τα σημαντικά ψηφία των αποτελεσμάτων προκύπτουν από τον όρο με τα λιγότερα σημαντικά ψηφία

$\bar{K}_d = 1,31 - 1,53\bar{K}_T$	<p>Για $\omega_s \leq 1,4208$</p> $K_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3$ <p>Για $\omega_s > 1,4208$</p> $K_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3$
------------------------------------	---

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΦΥΛΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Πίνακας Π3: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Ιανουαρίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
1	1-Ιαν	-23,01	-0,401628827	71,75	1,25231296	16042211,65	4,456
2	2-Ιαν	-22,93	-0,400213485	71,83	1,253608832	16096012,24	4,471
3	3-Ιαν	-22,84	-0,398679551	71,91	1,255010912	16154200,81	4,487
4	4-Ιαν	-22,75	-0,39702748	71,99	1,256518234	16216761,54	4,505
5	5-Ιαν	-22,65	-0,395257761	72,09	1,258129765	16283677,19	4,523
6	6-Ιαν	-22,54	-0,393370919	72,18	1,259844408	16354929,07	4,543
7	7-Ιαν	-22,42	-0,391367512	72,29	1,26166101	16430497,06	4,564
8	8-Ιαν	-22,30	-0,389248135	72,40	1,26357836	16510359,51	4,586
9	9-Ιαν	-22,17	-0,387013415	72,51	1,265595191	16594493,32	4,610
10	10-Ιαν	-22,04	-0,384664014	72,63	1,267710187	16682873,84	4,634
11	11-Ιαν	-21,90	-0,38220063	72,76	1,269921983	16775474,85	4,660
12	12-Ιαν	-21,75	-0,379623991	72,89	1,272229166	16872268,61	4,687
13	13-Ιαν	-21,60	-0,376934861	73,03	1,274630282	16973225,75	4,715
14	14-Ιαν	-21,44	-0,374134038	73,17	1,277123839	17078315,29	4,744
15	15-Ιαν	-21,27	-0,37122235	73,32	1,279708306	17187504,64	4,774
16	16-Ιαν	-21,10	-0,368200661	73,48	1,282382118	17300759,53	4,806
17	17-Ιαν	-20,92	-0,365069866	73,63	1,28514368	17418044,04	4,838
18	18-Ιαν	-20,73	-0,361830894	73,80	1,28799137	17539320,54	4,872
19	19-Ιαν	-20,54	-0,358484703	73,96	1,290923539	17664549,71	4,907
20	20-Ιαν	-20,34	-0,355032285	74,14	1,293938519	17793690,51	4,943
21	21-Ιαν	-20,14	-0,351474663	74,31	1,297034621	17926700,16	4,980
22	22-Ιαν	-19,93	-0,347812892	74,50	1,300210139	18063534,14	5,018
23	23-Ιαν	-19,71	-0,344048057	74,68	1,303463357	18204146,18	5,057
24	24-Ιαν	-19,49	-0,340181273	74,87	1,306792543	18348488,25	5,097
25	25-Ιαν	-19,26	-0,336213685	75,07	1,310195962	18496510,54	5,138
26	26-Ιαν	-19,03	-0,33214647	75,27	1,313671871	18648161,48	5,180
27	27-Ιαν	-18,79	-0,327980833	75,47	1,317218523	18803387,74	5,223
28	28-Ιαν	-18,55	-0,323718009	75,68	1,320834172	18962134,21	5,267
29	29-Ιαν	-18,30	-0,319359259	75,89	1,324517071	19124344,03	5,312
30	30-Ιαν	-18,04	-0,314905877	76,10	1,32826548	19289958,57	5,358
31	31-Ιαν	-17,78	-0,310359181	76,32	1,332077662	19458917,47	5,405
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π4: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Φεβρουαρίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
32	1-Φεβ	-17,52	-0,305720519	76,54	1,335951889	19631158,62	5,453
33	2-Φεβ	-17,25	-0,300991266	76,77	1,339886441	19806618,2	5,502
34	3-Φεβ	-16,97	-0,296172822	77,00	1,343879611	19985230,69	5,551
35	4-Φεβ	-16,69	-0,291266616	77,23	1,347929703	20166928,9	5,602
36	5-Φεβ	-16,40	-0,286274101	77,47	1,352035037	20351643,97	5,653
37	6-Φεβ	-16,11	-0,281196757	77,70	1,356193948	20539305,42	5,705
38	7-Φεβ	-15,82	-0,276036088	77,95	1,360404787	20729841,17	5,758
39	8-Φεβ	-15,52	-0,270793624	78,19	1,364665926	20923177,59	5,812
40	9-Φεβ	-15,21	-0,265470918	78,44	1,368975753	21119239,48	5,866
41	10-Φεβ	-14,90	-0,260069548	78,69	1,373332679	21317950,2	5,922
42	11-Φεβ	-14,59	-0,254591113	78,94	1,377735135	21519231,63	5,978
43	12-Φεβ	-14,27	-0,249037237	79,19	1,382181573	21723004,24	6,034
44	13-Φεβ	-13,95	-0,243409566	79,45	1,38667047	21929187,16	6,091
45	14-Φεβ	-13,62	-0,237709767	79,71	1,391200323	22137698,2	6,149
46	15-Φεβ	-13,29	-0,23193953	79,97	1,395769656	22348453,9	6,208
47	16-Φεβ	-12,95	-0,226100565	80,24	1,400377014	22561369,63	6,267
48	17-Φεβ	-12,62	-0,2201946	80,50	1,405020969	22776359,57	6,327
49	18-Φεβ	-12,27	-0,214223388	80,77	1,409700114	22993336,86	6,387
50	19-Φεβ	-11,93	-0,208188696	81,04	1,41441307	23212213,57	6,448
51	20-Φεβ	-11,58	-0,202092314	81,31	1,419158482	23432900,85	6,509
52	21-Φεβ	-11,23	-0,195936047	81,59	1,423935017	23655308,92	6,571
53	22-Φεβ	-10,87	-0,18972172	81,86	1,428741369	23879347,19	6,633
54	23-Φεβ	-10,51	-0,183451175	82,14	1,433576256	24104924,31	6,696
55	24-Φεβ	-10,15	-0,177126269	82,42	1,438438419	24331948,23	6,759
56	25-Φεβ	-9,78	-0,170748877	82,70	1,443326623	24560326,31	6,822
57	26-Φεβ	-9,41	-0,164320888	82,98	1,448239656	24789965,34	6,886
58	27-Φεβ	-9,04	-0,157844207	83,26	1,453176329	25020771,67	6,950
59	28-Φεβ	-8,67	-0,151320754	83,55	1,458135476	25252651,25	7,015
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π15: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Μαρτίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
60	1-Μαρ	-8,29	-0,144752461	83,83	1,463115952	25485509,71	7,079
61	2-Μαρ	-7,91	-0,138141274	84,12	1,468116634	25719252,47	7,144
62	3-Μαρ	-7,53	-0,131489154	84,40	1,473136416	25953784,76	7,209
63	4-Μαρ	-7,15	-0,12479807	84,69	1,478174217	26189011,77	7,275
64	5-Μαρ	-6,76	-0,118070006	84,98	1,483228972	26424838,67	7,340
65	6-Μαρ	-6,38	-0,111306956	85,27	1,488299633	26661170,73	7,406
66	7-Μαρ	-5,99	-0,104510922	85,56	1,493385173	26897913,38	7,472
67	8-Μαρ	-5,60	-0,09768392	85,86	1,498484577	27134972,28	7,537
68	9-Μαρ	-5,20	-0,090827972	86,15	1,503596851	27372253,43	7,603
69	10-Μαρ	-4,81	-0,08394511	86,44	1,50872101	27609663,22	7,669
70	11-Μαρ	-4,41	-0,077037373	86,74	1,513856087	27847108,53	7,735
71	12-Μαρ	-4,02	-0,070106808	87,03	1,519001127	28084496,8	7,801
72	13-Μαρ	-3,62	-0,063155469	87,33	1,524155185	28321736,08	7,867
73	14-Μαρ	-3,22	-0,056185416	87,62	1,529317329	28558735,17	7,933
74	15-Μαρ	-2,82	-0,049198714	87,92	1,534486635	28795403,61	7,999
75	16-Μαρ	-2,42	-0,042197433	88,22	1,539662188	29031651,82	8,064
76	17-Μαρ	-2,02	-0,035183648	88,51	1,544843082	29267391,16	8,130
77	18-Μαρ	-1,61	-0,028159437	88,81	1,550028417	29502533,95	8,195
78	19-Μαρ	-1,21	-0,021126882	89,11	1,555217298	29736993,62	8,260
79	20-Μαρ	-0,81	-0,014088067	89,40	1,560408834	29970684,7	8,325
80	21-Μαρ	-0,40	-0,007045077	89,70	1,565602138	30203522,93	8,390
81	22-Μαρ	0,00	-1,00286E-16	90,00	1,570796327	30435425,29	8,454
82	23-Μαρ	0,40	0,007045077	90,30	1,575990515	30666310,1	8,518
83	24-Μαρ	0,81	0,014088067	90,60	1,58118382	30896097,03	8,582
84	25-Μαρ	1,21	0,021126882	90,89	1,586375356	31124707,19	8,646
85	26-Μαρ	1,61	0,028159437	91,19	1,591564237	31352063,17	8,709
86	27-Μαρ	2,02	0,035183648	91,49	1,596749571	31578089,07	8,772
87	28-Μαρ	2,42	0,042197433	91,78	1,601930466	31802710,6	8,834
88	29-Μαρ	2,82	0,049198714	92,08	1,607106019	32025855,05	8,896
89	30-Μαρ	3,22	0,056185416	92,38	1,612275325	32247451,39	8,958
90	31-Μαρ	3,62	0,063155469	92,67	1,617437468	32467430,28	9,019
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π6: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Απριλίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
91	1-Απρ	4,02	0,070106808	92,97	1,622591526	32685724,1	9,079
92	2-Απρ	4,41	0,077037373	93,26	1,627736566	32902267,01	9,140
93	3-Απρ	4,81	0,08394511	93,56	1,632871644	33116994,94	9,199
94	4-Απρ	5,20	0,090827972	93,85	1,637995803	33329845,65	9,258
95	5-Απρ	5,60	0,09768392	94,14	1,643108076	33540758,72	9,317
96	6-Απρ	5,99	0,104510922	94,44	1,648207481	33749675,6	9,375
97	7-Απρ	6,38	0,111306956	94,73	1,65329302	33956539,61	9,432
98	8-Απρ	6,76	0,118070006	95,02	1,658363682	34161295,92	9,489
99	9-Απρ	7,15	0,12479807	95,31	1,663418436	34363891,64	9,546
100	10-Απρ	7,53	0,131489154	95,60	1,668456237	34564275,74	9,601
101	11-Απρ	7,91	0,138141274	95,88	1,67347602	34762399,11	9,656
102	12-Απρ	8,29	0,144752461	96,17	1,678476701	34958214,51	9,711
103	13-Απρ	8,67	0,151320754	96,45	1,683457177	35151676,64	9,764
104	14-Απρ	9,04	0,157844207	96,74	1,688416325	35342742,05	9,817
105	15-Απρ	9,41	0,164320888	97,02	1,693352998	35531369,18	9,870
106	16-Απρ	9,78	0,170748877	97,30	1,698266031	35717518,35	9,922
107	17-Απρ	10,15	0,177126269	97,58	1,703154235	35901151,71	9,973
108	18-Απρ	10,51	0,183451175	97,86	1,708016397	36082233,26	10,023
109	19-Απρ	10,87	0,18972172	98,14	1,712851284	36260728,81	10,072
110	20-Απρ	11,23	0,195936047	98,41	1,717657637	36436605,95	10,121
111	21-Απρ	11,58	0,202092314	98,69	1,722434172	36609834,03	10,169
112	22-Απρ	11,93	0,208188696	98,96	1,727179583	36780384,16	10,217
113	23-Απρ	12,27	0,214223388	99,23	1,731892539	36948229,14	10,263
114	24-Απρ	12,62	0,2201946	99,50	1,736571685	37113343,44	10,309
115	25-Απρ	12,95	0,226100565	99,76	1,741215639	37275703,16	10,354
116	26-Απρ	13,29	0,23193953	100,03	1,745822998	37435286,03	10,399
117	27-Απρ	13,62	0,237709767	100,29	1,75039233	37592071,31	10,442
118	28-Απρ	13,95	0,243409566	100,55	1,754922184	37746039,81	10,485
119	29-Απρ	14,27	0,249037237	100,81	1,75941108	37897173,81	10,527
120	30-Απρ	14,59	0,254591113	101,06	1,763857519	38045457,03	10,568
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π7: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Μαΐου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
121	1-Μαΐ	14,90	0,260069548	101,31	1,768259974	38190874,58	10,609
122	2-Μαΐ	15,21	0,265470918	101,56	1,7726169	38333412,94	10,648
123	3-Μαΐ	15,52	0,270793624	101,81	1,776926728	38473059,86	10,687
124	4-Μαΐ	15,82	0,276036088	102,05	1,781187866	38609804,38	10,725
125	5-Μαΐ	16,11	0,281196757	102,30	1,785398706	38743636,74	10,762
126	6-Μαΐ	16,40	0,286274101	102,53	1,789557616	38874548,32	10,798
127	7-Μαΐ	16,69	0,291266616	102,77	1,79366295	39002531,64	10,834
128	8-Μαΐ	16,97	0,296172822	103,00	1,797713043	39127580,26	10,869
129	9-Μαΐ	17,25	0,300991266	103,23	1,801706212	39249688,77	10,903
130	10-Μαΐ	17,52	0,305720519	103,46	1,805640765	39368852,71	10,936
131	11-Μαΐ	17,78	0,310359181	103,68	1,809514991	39485068,55	10,968
132	12-Μαΐ	18,04	0,314905877	103,90	1,813327173	39598333,61	11,000
133	13-Μαΐ	18,30	0,319359259	104,11	1,817075582	39708646,02	11,030
134	14-Μαΐ	18,55	0,323718009	104,32	1,820758482	39816004,71	11,060
135	15-Μαΐ	18,79	0,327980833	104,53	1,824374131	39920409,29	11,089
136	16-Μαΐ	19,03	0,33214647	104,73	1,827920783	40021860,08	11,117
137	17-Μαΐ	19,26	0,336213685	104,93	1,831396691	40120358	11,145
138	18-Μαΐ	19,49	0,340181273	105,13	1,83480011	40215904,56	11,171
139	19-Μαΐ	19,71	0,344048057	105,32	1,838129297	40308501,79	11,197
140	20-Μαΐ	19,93	0,347812892	105,50	1,841382514	40398152,24	11,222
141	21-Μαΐ	20,14	0,351474663	105,69	1,844558033	40484858,89	11,246
142	22-Μαΐ	20,34	0,355032285	105,86	1,847654135	40568625,12	11,269
143	23-Μαΐ	20,54	0,358484703	106,04	1,850669114	40649454,69	11,292
144	24-Μαΐ	20,73	0,361830894	106,20	1,853601284	40727351,68	11,313
145	25-Μαΐ	20,92	0,365069866	106,37	1,856448974	40802320,47	11,334
146	26-Μαΐ	21,10	0,368200661	106,52	1,859210536	40874365,66	11,354
147	27-Μαΐ	21,27	0,37122235	106,68	1,861884348	40943492,1	11,373
148	28-Μαΐ	21,44	0,374134038	106,83	1,864468814	41009704,8	11,392
149	29-Μαΐ	21,60	0,376934861	106,97	1,866962371	41073008,94	11,409
150	30-Μαΐ	21,75	0,379623991	107,11	1,869363488	41133409,79	11,426
151	31-Μαΐ	21,90	0,38220063	107,24	1,871670671	41190912,74	11,442
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π8: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Ιουνίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
152	1-Ιουν	22,04	0,384664014	107,37	1,873882466	41245523,21	11,457
153	2-Ιουν	22,17	0,387013415	107,49	1,875997462	41297246,68	11,471
154	3-Ιουν	22,30	0,389248135	107,60	1,878014294	41346088,6	11,485
155	4-Ιουν	22,42	0,391367512	107,71	1,879931643	41392054,44	11,498
156	5-Ιουν	22,54	0,393370919	107,82	1,881748246	41435149,61	11,510
157	6-Ιουν	22,65	0,395257761	107,91	1,883462889	41475379,47	11,521
158	7-Ιουν	22,75	0,39702748	108,01	1,885074419	41512749,27	11,531
159	8-Ιουν	22,84	0,398679551	108,09	1,886581741	41547264,2	11,541
160	9-Ιουν	22,93	0,400213485	108,17	1,887983822	41578929,3	11,550
161	10-Ιουν	23,01	0,401628827	108,25	1,889279693	41607749,49	11,558
162	11-Ιουν	23,09	0,402925158	108,32	1,890468454	41633729,54	11,565
163	12-Ιουν	23,15	0,404102093	108,38	1,89154927	41656874,04	11,571
164	13-Ιουν	23,21	0,405159284	108,43	1,892521381	41677187,42	11,577
165	14-Ιουν	23,27	0,406096418	108,48	1,893384098	41694673,93	11,582
166	15-Ιουν	23,31	0,406913216	108,53	1,894136805	41709337,6	11,586
167	16-Ιουν	23,35	0,407609438	108,56	1,894778965	41721182,26	11,589
168	17-Ιουν	23,39	0,408184875	108,59	1,895310117	41730211,53	11,592
169	18-Ιουν	23,41	0,408639359	108,62	1,895729877	41736428,81	11,593
170	19-Ιουν	23,43	0,408972754	108,63	1,896037943	41739837,26	11,594
171	20-Ιουν	23,44	0,409184962	108,65	1,896234091	41740439,81	11,595
172	21-Ιουν	23,45	0,40927592	108,65	1,89631818	41738239,16	11,594
173	22-Ιουν	23,45	0,4092456	108,65	1,896290149	41733237,75	11,593
174	23-Ιουν	23,44	0,409094011	108,64	1,896150017	41725437,79	11,590
175	24-Ιουν	23,42	0,4088212	108,63	1,895897887	41714841,24	11,587
176	25-Ιουν	23,40	0,408427246	108,61	1,895533941	41701449,83	11,584
177	26-Ιουν	23,37	0,407912266	108,58	1,895058443	41685265,03	11,579
178	27-Ιουν	23,34	0,407276413	108,55	1,894471734	41666288,07	11,574
179	28-Ιουν	23,29	0,406519875	108,51	1,893774238	41644519,94	11,568
180	29-Ιουν	23,24	0,405642876	108,46	1,892966454	41619961,4	11,561
181	30-Ιουν	23,18	0,404645677	108,41	1,892048959	41592612,97	11,554
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π9: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Ιουλίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
182	1-Ιουλ	23,12	0,403528572	108,35	1,891022404	41562474,96	11,545
183	2-Ιουλ	23,05	0,402291894	108,28	1,889887516	41529547,46	11,536
184	3-Ιουλ	22,97	0,400936007	108,21	1,888645092	41493830,33	11,526
185	4-Ιουλ	22,89	0,399461315	108,13	1,887295999	41455323,26	11,515
186	5-Ιουλ	22,80	0,397868253	108,05	1,885841172	41414025,72	11,504
187	6-Ιουλ	22,70	0,396157295	107,96	1,884281613	41369937,02	11,492
188	7-Ιουλ	22,59	0,394328946	107,87	1,882618386	41323056,32	11,479
189	8-Ιουλ	22,48	0,39238375	107,76	1,880852615	41273382,59	11,465
190	9-Ιουλ	22,36	0,390322281	107,66	1,878985484	41220914,7	11,450
191	10-Ιουλ	22,24	0,388145152	107,55	1,877018232	41165651,38	11,435
192	11-Ιουλ	22,11	0,385853007	107,43	1,874952151	41107591,27	11,419
193	12-Ιουλ	21,97	0,383446525	107,30	1,872788581	41046732,93	11,402
194	13-Ιουλ	21,83	0,38092642	107,17	1,870528913	40983074,85	11,384
195	14-Ιουλ	21,67	0,378293438	107,04	1,868174579	40916615,5	11,366
196	15-Ιουλ	21,52	0,37554836	106,90	1,865727053	40847353,3	11,346
197	16-Ιουλ	21,35	0,372691999	106,75	1,863187848	40775286,73	11,326
198	17-Ιουλ	21,18	0,3697252	106,60	1,860558511	40700414,27	11,306
199	18-Ιουλ	21,01	0,366648845	106,45	1,857840623	40622734,47	11,284
200	19-Ιουλ	20,82	0,363463843	106,29	1,855035792	40542245,99	11,262
201	20-Ιουλ	20,64	0,360171139	106,12	1,852145655	40458947,61	11,239
202	21-Ιουλ	20,44	0,356771709	105,95	1,849171871	40372838,27	11,215
203	22-Ιουλ	20,24	0,35326656	105,77	1,846116118	40283917,07	11,190
204	23-Ιουλ	20,03	0,34965673	105,59	1,842980094	40192183,39	11,164
205	24-Ιουλ	19,82	0,345943289	105,41	1,83976551	40097636,83	11,138
206	25-Ιουλ	19,60	0,342127337	105,22	1,836474091	40000277,3	11,111
207	26-Ιουλ	19,38	0,338210006	105,03	1,833107571	39900105,07	11,083
208	27-Ιουλ	19,15	0,334192457	104,83	1,829667689	39797120,74	11,055
209	28-Ιουλ	18,91	0,330075878	104,63	1,82615619	39691325,39	11,025
210	29-Ιουλ	18,67	0,325861491	104,43	1,822574822	39582720,51	10,995
211	30-Ιουλ	18,42	0,321550545	104,22	1,81892533	39471308,12	10,964
212	31-Ιουλ	18,17	0,317144315	104,00	1,815209458	39357090,78	10,933
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π10: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Αυγούστου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
213	1-Αυγ	17,91	0,31264411	103,79	1,811428946	39240071,65	10,900
214	2-Αυγ	17,65	0,308051261	103,57	1,807585526	39120254,52	10,867
215	3-Αυγ	17,38	0,303367129	103,34	1,803680922	38997643,86	10,833
216	4-Αυγ	17,11	0,298593104	103,12	1,799716848	38872244,89	10,798
217	5-Αυγ	16,83	0,293730599	102,89	1,795695006	38744063,59	10,762
218	6-Αυγ	16,55	0,288781055	102,65	1,791617084	38613106,76	10,726
219	7-Αυγ	16,26	0,283745939	102,42	1,787484755	38479382,1	10,689
220	8-Αυγ	15,96	0,278626743	102,18	1,783299675	38342898,19	10,651
221	9-Αυγ	15,67	0,273424984	101,93	1,779063483	38203664,62	10,612
222	10-Αυγ	15,36	0,268142204	101,69	1,7747778	38061691,95	10,573
223	11-Αυγ	15,06	0,262779967	101,44	1,770444226	37916991,84	10,532
224	12-Αυγ	14,74	0,257339862	101,19	1,76606434	37769577,03	10,492
225	13-Αυγ	14,43	0,251823502	100,93	1,761639701	37619461,44	10,450
226	14-Αυγ	14,11	0,246232522	100,68	1,757171845	37466660,17	10,407
227	15-Αυγ	13,78	0,240568577	100,42	1,752662284	37311189,56	10,364
228	16-Αυγ	13,45	0,234833347	100,16	1,748112507	37153067,24	10,320
229	17-Αυγ	13,12	0,229028531	99,90	1,743523982	36992312,2	10,276
230	18-Αυγ	12,79	0,223155848	99,63	1,738898148	36828944,75	10,230
231	19-Αυγ	12,45	0,21721704	99,36	1,734236424	36662986,66	10,184
232	20-Αυγ	12,10	0,211213866	99,10	1,729540202	36494461,1	10,137
233	21-Αυγ	11,75	0,205148104	98,82	1,724810851	36323392,78	10,090
234	22-Αυγ	11,40	0,199021552	98,55	1,720049712	36149807,88	10,042
235	23-Αυγ	11,05	0,192836026	98,28	1,715258107	35973734,18	9,993
236	24-Αυγ	10,69	0,186593359	98,00	1,710437328	35795201,01	9,943
237	25-Αυγ	10,33	0,1802954	97,72	1,705588648	35614239,33	9,893
238	26-Αυγ	9,97	0,173944016	97,44	1,700713312	35430881,76	9,842
239	27-Αυγ	9,60	0,167541088	97,16	1,695812543	35245162,56	9,790
240	28-Αυγ	9,23	0,161088514	96,88	1,690887543	35057117,69	9,738
241	29-Αυγ	8,86	0,154588206	96,60	1,685939488	34866784,83	9,685
242	30-Αυγ	8,48	0,148042091	96,31	1,680969535	34674203,37	9,632
243	31-Αυγ	8,10	0,141452107	96,03	1,675978817	34479414,47	9,578
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π11: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Σεπτεμβρίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
244	1-Σεπ	7,72	0,134820208	95,74	1,670968448	34282461,03	9,523
245	2-Σεπ	7,34	0,128148359	95,45	1,665939522	34083387,71	9,468
246	3-Σεπ	6,96	0,121438537	95,16	1,660893112	33882240,95	9,412
247	4-Σεπ	6,57	0,114692729	94,87	1,655830275	33679068,97	9,355
248	5-Σεπ	6,18	0,107912936	94,58	1,650752047	33473921,77	9,298
249	6-Σεπ	5,79	0,101101166	94,29	1,645659449	33266851,1	9,241
250	7-Σεπ	5,40	0,094259438	94,00	1,640553486	33057910,51	9,183
251	8-Σεπ	5,01	0,087389778	93,70	1,635435148	32847155,31	9,124
252	9-Σεπ	4,61	0,080494223	93,41	1,63030541	32634642,55	9,065
253	10-Σεπ	4,22	0,073574816	93,12	1,625165232	32420431,02	9,006
254	11-Σεπ	3,82	0,066633607	92,82	1,620015566	32204581,23	8,946
255	12-Σεπ	3,42	0,059672653	92,52	1,614857349	31987155,4	8,885
256	13-Σεπ	3,02	0,052694017	92,23	1,60969151	31768217,43	8,825
257	14-Σεπ	2,62	0,045699766	91,93	1,604518966	31547832,86	8,763
258	15-Σεπ	2,22	0,038691974	91,64	1,59934063	31326068,86	8,702
259	16-Σεπ	1,81	0,031672716	91,34	1,594157403	31102994,19	8,640
260	17-Σεπ	1,41	0,024644073	91,04	1,588970184	30878679,17	8,577
261	18-Σεπ	1,01	0,017608127	90,74	1,583779864	30653195,63	8,515
262	19-Σεπ	0,61	0,010566964	90,45	1,578587333	30426616,89	8,452
263	20-Σεπ	0,20	0,003522669	90,15	1,573393476	30199017,7	8,389
264	21-Σεπ	-0,20	-0,003522669	89,85	1,568199177	29970474,19	8,325
265	22-Σεπ	-0,61	-0,010566964	89,55	1,56300532	29741063,86	8,261
266	23-Σεπ	-1,01	-0,017608127	89,26	1,557812789	29510865,47	8,197
267	24-Σεπ	-1,41	-0,024644073	88,96	1,55262247	29279959,03	8,133
268	25-Σεπ	-1,81	-0,031672716	88,66	1,547435251	29048425,73	8,069
269	26-Σεπ	-2,22	-0,038691974	88,36	1,542252024	28816347,9	8,005
270	27-Σεπ	-2,62	-0,045699766	88,07	1,537073687	28583808,91	7,940
271	28-Σεπ	-3,02	-0,052694017	87,77	1,531901144	28350893,15	7,875
272	29-Σεπ	-3,42	-0,059672653	87,48	1,526735304	28117685,94	7,810
273	30-Σεπ	-3,82	-0,066633607	87,18	1,521577087	27884273,48	7,746
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right) \right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π12: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Οκτωβρίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
274	1-ΟΚΤ	-4,22	-0,073574816	86,88	1,516427421	27650742,78	7,681
275	2-ΟΚΤ	-4,61	-0,080494223	86,59	1,511287244	27417181,59	7,616
276	3-ΟΚΤ	-5,01	-0,087389778	86,30	1,506157505	27183678,32	7,551
277	4-ΟΚΤ	-5,40	-0,094259438	86,00	1,501039167	26950321,99	7,486
278	5-ΟΚΤ	-5,79	-0,101101166	85,71	1,495933204	26717202,13	7,421
279	6-ΟΚΤ	-6,18	-0,107912936	85,42	1,490840607	26484408,76	7,357
280	7-ΟΚΤ	-6,57	-0,114692729	85,13	1,485762379	26252032,25	7,292
281	8-ΟΚΤ	-6,96	-0,121438537	84,84	1,480699541	26020163,28	7,228
282	9-ΟΚΤ	-7,34	-0,128148359	84,55	1,475653132	25788892,78	7,164
283	10-ΟΚΤ	-7,72	-0,134820208	84,26	1,470624205	25558311,82	7,100
284	11-ΟΚΤ	-8,10	-0,141452107	83,97	1,465613837	25328511,57	7,036
285	12-ΟΚΤ	-8,48	-0,148042091	83,69	1,460623119	25099583,19	6,972
286	13-ΟΚΤ	-8,86	-0,154588206	83,40	1,455653165	24871617,78	6,909
287	14-ΟΚΤ	-9,23	-0,161088514	83,12	1,450705111	24644706,31	6,846
288	15-ΟΚΤ	-9,60	-0,167541088	82,84	1,44578011	24418939,52	6,783
289	16-ΟΚΤ	-9,97	-0,173944016	82,56	1,440879342	24194407,87	6,721
290	17-ΟΚΤ	-10,33	-0,1802954	82,28	1,436004006	23971201,46	6,659
291	18-ΟΚΤ	-10,69	-0,186593359	82,00	1,431155325	23749409,94	6,597
292	19-ΟΚΤ	-11,05	-0,192836026	81,72	1,426334547	23529122,48	6,536
293	20-ΟΚΤ	-11,40	-0,199021552	81,45	1,421542941	23310427,66	6,475
294	21-ΟΚΤ	-11,75	-0,205148104	81,18	1,416781803	23093413,42	6,415
295	22-ΟΚΤ	-12,10	-0,211213866	80,90	1,412052451	22878167	6,355
296	23-ΟΚΤ	-12,45	-0,21721704	80,64	1,407356229	22664774,86	6,296
297	24-ΟΚΤ	-12,79	-0,223155848	80,37	1,402694505	22453322,61	6,237
298	25-ΟΚΤ	-13,12	-0,229028531	80,10	1,398068672	22243894,98	6,179
299	26-ΟΚΤ	-13,45	-0,234833347	79,84	1,393480146	22036575,72	6,121
300	27-ΟΚΤ	-13,78	-0,240568577	79,58	1,38893037	21831447,59	6,064
301	28-ΟΚΤ	-14,11	-0,246232522	79,32	1,384420809	21628592,24	6,008
302	29-ΟΚΤ	-14,43	-0,251823502	79,07	1,379952952	21428090,22	5,952
303	30-ΟΚΤ	-14,74	-0,257339862	78,81	1,375528313	21230020,88	5,897
304	31-ΟΚΤ	-15,06	-0,262779967	78,56	1,371148428	21034462,37	5,843
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π13: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Νοεμβρίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
305	1-Νοε	-15,36	-0,268142204	78,31	1,366814853	20841491,53	5,789
306	2-Νοε	-15,67	-0,273424984	78,07	1,36252917	20651183,9	5,736
307	3-Νοε	-15,96	-0,278626743	77,82	1,358292979	20463613,67	5,684
308	4-Νοε	-16,26	-0,283745939	77,58	1,354107899	20278853,59	5,633
309	5-Νοε	-16,55	-0,288781055	77,35	1,349975569	20096975,03	5,582
310	6-Νοε	-16,83	-0,293730599	77,11	1,345897647	19918047,83	5,533
311	7-Νοε	-17,11	-0,298593104	76,88	1,341875805	19742140,37	5,484
312	8-Νοε	-17,38	-0,303367129	76,66	1,337911732	19569319,5	5,436
313	9-Νοε	-17,65	-0,308051261	76,43	1,334007128	19399650,48	5,389
314	10-Νοε	-17,91	-0,31264411	76,21	1,330163708	19233197,03	5,343
315	11-Νοε	-18,17	-0,317144315	76,00	1,326383196	19070021,26	5,297
316	12-Νοε	-18,42	-0,321550545	75,78	1,322667324	18910183,64	5,253
317	13-Νοε	-18,67	-0,325861491	75,57	1,319017832	18753743,06	5,209
318	14-Νοε	-18,91	-0,330075878	75,37	1,315436463	18600756,72	5,167
319	15-Νοε	-19,15	-0,334192457	75,17	1,311924965	18451280,18	5,125
320	16-Νοε	-19,38	-0,338210006	74,97	1,308485083	18305367,36	5,085
321	17-Νοε	-19,60	-0,342127337	74,78	1,305118562	18163070,5	5,045
322	18-Νοε	-19,82	-0,345943289	74,59	1,301827143	18024440,17	5,007
323	19-Νοε	-20,03	-0,34965673	74,41	1,29861256	17889525,29	4,969
324	20-Νοε	-20,24	-0,35326656	74,23	1,295476536	17758373,08	4,933
325	21-Νοε	-20,44	-0,356771709	74,05	1,292420783	17631029,15	4,898
326	22-Νοε	-20,64	-0,360171139	73,88	1,289446998	17507537,43	4,863
327	23-Νοε	-20,82	-0,363463843	73,71	1,286556861	17387940,18	4,830
328	24-Νοε	-21,01	-0,366648845	73,55	1,283752031	17272278,07	4,798
329	25-Νοε	-21,18	-0,3697252	73,40	1,281034143	17160590,11	4,767
330	26-Νοε	-21,35	-0,372691999	73,25	1,278404806	17052913,72	4,737
331	27-Νοε	-21,52	-0,37554836	73,10	1,275865601	16949284,71	4,708
332	28-Νοε	-21,67	-0,378293438	72,96	1,273418075	16849737,31	4,680
333	29-Νοε	-21,83	-0,38092642	72,83	1,27106374	16754304,18	4,654
334	30-Νοε	-21,97	-0,383446525	72,70	1,268804072	16663016,43	4,629
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

Πίνακας Π14: Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία μηνός Δεκεμβρίου για την περιοχή της Ρόδου

n	ΗΜΕΡΑ	Απόκλιση δ (Μοίρες)	Απόκλιση δ (rad)	Γωνία Δύσης ω _s (Μοίρες)	Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (kWh/m ²)
335	1-Δεκ	-22,11	-0,385853007	72,57	1,266640503	16575903,66	4,604
336	2-Δεκ	-22,24	-0,388145152	72,45	1,264574421	16492993,92	4,581
337	3-Δεκ	-22,36	-0,390322281	72,34	1,26260717	16414313,81	4,560
338	4-Δεκ	-22,48	-0,39238375	72,24	1,260740039	16339888,41	4,539
339	5-Δεκ	-22,59	-0,394328946	72,13	1,258974268	16269741,37	4,519
340	6-Δεκ	-22,70	-0,396157295	72,04	1,25731104	16203894,91	4,501
341	7-Δεκ	-22,80	-0,397868253	71,95	1,255751481	16142369,81	4,484
342	8-Δεκ	-22,89	-0,399461315	71,87	1,254296655	16085185,48	4,468
343	9-Δεκ	-22,97	-0,400936007	71,79	1,252947562	16032359,91	4,453
344	10-Δεκ	-23,05	-0,402291894	71,72	1,251705138	15983909,76	4,440
345	11-Δεκ	-23,12	-0,403528572	71,65	1,250570249	15939850,32	4,428
346	12-Δεκ	-23,18	-0,404645677	71,59	1,249543695	15900195,56	4,417
347	13-Δεκ	-23,24	-0,405642876	71,54	1,2486262	15864958,14	4,407
348	14-Δεκ	-23,29	-0,406519875	71,49	1,247818416	15834149,39	4,398
349	15-Δεκ	-23,34	-0,407276413	71,45	1,247120919	15807779,36	4,391
350	16-Δεκ	-23,37	-0,407912266	71,42	1,246534211	15785856,83	4,385
351	17-Δεκ	-23,40	-0,408427246	71,39	1,246058712	15768389,28	4,380
352	18-Δεκ	-23,42	-0,4088212	71,37	1,245694766	15755382,95	4,376
353	19-Δεκ	-23,44	-0,409094011	71,36	1,245442636	15746842,79	4,374
354	20-Δεκ	-23,45	-0,4092456	71,35	1,245302505	15742772,53	4,373
355	21-Δεκ	-23,45	-0,40927592	71,35	1,245274473	15743174,61	4,373
356	22-Δεκ	-23,44	-0,409184962	71,35	1,245358562	15748050,24	4,374
357	23-Δεκ	-23,43	-0,408972754	71,37	1,245554711	15757399,37	4,377
358	24-Δεκ	-23,41	-0,408639359	71,38	1,245862777	15771220,67	4,381
359	25-Δεκ	-23,39	-0,408184875	71,41	1,246282537	15789511,59	4,386
360	26-Δεκ	-23,35	-0,407609438	71,44	1,246813688	15812268,26	4,392
361	27-Δεκ	-23,31	-0,406913216	71,47	1,247455848	15839485,58	4,400
362	28-Δεκ	-23,27	-0,406096418	71,52	1,248208556	15871157,12	4,409
363	29-Δεκ	-23,21	-0,405159284	71,57	1,249071272	15907275,19	4,419
364	30-Δεκ	-23,15	-0,404102093	71,62	1,250043383	15947830,75	4,430
365	31-Δεκ	-23,09	-0,402925158	71,68	1,2511242	15992813,47	4,442
		$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right)$		$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$		$H_0 = \frac{86400 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta)$	

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΦΥΛΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΩΡΙΑΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ, ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΔΟ**

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΗΝΑΣ									
		ΙΑΝ					ΦΕΒ				
		ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΔΥΣΗΣ ω_s (rad)									
		1,2824					1,3958				
r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)		
04:00-05:00	-1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
05:00-06:00	-1,7017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
06:00-07:00	-1,4399	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0052	0,0157	0,0075	0,0128	
07:00-08:00	-1,1781	0,0181	0,0407	0,0243	0,0317	0,0091	0,0284	0,0863	0,0368	0,0626	
08:00-09:00	-0,9163	0,0615	0,1384	0,0715	0,0929	0,0455	0,0678	0,2060	0,0767	0,1304	
09:00-10:00	-0,6545	0,1079	0,2428	0,1122	0,1458	0,0970	0,1066	0,3241	0,1093	0,1858	
10:00-11:00	-0,3927	0,1457	0,3278	0,1409	0,1832	0,1446	0,1377	0,4186	0,1323	0,2250	
11:00-12:00	-0,1309	0,1669	0,3755	0,1558	0,2026	0,1729	0,1549	0,4710	0,1442	0,2452	
12:00-13:00	0,1309	0,1669	0,3755	0,1558	0,2026	0,1729	0,1549	0,4710	0,1442	0,2452	
13:00-14:00	0,3927	0,1457	0,3278	0,1409	0,1832	0,1446	0,1377	0,4186	0,1323	0,2250	
14:00-15:00	0,6545	0,1079	0,2428	0,1122	0,1458	0,0970	0,1066	0,3241	0,1093	0,1858	
15:00-16:00	0,9163	0,0615	0,1384	0,0715	0,0929	0,0455	0,0678	0,2060	0,0767	0,1304	
16:00-17:00	1,1781	0,0181	0,0407	0,0243	0,0317	0,0091	0,0284	0,0863	0,0368	0,0626	
17:00-18:00	1,4399	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0052	0,0157	0,0075	0,0128	
18:00-19:00	1,7017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
19:00-20:00	1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$ $\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$ $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$		$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$			$I = r_t \cdot H$	$I_d = r_d \cdot H_d$	$I_b = I - I_d$				

Πίνακας Π15: Συνιστώσες ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, στο οριζόντιο επίπεδο, για τη Ρόδο.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΗΝΑΣ									
		ΜΑΡ					ΑΠΡ				
		ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΔΥΣΗΣ ω_s (rad)									
		1,2824					1,3958				
r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)		
04:00-05:00	-1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
05:00-06:00	-1,7017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0047	0,0259	0,0069	0,0172	0,0087
06:00-07:00	-1,4399	0,0112	0,0473	0,0112	0,0235	0,0237	0,0213	0,1163	0,0279	0,0698	0,0465
07:00-08:00	-1,1781	0,0393	0,1659	0,0393	0,0826	0,0833	0,0473	0,2584	0,0553	0,1381	0,1203
08:00-09:00	-0,9163	0,0724	0,3055	0,0724	0,1521	0,1534	0,0749	0,4096	0,0798	0,1994	0,2102
09:00-10:00	-0,6545	0,1040	0,4387	0,1040	0,2184	0,2203	0,1006	0,5498	0,0998	0,2494	0,3004
10:00-11:00	-0,3927	0,1288	0,5433	0,1288	0,2704	0,2729	0,1204	0,6580	0,1139	0,2848	0,3733
11:00-12:00	-0,1309	0,1424	0,6008	0,1424	0,2990	0,3017	0,1311	0,7170	0,1212	0,3031	0,4139
12:00-13:00	0,1309	0,1424	0,6008	0,1424	0,2990	0,3017	0,1311	0,7170	0,1212	0,3031	0,4139
13:00-14:00	0,3927	0,1288	0,5433	0,1288	0,2704	0,2729	0,1204	0,6580	0,1139	0,2848	0,3733
14:00-15:00	0,6545	0,1040	0,4387	0,1040	0,2184	0,2203	0,1006	0,5498	0,0998	0,2494	0,3004
15:00-16:00	0,9163	0,0724	0,3055	0,0724	0,1521	0,1534	0,0749	0,4096	0,0798	0,1994	0,2102
16:00-17:00	1,1781	0,0393	0,1659	0,0393	0,0826	0,0833	0,0473	0,2584	0,0553	0,1381	0,1203
17:00-18:00	1,4399	0,0112	0,0473	0,0112	0,0235	0,0237	0,0213	0,1163	0,0279	0,0698	0,0465
18:00-19:00	1,7017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0047	0,0259	0,0069	0,0172	0,0087
19:00-20:00	1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$ $\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$ $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$		$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$					$I = r_t \cdot H$		$I_d = r_d \cdot H_d$		$I_b = I - I_d$

Πίνακας Π15: (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΗΝΑΣ									
		ΜΑΙ					ΙΟΥΝ				
		ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΔΥΣΗΣ ω_s (rad)									
		1,2824					1,3958				
r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)		
04:00-05:00	-1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,0126	0,0025	0,0063	0,0064	
05:00-06:00	-1,7017	0,0083	0,0544	0,0115	0,0311	0,0233	0,0118	0,0855	0,0158	0,0396	0,0459
06:00-07:00	-1,4399	0,0283	0,1853	0,0352	0,0950	0,0903	0,0312	0,2262	0,0379	0,0947	0,1315
07:00-08:00	-1,1781	0,0516	0,3380	0,0582	0,1572	0,1808	0,0533	0,3860	0,0592	0,1479	0,2381
08:00-09:00	-0,9163	0,0758	0,4960	0,0789	0,2130	0,2830	0,0759	0,5494	0,0782	0,1956	0,3538
09:00-10:00	-0,6545	0,0977	0,6398	0,0958	0,2586	0,3812	0,0962	0,6968	0,0938	0,2345	0,4622
10:00-11:00	-0,3927	0,1144	0,7494	0,1077	0,2908	0,4586	0,1117	0,8086	0,1048	0,2621	0,5466
11:00-12:00	-0,1309	0,1235	0,8088	0,1139	0,3075	0,5013	0,1200	0,8690	0,1105	0,2763	0,5927
12:00-13:00	0,1309	0,1235	0,8088	0,1139	0,3075	0,5013	0,1200	0,8690	0,1105	0,2763	0,5927
13:00-14:00	0,3927	0,1144	0,7494	0,1077	0,2908	0,4586	0,1117	0,8086	0,1048	0,2621	0,5466
14:00-15:00	0,6545	0,0977	0,6398	0,0958	0,2586	0,3812	0,0962	0,6968	0,0938	0,2345	0,4622
15:00-16:00	0,9163	0,0758	0,4960	0,0789	0,2130	0,2830	0,0759	0,5494	0,0782	0,1956	0,3538
16:00-17:00	1,1781	0,0516	0,3380	0,0582	0,1572	0,1808	0,0533	0,3860	0,0592	0,1479	0,2381
17:00-18:00	1,4399	0,0283	0,1853	0,0352	0,0950	0,0903	0,0312	0,2262	0,0379	0,0947	0,1315
18:00-19:00	1,7017	0,0083	0,0544	0,0115	0,0311	0,0233	0,0118	0,0855	0,0158	0,0396	0,0459
19:00-20:00	1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,0126	0,0025	0,0063	0,0064
$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$ $\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$ $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$		$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$					$I = r_t \cdot H$		$I_d = r_d \cdot H_d$		$I_b = I - I_d$

Πίνακας Π15: (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΗΝΑΣ									
		ΙΟΥΛ					ΑΥΓ				
		ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΔΥΣΗΣ ω _s (rad)									
		1,2824					1,3958				
r _t	I (kWh/m ²)	r _d	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)	r _t	I (kWh/m ²)	r _d	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)		
04:00-05:00	-1,9635	0,0009	0,0064	0,0013	0,0031	0,0033	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
05:00-06:00	-1,7017	0,0101	0,0736	0,0138	0,0332	0,0404	0,0062	0,0411	0,0089	0,0196	0,0215
06:00-07:00	-1,4399	0,0299	0,2171	0,0367	0,0880	0,1291	0,0242	0,1595	0,0311	0,0684	0,0911
07:00-08:00	-1,1781	0,0526	0,3816	0,0588	0,1410	0,2406	0,0491	0,3238	0,0566	0,1245	0,1992
08:00-09:00	-0,9163	0,0758	0,5507	0,0786	0,1885	0,3621	0,0753	0,4965	0,0795	0,1749	0,3216
09:00-10:00	-0,6545	0,0969	0,7038	0,0947	0,2273	0,4765	0,0995	0,6555	0,0982	0,2160	0,4395
10:00-11:00	-0,3927	0,1130	0,8203	0,1062	0,2548	0,5655	0,1180	0,7776	0,1114	0,2451	0,5325
11:00-12:00	-0,1309	0,1216	0,8833	0,1121	0,2690	0,6143	0,1281	0,8440	0,1183	0,2602	0,5838
12:00-13:00	0,1309	0,1216	0,8833	0,1121	0,2690	0,6143	0,1281	0,8440	0,1183	0,2602	0,5838
13:00-14:00	0,3927	0,1130	0,8203	0,1062	0,2548	0,5655	0,1180	0,7776	0,1114	0,2451	0,5325
14:00-15:00	0,6545	0,0969	0,7038	0,0947	0,2273	0,4765	0,0995	0,6555	0,0982	0,2160	0,4395
15:00-16:00	0,9163	0,0758	0,5507	0,0786	0,1885	0,3621	0,0753	0,4965	0,0795	0,1749	0,3216
16:00-17:00	1,1781	0,0526	0,3816	0,0588	0,1410	0,2406	0,0491	0,3238	0,0566	0,1245	0,1992
17:00-18:00	1,4399	0,0299	0,2171	0,0367	0,0880	0,1291	0,0242	0,1595	0,0311	0,0684	0,0911
18:00-19:00	1,7017	0,0101	0,0736	0,0138	0,0332	0,0404	0,0062	0,0411	0,0089	0,0196	0,0215
19:00-20:00	1,9635	0,0009	0,0064	0,0013	0,0031	0,0033	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$ $\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$ $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$		$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$					$I = r_t \cdot H$		$I_d = r_d \cdot H_d$		$I_b = I - I_d$

Πίνακας Π15: (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΗΝΑΣ									
		ΣΕΠ					ΟΚΤ				
		ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΔΥΣΗΣ ω _s (rad)									
		1,2824					1,3958				
r _t	I (kWh/m ²)	r _d	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)	r _t	I (kWh/m ²)	r _d	I _d (kWh/m ²)	I _b (kWh/m ²)		
04:00-05:00	-1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
05:00-06:00	-1,7017	0,0010	0,0052	0,0015	0,0029	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
06:00-07:00	-1,4399	0,0141	0,0745	0,0194	0,0389	0,0356	0,0073	0,0285	0,0106	0,0180	0,0105
07:00-08:00	-1,1781	0,0424	0,2248	0,0513	0,1025	0,1223	0,0323	0,1252	0,0412	0,0700	0,0552
08:00-09:00	-0,9163	0,0735	0,3894	0,0798	0,1596	0,2298	0,0696	0,2697	0,0779	0,1325	0,1372
09:00-10:00	-0,6545	0,1028	0,5448	0,1031	0,2062	0,3386	0,1059	0,4104	0,1080	0,1835	0,2269
10:00-11:00	-0,3927	0,1257	0,6660	0,1196	0,2391	0,4268	0,1347	0,5224	0,1292	0,2196	0,3028
11:00-12:00	-0,1309	0,1383	0,7324	0,1281	0,2562	0,4762	0,1507	0,5844	0,1402	0,2383	0,3461
12:00-13:00	0,1309	0,1383	0,7324	0,1281	0,2562	0,4762	0,1507	0,5844	0,1402	0,2383	0,3461
13:00-14:00	0,3927	0,1257	0,6660	0,1196	0,2391	0,4268	0,1347	0,5224	0,1292	0,2196	0,3028
14:00-15:00	0,6545	0,1028	0,5448	0,1031	0,2062	0,3386	0,1059	0,4104	0,1080	0,1835	0,2269
15:00-16:00	0,9163	0,0735	0,3894	0,0798	0,1596	0,2298	0,0696	0,2697	0,0779	0,1325	0,1372
16:00-17:00	1,1781	0,0424	0,2248	0,0513	0,1025	0,1223	0,0323	0,1252	0,0412	0,0700	0,0552
17:00-18:00	1,4399	0,0141	0,0745	0,0194	0,0389	0,0356	0,0073	0,0285	0,0106	0,0180	0,0105
18:00-19:00	1,7017	0,0010	0,0052	0,0015	0,0029	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:00-20:00	1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$ $\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$ $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$		$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$					$I = r_t \cdot H$		$I_d = r_d \cdot H_d$		$I_b = I - I_d$

Πίνακας Π15: (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΗΝΑΣ									
		ΝΟΕ					ΔΕΚ				
		ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΔΥΣΗΣ ω_s (rad)									
		1,2824					1,3958				
r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)	r_t	I (kWh/m ²)	r_d	I_d (kWh/m ²)	I_b (kWh/m ²)		
04:00-05:00	-1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
05:00-06:00	-1,7017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
06:00-07:00	-1,4399	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
07:00-08:00	-1,1781	0,0192	0,0507	0,0258	0,0361	0,0146	0,0163	0,0322	0,0220	0,0265	0,0057
08:00-09:00	-0,9163	0,0632	0,1669	0,0730	0,1022	0,0647	0,0588	0,1159	0,0690	0,0828	0,0332
09:00-10:00	-0,6545	0,1077	0,2843	0,1116	0,1562	0,1281	0,1081	0,2129	0,1128	0,1354	0,0775
10:00-11:00	-0,3927	0,1438	0,3796	0,1389	0,1944	0,1852	0,1484	0,2924	0,1439	0,1726	0,1198
11:00-12:00	-0,1309	0,1639	0,4328	0,1530	0,2142	0,2187	0,1711	0,3371	0,1599	0,1919	0,1452
12:00-13:00	0,1309	0,1639	0,4328	0,1530	0,2142	0,2187	0,1711	0,3371	0,1599	0,1919	0,1452
13:00-14:00	0,3927	0,1438	0,3796	0,1389	0,1944	0,1852	0,1484	0,2924	0,1439	0,1726	0,1198
14:00-15:00	0,6545	0,1077	0,2843	0,1116	0,1562	0,1281	0,1081	0,2129	0,1128	0,1354	0,0775
15:00-16:00	0,9163	0,0632	0,1669	0,0730	0,1022	0,0647	0,0588	0,1159	0,0690	0,0828	0,0332
16:00-17:00	1,1781	0,0192	0,0507	0,0258	0,0361	0,0146	0,0163	0,0322	0,0220	0,0265	0,0057
17:00-18:00	1,4399	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0046	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18:00-19:00	1,7017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:00-20:00	1,9635	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$ $\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$ $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$		$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)}$					$I = r_t \cdot H$		$I_d = r_d \cdot H_d$		$I_b = I - I_d$

Πίνακας Π15: (Συνέχεια)

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΦΥΛΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΡΙΑΙΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΣΗ
ΗΜΕΡΑ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΣΤΗ ΡΟΔΟ**

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΙΑΝ			ΦΕΒ			ΜΑΡ		
	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)
04:00-05:00									
05:00-06:00									
06:00-07:00				1,91	88,09	108,08	5,30	84,70	96,95
07:00-08:00	4,76	85,24	120,67	9,40	80,60	114,30	16,42	73,58	105,78
08:00-09:00	14,10	75,90	130,26	19,90	70,10	124,80	27,68	62,32	116,48
09:00-10:00	22,47	67,53	142,08	29,02	60,98	137,35	37,80	52,20	129,66
10:00-11:00	28,70	61,30	155,98	35,97	54,03	152,60	45,88	44,12	146,68
11:00-12:00	32,07	57,93	171,74	39,81	50,19	170,48	50,56	39,44	168,15
12:00-13:00	32,07	57,93	188,26	39,81	50,19	189,52	50,56	39,44	191,85
13:00-14:00	28,70	61,30	204,02	35,97	54,03	207,40	45,88	44,12	213,32
14:00-15:00	22,47	67,53	217,92	29,02	60,98	222,65	37,80	52,20	230,34
15:00-16:00	14,10	75,90	229,74	19,90	70,10	235,20	27,68	62,32	243,52
16:00-17:00	4,76	85,24	239,32	9,40	80,60	245,70	16,42	73,58	254,22
17:00-18:00				1,91	88,09	251,92	5,30	84,70	263,05
18:00-19:00									
19:00-20:00									

Πίνακας Π16: Ωριαίες ηλιακές γωνίες για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, στη Ρόδο.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΑΠΡ			ΜΑΙ			ΙΟΥΝ		
	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)
04:00-05:00							1,26	88,74	61,54
05:00-06:00	2,88	87,12	79,96	5,51	84,49	70,37	7,98	82,02	66,80
06:00-07:00	11,79	78,21	86,46	17,03	72,97	78,59	19,37	70,63	74,76
07:00-08:00	23,85	66,15	95,46	28,99	61,01	86,87	31,20	58,80	82,57
08:00-09:00	35,71	54,29	105,66	41,05	48,95	96,017	43,24	46,76	90,99
09:00-10:00	46,90	43,10	118,61	52,86	37,14	107,60	55,23	34,77	101,44
10:00-11:00	56,48	33,52	136,94	63,70	26,30	125,27	66,63	23,37	117,68
11:00-12:00	62,53	27,47	163,81	71,42	18,58	157,21	75,44	14,56	151,54
12:00-13:00	62,53	27,47	196,19	71,42	18,58	202,79	75,44	14,56	208,46
13:00-14:00	56,48	33,52	223,06	63,70	26,30	234,73	66,63	23,37	242,32
14:00-15:00	46,90	43,10	241,39	52,86	37,14	252,40	55,23	34,77	258,56
15:00-16:00	35,71	54,29	254,34	41,05	48,95	263,98	43,24	46,76	269,01
16:00-17:00	23,85	66,15	264,54	28,99	61,01	273,13	31,20	58,80	277,43
17:00-18:00	11,79	78,21	273,54	17,03	72,97	281,41	19,37	70,63	285,24
18:00-19:00	2,88	87,12	280,04	5,51	84,49	289,63	7,98	82,02	293,20
19:00-20:00							1,26	88,74	298,46

Πίνακας Π16: (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΙΟΥΛ			ΑΥΓ			ΣΕΠ		
	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)
04:00-05:00	0,63	89,37	63,62						
05:00-06:00	6,79	83,21	68,42	3,94	86,06	76,18	0,54	89,46	88,14
06:00-07:00	18,30	71,70	76,54	13,90	76,10	83,38	7,11	82,89	93,00
07:00-08:00	30,20	59,80	84,58	25,95	64,05	92,14	19,07	70,93	102,31
08:00-09:00	42,25	47,75	93,36	37,92	52,08	102,00	30,57	59,43	112,94
09:00-10:00	54,17	35,83	104,38	49,39	40,61	114,56	41,07	48,93	126,18
10:00-11:00	65,32	24,68	121,40	59,46	30,54	132,91	49,64	40,36	143,79
11:00-12:00	73,60	16,40	154,50	66,09	23,91	161,75	54,73	35,27	166,94
12:00-13:00	73,60	16,40	205,50	66,09	23,91	198,25	54,73	35,27	193,06
13:00-14:00	65,32	24,68	238,60	59,46	30,54	227,09	49,64	40,36	216,21
14:00-15:00	54,17	35,83	255,62	49,39	40,61	245,44	41,07	48,93	233,82
15:00-16:00	42,25	47,75	266,64	37,92	52,08	258,00	30,57	59,43	247,06
16:00-17:00	30,20	59,80	275,42	25,95	64,05	267,86	19,07	70,93	257,69
17:00-18:00	18,30	71,70	283,46	13,90	76,10	276,62	7,11	82,89	267,00
18:00-19:00	6,79	83,21	291,58	3,94	86,06	283,82	0,54	89,46	271,86
19:00-20:00	0,63	89,37	296,38						

Πίνακας Π16: (Συνέχεια)

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΩΡΑ	ΜΗΝΑΣ								
	ΟΚΤ			ΝΟΕ			ΔΕΚ		
	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)	Ύψος α (Μοίρες)	Ζενίθ θz (Μοίρες)	Αζιμούθιο Az (Μοίρες)
04:00-05:00									
05:00-06:00									
06:00-07:00	2,95	87,05	104,68						
07:00-08:00	11,58	78,42	111,75	5,38	84,62	118,91	3,93	86,07	123,00
08:00-09:00	22,33	67,67	122,36	15,39	74,61	129,08	12,38	77,62	131,79
09:00-10:00	31,75	58,25	135,16	23,92	66,08	141,08	20,53	69,47	143,36
10:00-11:00	39,03	50,97	150,98	30,30	59,70	155,28	26,56	63,44	156,87
11:00-12:00	43,10	46,90	169,86	33,77	56,23	171,48	29,81	60,19	172,06
12:00-13:00	43,10	46,90	190,14	33,77	56,23	188,52	29,81	60,19	187,94
13:00-14:00	39,03	50,97	209,02	30,30	59,70	204,72	26,56	63,44	203,13
14:00-15:00	31,75	58,25	224,84	23,92	66,08	218,92	20,53	69,47	216,64
15:00-16:00	22,33	67,67	237,64	15,39	74,61	230,92	12,38	77,62	228,21
16:00-17:00	11,58	78,42	248,25	5,38	84,62	241,09	3,93	86,07	237,00
17:00-18:00	2,95	87,05	255,32						
18:00-19:00									
19:00-20:00									

Πίνακας Π16: (Συνέχεια)