

Ευχαριστίες

Με τη διπλωματική αυτή εργασία ακόμη ένας κύκλος της ζωής μου φτάνει στο τέλος του. Και σ' αυτό το σημείο αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους εκείνους που ήταν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα.

Το πρώτο μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στον επιβλέπων Καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Χρήστο Τζιβανίδη. Τον ευχαριστώ γιατί από την αρχή αυτής της διαδρομής με εμπιστεύτηκε και με ενθάρρυνε, μαθαίνοντάς με να θέτω τον πήχη όλο και υψηλότερα. Το ενδιαφέρον του, η βοήθεια και η στήριξη, ακόμη και σε θέματα πέρα από τη διπλωματική, ήταν διαρκή. Οι γνώσεις του και ο επαγγελματισμός του ήταν στοιχεία που συνέβαλαν στην καλή συνεργασία και εντέλει στην περάτωση της διπλωματικής. Τον ευχαριστώ θερμά για όλα.

Το επόμενο εξίσου μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο Δρ. Ευάγγελο Μπέλλο. Χωρίς τη συμβολή του, αδιαμφισβήτητα, το αποτέλεσμα δεν θα ήταν το ίδιο. Ήταν παρών στο καθετί που προέκυπτε, αφιερώνοντας ολόκληρες ώρες στα προβλήματά μου και δίνοντας – πάντα με τον δικό του, μοναδικό τρόπο- τα κατάλληλα κίνητρα για διαρκή βελτίωση και αναζήτηση. Βαγγέλη, σου χρωστάω πολλά.

Κλείνοντας, το μεγαλύτερο και πιο βαθύ ευχαριστώ δίνω σε όλους τους αγαπημένους μου ανθρώπους, στην οικογένειά μου, στους γονείς μου, στην αδερφή μου και στους φίλους μου που όλα αυτά τα χρόνια είναι στο πλευρό μου. Είναι πάντα «εκεί», με βοηθούν, με στηρίζουν, ηρεμούν τα άγχη και τις ανησυχίες μου και ομορφαίνουν τις στιγμές μου. Τους έχω μέσα στην καρδιά μου.

Σας ευχαριστώ, αληθινά, πολύ όλους

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Ευχαριστίες | 3 |
| Περίληψη..... | 7 |
| Abstract | 9 |
| Ονοματολογία | 11 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή..... | 17 |
| 1.1 Έννοια και μορφές ενέργειας | 17 |
| 1.2 Ιστορική αναδρομή των ενεργειακών πηγών | 19 |
| 1.3 Οι πηγές ενέργειας σήμερα | 19 |
| 1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας..... | 20 |
| 1.5 Προδιαγραφές και νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης..... | 22 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Μελέτη του Ήλιου..... | 25 |
| 2.1 Φασματική κατανομή της Ηλιακής ακτινοβολίας..... | 25 |
| 2.2 Η σχετική θέση της Γης ως προς τον Ήλιο | 25 |
| 2.3 Προσδιορισμός της θέσης του Ήλιου..... | 26 |
| 2.4 Ηλιακή Γεωμετρία-Προσδιορισμός γωνιών..... | 28 |
| 2.5 Ανάλυση Ηλιακής Ακτινοβολίας | 29 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ηλιακή Ενέργεια και φωτοβολταϊκά..... | 31 |
| 3.1 Ηλιακή Ενέργεια | 31 |
| 3.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα..... | 33 |
| 3.3 Απόσβεση της Ηλιακής Ακτινοβολίας..... | 38 |
| 3.4 Εισαγωγή στους Ηλιακούς συλλέκτες..... | 39 |
| 3.5 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες..... | 39 |
| 3.5.1 Ηλιακός Πύργος | 41 |
| 3.5.2 Παραβολικά Ηλιακά κοίλα..... | 43 |
| 3.5.3 Συλλέκτης τύπου CPC..... | 46 |
| 3.5.4 Ηλιακός Δίσκος..... | 51 |
| 3.5.5 Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel..... | 54 |
| 3.6 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες..... | 58 |
| 3.7 Ηλιακοί Συλλέκτες με σωλήνες κενού | 61 |
| 3.8 Είδη θερμικών ηλιακών συλλεκτών | 62 |
| 3.8.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες νερού ή αέρα..... | 62 |
| 3.8.2 Θερμοσιφωνικοί ηλιακοί συλλέκτες νερού | 66 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.8.3 | Ηλιακοί συλλέκτες κενού | 68 |
| 3.8.4 | Κεντρικά θερμικά ηλιακά συστήματα..... | 70 |
| 3.8.5 | Ολοκληρωμένες συσκευές συλλέκτη αποθήκευσης ζεστού νερού (ICS) | 71 |
| 3.8.6 | Ηλιακοί συλλέκτες με ακίνητους σύνθετους παραβολικούς ανακλαστήρες συγκέντρωσης (συλλέκτες CPC)..... | 73 |
| 3.8.7 | Συνδυασμός διαθλαστήρα Fresnel με ηλιακό συλλέκτη τύπου CPC και ICS. | 73 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Μέθοδοι | | 77 |
| 4.1 | Εισαγωγή στην χρήση νανοϋλικών στα φωτοβολταϊκά | 77 |
| 4.2 | Περιγραφή της Μεθοδολογίας | 79 |
| 4.2.1 | Το εξεταζόμενο σύστημα | 79 |
| 4.2.2 | Μαθηματική Μοντελοποίηση | 80 |
| 4.2.3 | Ακολουθούμενη μεθοδολογία | 89 |
| 4.2.4 | Επικύρωση του αναπτυγμένου μοντέλου | 91 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων | | 99 |
| 5.1 | Αποτελέσματα για φωτοβολταϊκό με νερό ως εργαζόμενο μέσο..... | 99 |
| 5.2 | Αποτελέσματα για φωτοβολταϊκό με χρήση νανοϋλικού (98%νερό+2%Cu)..... | 111 |
| 5.3 | Σύγκριση βαθμών απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού | 125 |
| 5.4 | Σύγκριση νερού με νανοϋλικό για την δεξαμενή αποθήκευσης των 150 L κατά τη διάρκεια της μέρας | 127 |
| 5.5 | Η επίδραση του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης | 134 |
| | Για την περίπτωση της χρήσης νερού | 134 |
| | Για την περίπτωση της χρήσης νανοϋλικού | 143 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα | | 147 |

Περίληψη

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η εκτίμηση της αύξησης της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης ενός θερμικού φωτοβολταϊκού που λειτουργεί με νανοϋλικό. Το εξεταζόμενο νανοϋλικό είναι ένα μίγμα Cu με νερό και συγκρίνεται με νερό ως εργαζόμενο ρευστό για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Ένα ενσωματωμένο ηλιακό θερμικό σύστημα με υβριδικό φωτοβολταϊκό και δεξαμενή αποθήκευσης εξετάζεται για να καθοριστούν η θερμική και η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται. Εξετάζεται η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η παροχή και η θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού, η ταχύτητα του ανέμου και ο συντελεστής εκπομπής της πλάκας στον θερμικό, τον ηλεκτρικό και τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Διαφορετικοί όγκοι δεξαμενών αποθήκευσης ερευνώνται λόγω της ικανότητας αποθήκευσης που επηρεάζει τη θερμική και εξεργειακή απόδοση του συστήματος. Σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα, η δεξαμενή αποθήκευσης των 150 L είναι η καταλληλότερη λύση για το θερμικό φωτοβολταϊκό σύστημα με χώρο συλλογής 2 m², χρησιμοποιώντας κυρίως εξεργειακά κριτήρια.

Η αύξηση της θερμικής απόδοσης που παρατηρείται με την χρήση νανοϋλικού είναι περίπου 6.59%, ενώ η ηλεκτρική είναι 1.02%. Επιπλέον στην περίπτωση χρησιμοποίησης δεξαμενής αποθήκευσης διαπιστώνεται ότι η αύξηση είναι υψηλότερη στις περιπτώσεις με μεγαλύτερες δεξαμενές αποθήκευσης. Η μελέτη διεξάγεται με ένα αναπτυγμένο μοντέλο θερμικής ανάλυσης στην EES (Engineering Equation Solver), η οποία επικυρώνεται με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Τα στοιχεία για το κλίμα έχουν ληφθεί από τη βιβλιογραφία για την Αθήνα, Ελλάδα

Abstract

The objective of this study is to estimate the thermal and electrical enhancement of a hybrid PV operating with nanofluid. The examined nanofluid is Cu/water and it is compared with water as working fluid for various operating conditions. An integrated solar thermal system with a hybrid PV and a storage tank is examined to calculate the thermal and electrical power produced. The influence of various factors such as the intensity of electrical radiation, ambient temperature, supply and temperature of the working fluid, wind speed and the emission factor of the slab in the thermal, electrical and exergetic efficiency of the system are examined. Different storage tank volumes are investigated because of the storage capacity influence on the thermal and the exergetic performance of the system. According to the final results, the storage tank of 150 L is found to be the most suitable solution for the hybrid PV of 2 m² collecting area, using exergetic criteria.

The increase in thermal performance observed with nanofluid is about 6.59%, while the electrical is 1.02%. In addition, in the case that a storage tank is used, it is noted that the increase is higher in cases with larger storage tanks. The study is conducted with a developed thermal model EES (Engineering Equation Solver), which is validated with experimental literature results. Climate data has been obtained from the bibliography for Athens, Greece

Ονοματολογία

| | |
|-------------|--|
| A_a | Επιφάνεια ανοίγματος, m^2 |
| A_r | Επιφάνεια απορρόφησης, m^2 |
| A_c | Συλλεκτική επιφάνεια, m^2 |
| a_1 | 1 ^η σταθερά της εξίσωσης (4.20), - |
| a_2 | 2 ^η σταθερά της εξίσωσης (4.20), - |
| a_b | Απορροφητικότητα απορροφητήρα σε άμεση ακτινοβολία, W/m^2K |
| a_d | Απορροφητικότητα απορροφητήρα σε διάχυτη ακτινοβολία, W/m^2K |
| b | Σταθερά θερμοκρασίας αναφοράς του φωτοβολταϊκού, K^{-1} |
| C | Λόγος συγκέντρωσης,- |
| c_b | Διαπερατότητα καλύμματος σε άμεση ακτινοβολία, W/m^2K |
| c_d | Διαπερατότητα καλύμματος σε διάχυτη ακτινοβολία, W/m^2K |
| c_p | Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο, $J/kg \cdot K$ |
| D_T | Διάμετρος της δεξαμενής αποθήκευσης, m |
| DR | Διακύμανση της θερμοκρασίας, K |
| d_{in} | Εσωτερική διάμετρος των σωλήνων, m |
| d_{out} | Εξωτερική διάμετρος των σωλήνων, m |
| E | Ημερήσια ενέργεια, kWh |
| E_x | Εξεργειακή ροή, W |
| F | Συνάρτηση ελέγχου εξίσωσης (3.6), - |
| FR | Συντελεστής θερμικής απολαβής, - |
| H_T | Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη, kWh/m^2 |
| $G_{b,CPC}$ | Αξιοποιούμενη άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του Ανοίγματος του συλλέκτη CPC, W/m^2 |
| G_{bn} | Άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου, W/m^2 |

| | |
|-------------|---|
| G_d | Ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία, W/m^2 |
| $G_{d,CPC}$ | Αξιοποιούμενη διάχυτη προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του ανοίγματος του συλλέκτη CPC, W/m^2 |
| G_{sc} | Ηλιακή σταθερά, - |
| G_{on} | Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας καθέτου επιφάνειας, W/m^2 |
| G_p | Ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, W/m^2 |
| G_T | Άμεση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, W/m^2 |
| $G_{T,max}$ | Μέγιστη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, W/m^2 |
| g | Επιτάχυνση της βαρύτητας, m/s^2 |
| h_f | Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρευστού, W/m^2K |
| h_{in} | Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την πλάκα στο κάλυμμα, W/m^2K |
| h_{out} | Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το κάλυμμα στο περιβάλλον, W/m^2K |
| k | Θερμική αγωγιμότητα, W/mK |
| L | Μήκος του ηλιακού συλλέκτη, m |
| L_T | Ύψος της δεξαμενής αποθήκευσης, m |
| m_c | Παροχή μάζας στον συλλέκτη, kg/s |
| N | Αριθμός σωλήνων, - |
| N_a | Μέσος αριθμός ανακλάσεων, - |
| N_D | Διάρκεια ημέρας, h |
| Nu | Αριθμός Nusselt, - |
| P_{el} | Ηλεκτρική ισχύς, W |
| PF | Packing factor, - |
| Q | Θερμότητα, W |
| Ra | Αριθμός Raleigh, - |
| R_b | Λόγος άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία κεκλιμένη επιφάνεια προς την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, - |
| Re | Αριθμός Reynolds, - |

| | |
|-------------------|---|
| T | Θερμοκρασία, K |
| t | Χρόνος, s |
| T _h | Ημερήσια ώρα, h |
| U _T | Συντελεστής θερμικών απωλειών της δεξαμενής αποθήκευσης, W/m ² K |
| V | Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης, L |
| V _c | Παροχή ρευστού στον συλλέκτη, L/min |
| V _T | Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης, m ³ |
| S | Συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας ανοίγματος, W/m ² |
| U _{wind} | Ταχύτητα του ανέμου, m/s |
| Z | Ημερήσια εξέργεια, kWh |

Ελληνικά σύμβολα

| | |
|------------------|---|
| α | Συντελεστής Απορρόφησης, - |
| α ₁ | 1 ^η σταθερά της εξίσωσης (3.17) |
| α ₂ | 2 ^η σταθερά της εξίσωσης (3.17) |
| α _s | Γωνία ύψους Ήλιου, ° |
| β | Συντελεστής θερμικής διαστολής, K ⁻¹ |
| β _{col} | Κλίση του συλλέκτη, ° |
| γ | Γωνία αζιμουθίου, ° |
| γ _s | Γωνία αζιμουθίου του Ήλιου, ° |
| δ | Ηλιακή απόκλιση, m |
| Δt | Χρονικό βήμα, s |
| ε | Εκπομπή, - |
| θ | Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, ° |
| θ _c | Ημιγωνία αποδοχής, ° |
| θ _z | Γωνία ζενίθ, ° |
| η | Αποτελεσματικότητα, - |
| η _{opt} | Οπτική απόδοση για μηδενική γωνία πρόσπτωσης, - |

| | |
|--------------|---|
| μ | Δυναμική συνεκτικότητα, Pa s |
| ν | Κινηματική συνεκτικότητα, m^2/s |
| ρ | Πυκνότητα, kg/m^3 |
| ρ_a | Συντελεστής ανάκλασης του εδάφους |
| σ | Σταθερά Stefan-Boltzmann [= $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$] |
| τ | Διαπερατότητα του καλύμματος, - |
| τ_a | Ποσοστό απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον συλλέκτη, - |
| τ_{CPC} | Διαπερατότητα συγκεντρωτή, W/m^2K |
| φ | Συγκέντρωση νανοσωματιδίων στο ρευστό, - |
| φ_0 | Γεωγραφικό πλάτος, $^\circ$ |
| ω | Γωνία ώρας, $^\circ$ |

Δείκτες και εκθέτες

| | |
|--------|---|
| Air | Αέρας του περιβάλλοντος |
| am | Περιβάλλον |
| am,m | Μέσο περιβάλλον |
| T_1 | Εξωτερική επιφάνεια της 1 ^{ης} ζώνης της δεξαμενής αποθήκευσης |
| T_2 | Εξωτερική επιφάνεια της 2 ^{ης} ζώνης της δεξαμενής αποθήκευσης |
| T_3 | Εξωτερική επιφάνεια της 3 ^{ης} ζώνης της δεξαμενής αποθήκευσης |
| back | Πυθμένας του συλλέκτη |
| bs | Ρευστό βάσης |
| c | Κάλυμμα |
| cell | Κελί του φωτοβολταϊκού |
| el | Ηλεκτρικός |
| el,sys | Ηλεκτρικός του συστήματος |
| ex | Εξεργειακός |
| ex,sys | Εξεργειακός του συστήματος |
| f | Ρευστό |

| | |
|---------|---|
| fm | Μέσο ρευστό |
| in | Είσοδος |
| ins | Μόνωση |
| loss | Θερμικές απώλειες |
| NEW | Νέο χρονικό βήμα |
| nf | Νανορευστό |
| np | Νανოსωματίδιο |
| OLD | Παλιό χρονικό βήμα |
| out | Έξοδος |
| p | Πλάκα |
| pc | Κάλυμμα πλάκας |
| PV | Φωτοβολταϊκό |
| ref | Αναφορά |
| s | Ηλιακός |
| sky | Ουρανός |
| st | Εγκατάσταση |
| sun | Εξωτερικό στρώμα του Ήλιου |
| s1 | 1 ^η ζώνη της δεξαμενής αποθήκευσης |
| s2 | 2 ^η ζώνη της δεξαμενής αποθήκευσης |
| s3 | 3 ^η ζώνη της δεξαμενής αποθήκευσης |
| s,end | Μέση τιμή ιδιότητας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης στο τέλος της μέρας |
| s,start | Μέση τιμή ιδιότητας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης στην αρχή της μέρας |
| tot,sys | Συνολικός του συστήματος |
| th | Θερμικός |
| th,sys | Θερμικός του συστήματος |

top Κορυφή του συλλέκτη

tot Συνολικός

u Ωφέλιμος

Συντομογραφίες

CPC Συγκεντρωτικός παραβολικός συλλέκτης

ICS Ολοκληρωμένο ηλιακό σύστημα

PV Φωτοβολταϊκό

PVT Θερμοφωτοβολταϊκό-θερμικό φωτοβολταϊκό

1

Εισαγωγή

1.1 Έννοια και μορφές ενέργειας

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια, συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο. Οποιαδήποτε μορφή δράσης, από τα παιδικά παιχνίδια μέχρι τη λειτουργία των μηχανών και από το μαγείρεμα τροφών μέχρι τη γραμμή παραγωγής στο εργοστάσιο, προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας όπως η μηχανική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια, η πυρηνική ενέργεια, η θερμική ενέργεια και η χημική ενέργεια. Η κύρια μονάδα μέτρησης της ενέργειας, της θερμότητας και του έργου στο σύστημα μονάδων SI είναι το Joule (J). Η κινητική και η δυναμική ενέργεια θεωρούνται ως οι δύο μορφές της μηχανικής ενέργειας. Κατά την κίνηση ενός σώματος ή φορτίου σε συντηρητικό πεδίο δυνάμεων, και εφόσον δεν υπάρχουν τριβές, η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και το αντίστροφο, το άθροισμά τους όμως είναι πάντα σταθερό και ίσο με τη μηχανική ενέργεια που αρχικά είχε το σώμα.

- Κινητική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα όταν κινείται και αναφέρεται στην ικανότητά του να παράγει έργο. Εξαρτάται από τη μάζα και την ταχύτητα ενός κινούμενου σώματος.
- Ως Δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα λόγω της θέσεως ή της κατάστασής του, είναι δηλαδή η δυνατότητα του σώματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων. Συγκεκριμένα, η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε ενέργεια θέσεως (π.χ. ένα σώμα σε πεδίο βαρύτητας που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερη θέση παράγοντας έργο) και ενέργεια μορφής ή αλλιώς παραμόρφωσης, που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή (π.χ. το παραμορφωμένο ελατήριο ή λάστιχο). Στην περίπτωση αυτή, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή.
- Πυρηνική ή Ατομική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Είναι, δηλαδή, η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλεισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των

σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια προέρχεται από τη σχάση του πυρήνα ενός ατόμου σε δύο ή περισσότερα σωματίδια από την πρόσκρουση με νετρόνια, με επακόλουθο την απελευθέρωση της δύναμης. Εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

- Η Θερμική ενέργεια αποτελείται από το σύνολο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους. Με τον όρο θερμότητα εννοούμε ειδικά την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων του. Η θερμική ενέργεια μπορεί να είναι και αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας.
- Η Ηλεκτρική ενέργεια αναφέρεται στην κινητική ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού.
- Η Χημική ενέργεια ορίζεται ως το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών από διάφορα άτομα, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Η χημική ενέργεια αποδίδεται συνήθως ως θερμική ή ηλεκτρική, όταν τα μόρια διασπώνται και πάλι σε άτομα ή μετασχηματίζεται στους οργανισμούς σε θερμική και κινητική, με βιολογικούς μηχανισμούς, και ονομάζεται ζωική ενέργεια.

Μεγάλη ποικιλία μορφών ενέργειας βρίσκεται πίσω από τα διαφορετικά φυσικά φαινόμενα. Η ενέργεια, με την οποία τροφοδοτείται ο πλανήτης μας, προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον Ήλιο. Ο ήλιος παρέχει στη γη θερμότητα με την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ημερήσια βάση και η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για μια σειρά δράσεων που οδηγούν στην ενέργεια από τη βιομάζα, το νερό, τον άνεμο, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα (δευτερογενής ηλιακή ενέργεια). Επίσης, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη εδώ και εκατομμύρια χρόνια έχει δημιουργήσει «αποθηκευμένη» ενέργεια, με την μετατροπή των φυτικών και ζωικών υλών σε πετρέλαιο, γαιάνθρακα και φυσικό αέριο, δηλαδή σε ορυκτά ή φυσικά καύσιμα. Αυτή η διεργασία, βεβαίως, γίνεται και σήμερα, αλλά σε πολύ μικρό ρυθμό που δεν μπορεί να συγκριθεί με τον τεράστιο ρυθμό που η σημερινή κοινωνία καταναλώνει αυτούς τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους. Οι ενεργειακοί πόροι που υπάρχουν «αποθηκευμένοι» στη γη αποτελούν την κύρια ενέργεια (capital energy), η οποία μπορεί να υποδιαιρεθεί στις παρακάτω έξι κατηγορίες:

- 1) πρωτογενής ενέργεια (primary energy) είναι η ενέργεια που προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο ή τη γη (ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα),
- 2) δευτερογενής ενέργεια (secondary energy) είναι το σύνολο των μορφών ενέργειας που προκύπτουν από τη μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας μέσω χημικών, φυσικών, μηχανικών, θερμικών ή πυρηνικών δράσεων (π.χ. βενζίνη, ηλεκτρική ισχύς) για να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμη ενέργεια,

3) ανανεώσιμη ενέργεια (renewable energy) είναι οι μορφές δυναμικής ενέργειας, οι οποίες ανανεώνονται σε σταθερό ρυθμό και σχετικά γρήγορα, όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα, η γεωθερμική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια καθώς και η ενέργεια από θάλασσες και ωκεανούς,

4) μη ανανεώσιμη ενέργεια (nonrenewable energy) είναι οποιαδήποτε μορφή δυναμικής ενέργειας που δεν εμπίπτει στον ορισμό της ανανεώσιμης ενέργειας, με παράδειγμα τα ορυκτά καύσιμα,

5) ενέργεια από τη διεργασία της καύσης (combustion process), όπου πολλές από τις δυναμικές μορφές ενέργειας θα πρέπει να αξιοποιηθούν μέσω της διεργασίας της καύσης για να μετατρέψουν την αποθηκευμένη ενέργεια σε έργο, και

6) ενέργεια που δεν περιλαμβάνει διεργασία καύσης (noncombustion process), όπως η υδροϊσχύς και η αιολική ενέργεια, οι οποίες αποτελούν μορφές δυναμικής ενέργειας [1.1].

1.2 Ιστορική αναδρομή των ενεργειακών πηγών

Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος χρησιμοποίησε διάφορες πηγές ενέργειας, μεταξύ των οποίων το ξύλο, ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο ηλεκτρισμός. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά κάποια στοιχεία για την ιστορική τους χρήση και ανακάλυψη. Το Ξύλο αποτελεί το κυρίαρχο καύσιμο όλων των εποχών, χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Ο Άνθρακας, τον οποίο χρησιμοποιούσαν οι κάτοικοι της Ουαλίας κατά την εποχή του χαλκού, αργότερα οι Ρωμαίοι, οι Ινδιάνοι στη Β. Αμερική, οι Κινέζοι, και οι Άγγλοι από τον 12^ο αιώνα. Ο άνθρακας αποτελούσε την κύρια πηγή ενέργειας και ήταν βασική αιτία της ώθησης που δόθηκε στην βιομηχανική επανάσταση. Το Πετρέλαιο αντλήθηκε πρώτη φορά το 1857 στο Αμβούργο και το 1859 στην Πενσυλβανία, αν και ήταν γνωστό σε πολλούς πολιτισμούς, όπως η Εγγύς Ανατολή και η Κίνα. Η πρώτη γεώτρηση του φυσικού αερίου έγινε το 1865 στη Νέα Υόρκη και αρχικά χρησιμοποιούνταν για φωτισμό. Παλαιότερα είχε χρησιμοποιηθεί στην Κίνα και την Ιαπωνία). Για την Ηλεκτρική ενέργεια είναι γνωστό ότι ο Edison ανακάλυψε το 1882 τον ηλεκτρικό λαμπτήρα, ενώ η εταιρία του είχε ιδρυθεί από το 1878 [1.1].

1.3 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες, στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής, και σε αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια. Οι πηγές ενέργειας της δεύτερης κατηγορίας έχουν βασική τους

προέλευση τον ήλιο. Η ενέργεια του ήλιου που φτάνει στη γη με τη μορφή ακτινών, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη, μας παρέχει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας λίμνες και ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλάσσιων ρευμάτων. Απορροφάται από συνδυασμένα υλικά και παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Τέλος, συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας. Η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα) [1.2].

1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται ενεργειακές πηγές όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η βιομάζα, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος σχεδόν αποκλειστικά μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, οπότε και στράφηκε στην έντονη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973, ενισχύθηκε μετά τη δεύτερη κρίση του 1979 και παγιώθηκε κατά την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και, κυρίως, η ουσιαστική τους συμβολή στην ενεργειακή ανεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους δικαιολογούν αυτή τη μεγάλη στροφή. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων που οφείλονται στη δράση της βαρύτητας, κυρίως της Σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της Γης, καθώς και τη γεωθερμική, όπου η ηλιακή ακτινοβολία παίζει δευτερεύοντα ρόλο [1.2].

Οι «ήπιες μορφές ενέργειας», όπως έχει επικρατήσει να ονομάζονται οι μορφές ενέργειας που προέρχονται από την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ταξινομούνται στις ακόλουθες πέντε κατηγορίες:

1. Ηλιακή Ενέργεια: Η ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια της τεχνολογίας γίνεται εκμεταλλεύσιμη. Η ενέργεια που παίρνουμε αποτελεί την ηλιακή ενέργεια. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε εκμεταλλεύσιμη ενέργεια διακρίνονται σε:

α) ενεργητικά ηλιακά συστήματα: μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε θερμότητα,

β) παθητικά ηλιακά και υβριδικά συστήματα: αφορούν κατάλληλες αρχιτεκτονικές λύσεις με παράλληλη χρήση κατάλληλων δομικών υλικών, ώστε να επιτρέπεται η

απευθείας εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, δροσισμό ή φωτισμό, και

γ) φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα: μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.

2. Αιολική Ενέργεια: είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε άλλες εκμεταλλεύσιμες μορφές ενέργειας.

3. Υδραυλική Ενέργεια: είναι η ενέργεια που προέρχεται από τις υδατοπτώσεις. Η ενέργεια αυτή μετασχηματίζεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε άλλες μορφές, κυρίως σε ηλεκτρική ενέργεια.

4. Γεωθερμική Ενέργεια: είναι θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.

5. Βιομάζα: είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, η οποία μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια, με μια σειρά διεργασιών, σε φυτικούς οργανισμούς χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης. Οι φυτικοί αυτοί οργανισμοί αποτελούν τη βιομάζα και μετατρέπονται, κυρίως με καύση, σε άλλες μορφές ενέργειας [1.3].

6. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια: αποτελείται από κύματα ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας, τα οποία διαδίδονται (ακτινοβολούνται) στον ελεύθερο χώρο. Η περιοχή στην οποία αναπτύσσονται τα κύματα αυτά ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζονται με πολλές διαφορετικές μορφές. Για παράδειγμα, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως αλλά και οι ακτίνες Χ αποτελούν μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός [1.4].

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σ' όλο τον αναπτυγμένο κόσμο. Οι ανεξάντλητες (ανανεώσιμες) πηγές ενέργειας έχουν κύρια χαρακτηριστικά το ότι είναι άφθονες και περιβαλλοντολογικά καθαρότερες. Η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων (ρύπανση περιβάλλοντος), αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικά ατυχήματα) αποτελούν σοβαρή αιτία για τα οικολογικά προβλήματα [1.2].

Παρότι η ανανεώσιμη ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, είναι σημαντικό να μην παραβλεφθούν ορισμένες δυσκολίες. Η κύρια δυσκολία που αντιμετωπίζουν σήμερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προκειμένου να ενσωματωθούν στην καθημερινή ζωή, είναι το σχετικά υψηλό κόστος της παραγόμενης kWh τους, σε σχέση με το κόστος της kWh πετρελαίου.

Δεδομένου ότι πρόκειται για αραιές μορφές ενέργειας (μικρής ροής ενέργειας), μέχρι στιγμής, τουλάχιστον, έχουν υψηλό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας τελικής χρήσης. Μεταξύ των δύο κύριων τρόπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας,

αιολικής και φωτοβολταϊκής, η αιολική εμφανίζεται σήμερα οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή, κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο της Δ.Ε.Η. [1.5]. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρειάζονται εφεδρικές συμβατικές πηγές ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από αιολική και ηλιακή ενέργεια είναι διακοπτόμενη και απρόβλεπτη. Κλιματικοί παράγοντες είναι δυνατό να προξενήσουν μεγάλες αυξομειώσεις στη διαθεσιμότητα βιομάζας και υδροηλεκτρικής ενέργειας από το ένα έτος στο επόμενο. Τέλος, η ανάπτυξη διαφοροποιημένου και ασφαλούς ενεργειακού συστήματος, όπου να περιλαμβάνεται υψηλότερο μερίδιο ανανεώσιμης ενέργειας, επί του παρόντος, εξακολουθεί να αποτελεί, εν γένει, πολιτική υψηλότερου κόστους. Εμφανίζονται ήδη βελτιωμένα εργαλεία ανάλυσης και διαχείρισης που θα καταστήσουν δυνατή την ανάπτυξη της κατάλληλης αντιμετώπισης αυτών των προκλήσεων και των σημαντικών εμποδίων. Στα εργαλεία αυτά περιλαμβάνονται: πλέον εξελιγμένα μοντέλα κοστολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τον αντίκτυπο των υψηλότερων μεριδίων ανανεώσιμης ενέργειας στο συνολικό κόστος του ηλιακού συστήματος καθώς και εξελιγμένα εργαλεία μετεωρολογικών προβλέψεων που είναι δυνατό να ενσωματωθούν σε σύγχρονα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης ώστε ο εφοδιασμός να ανταποκρίνεται καλύτερα στη ζήτηση [1.6].

1.5 Προδιαγραφές και νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχοντας υποβληθεί στις παρακάτω δοκιμασίες [1.2]:

1. Θερμικών κύκλων
2. Θερμικού σοκ
3. Ψύξης – υγρασίας
4. Ηλεκτρικής μόνωσης
5. Κρούσεως χαλαζόπτωσης
6. Μηχανικής αντοχής και στρέψης
7. Περιβάλλοντος άλμης
8. Ακτινοβολιών και έκθεσης στο νερό
9. Ηλεκτρικού πεδίου

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει μεγάλα σχέδια για το μέλλον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και πολύ προσοχή έχει κατευθυνθεί προς την παραγόμενη αιολική ενέργεια, με τα έθνη όπως η Αγγλία και η Γερμανία να ανοίγουν το δρόμο παράγοντας το μέγιστο δυνατό από την αιολική ενέργεια στην Ευρώπη. Για αυτόν τον λόγο, το πιο πρόσφατο πλάνο της ευρωπαϊκής επιτροπής είναι να μειώσει την εκπομπή άνθρακα με την επένδυση ενός μεγάλου μέρους των 50 δισεκατομμυρίων ευρώ στην έρευνα και την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας. Το μεγαλύτερο πρόβλημα πάνω στο οποίο δουλεύει η NREL (National Renewable Energy Laboratory) είναι το πώς θα αποθηκεύσουν μέρος της θερμότητας που παράγεται όσο

υπάρχει το φως της μέρας, προκειμένου αυτή να απελευθερωθεί αργότερα. Οι καλές προθέσεις είναι πάντα ευπρόσδεκτες, δεν αρκούν όμως για να ανατρέψουν μία πραγματικότητα που όλοι συμφωνούν πως πρέπει να αλλάξει. Γι' αυτό και η στοχοθέτηση και οι κανονιστικές διατάξεις με αυστηρά χρονοδιαγράμματα αποτελούν μια ουσιαστική εγγύηση για να μπορέσουμε να έχουμε πρακτικά αποτελέσματα. Στην κατεύθυνση αυτή κινείται και η κοινοτική οδηγία 2001/77 «Για την προώθηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας». Στην εσωτερική αγορά ηλεκτρισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης στρατηγικός στόχος είναι η δημιουργία ενός πλαισίου για τη σημαντική αύξηση μεσοπρόθεσμα του προερχόμενου από ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρισμού στην Ευρωπαϊκή Ένωση και η διευκόλυνση της πρόσβασης του σε αυτόν (εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας).

Η προώθηση του ηλεκτρισμού από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αποτελεί πρώτη προτεραιότητα. Η Λευκή Βίβλος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας του 1997 ανέδειξε τον καίριο ρόλο τους σε σχέση με την ασφάλεια της τροφοδοσίας, για την απασχόληση και το περιβάλλον, και πρότεινε έναν ενδεικτικό στόχο διπλασιασμού του μεριδίου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης από 6 σε 12% μέχρι το 2010. Ο στόχος αυτός επικυρώθηκε από το Συμβούλιο το 1998. Ειδικότερα, όσον αναφορά τα περιβαλλοντικά ζητήματα, η αυξημένη χρήση ηλεκτρισμού από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας θα αποτελέσει ένα σημαντικό τμήμα των δράσεων που θα απαιτηθούν ώστε να εκπληρωθούν οι δεσμεύσεις που υιοθετήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο Κιότο σχετικά με την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Τα κυριότερα μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, η αξιοποίηση των καθαρών πηγών ενέργειας, η προστασία των δασών και ο περιορισμός των αερίων ρύπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία δέκα χιλιάδες χρόνια δεν παρατηρήθηκαν θερμοκρασιακές αλλαγές άνω του ενός βαθμού κελσίου μέσα σε ένα αιώνα. Τον 20^ο αιώνα παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,4 - 0,8 βαθμούς κελσίου. Η δεκαετία 1990 - 2000 θεωρείται η θερμότερη για το βόρειο ημισφαίριο και ο Αύγουστος του 2003 ήταν ο θερμότερος στην Ευρώπη προκαλώντας μεγάλο αριθμό θανάτων.

Βιβλιογραφία 1^ο Κεφαλαίου

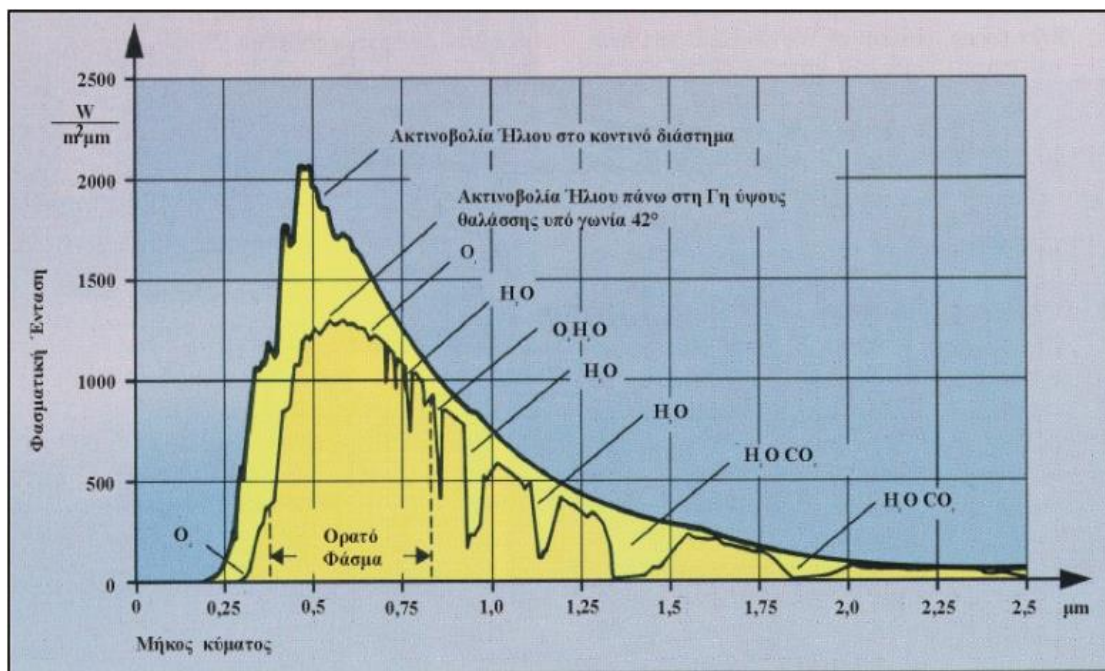
- [1.1] Ανδρίτσος Ν., "Ενέργεια και Περιβάλλον", Βόλος Οκτώβριος 2008
- [1.2] Φραγκιαδάκης Κ., "Ενεργειακή και Οικονομική Πολιτική", 2009
- [1.3] Κουτσούμπας Χ., "Ήπιες μορφές ενέργειας", Ελληνικά γράμματα 2006
- [1.4] <http://www.eekt.gr/LinkClick.aspx?fileticket=kGiaKhidtnc%3D&tabid=102>
- [1.5] Δ. Ασημακόπουλος, Γ. Αραμπατζής, Α. Αγγελής - Δημάκης, Α. Καρταλίδης, Γ. Τσίλιγκιρίδης, ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-Δυναμικό και Τεχνολογίες, Εκδόσεις: "σοφία", Θεσσαλονίκη 2015, ISBN: 978-960-6706-76-9
- [1.6] Κορωνάιος Χ., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό - Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών (Δ.Π.Μ.Σ.), «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ» 2012

2

Μελέτη του Ήλιου

2.1 Φασματική κατανομή της Ηλιακής ακτινοβολίας

Στην εικόνα 2.1 συγκρίνονται οι καμπύλες στις εξής περιπτώσεις: (α) ηλιακό φάσμα εκτός ατμόσφαιρας, (β) καμπύλη μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5762K, (γ) ηλιακό φάσμα στην επιφάνεια της θάλασσας με τον ήλιο στο ζενίθ, (δ) ηλιακό φάσμα στην επιφάνεια της θάλασσας με τον ήλιο στο ζενίθ χωρίς απορρόφηση.[2.1]

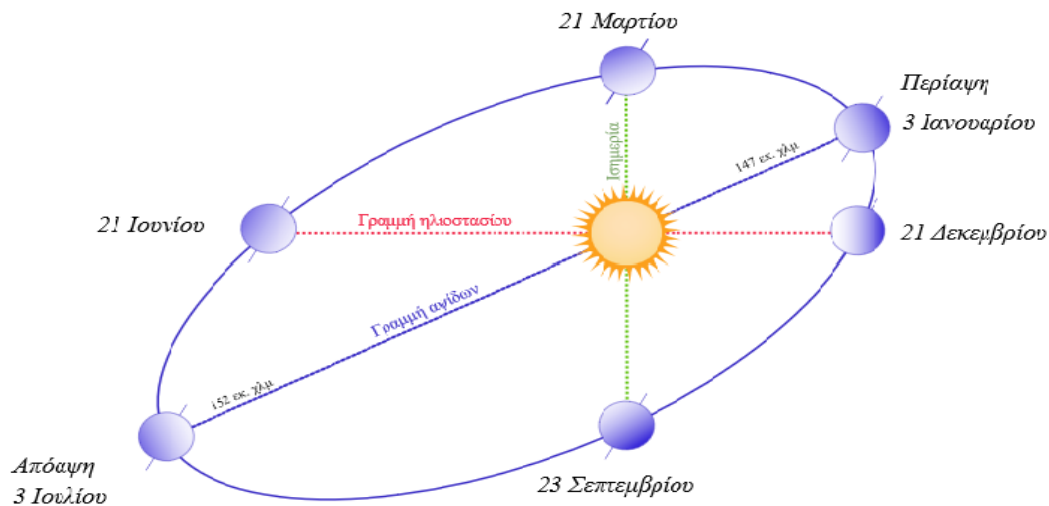


Εικόνα 2.1 : Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας [2.1]

2.2 Η σχετική θέση της Γης ως προς τον Ήλιο

Η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο μπορεί να αναλυθεί σε δύο κύριες συνιστώσες:

1. Περιφορά γύρω από τον ήλιο, σε ελλειπτική τροχιά, με τον ήλιο στη μια από τις δύο εστίες.
2. Περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της.



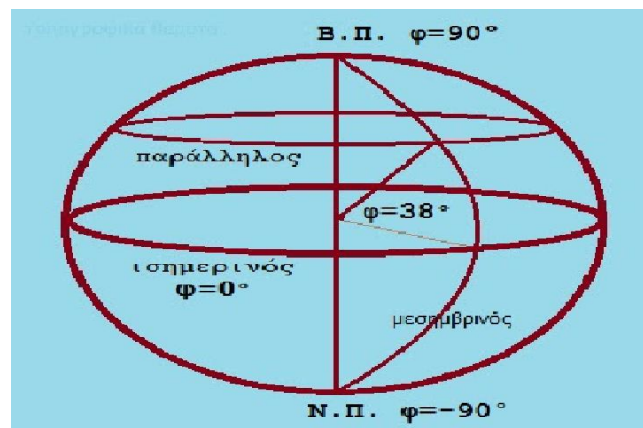
Εικόνα 2.2: Ετήσια περιφορά της γης γύρω από τον Ήλιο [2.2]

2.3 Προσδιορισμός της θέσης του Ήλιου

Ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου για μια επιφάνεια που συλλέγει ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να γίνει γνωρίζοντας τις ακόλουθες πέντε γωνίες:

1. Γεωγραφικό πλάτος φ_0

Το γεωγραφικό πλάτος φ_0 είναι η γωνιακή απόσταση ενός τόπου από τον Ισημερινό. Σε περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου αντιστοιχεί θετική τιμή γεωγραφικού πλάτους.



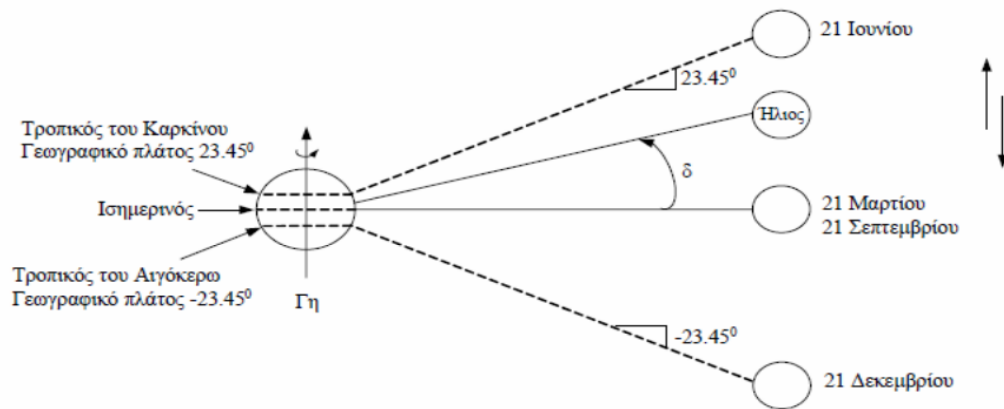
Εικόνα 2.3: Γεωγραφικό πλάτος φ_0 [2.2]

2. Ηλιακή απόκλιση δ

Η ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνία ανάμεσα στην ευθεία ήλιου-γης και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + Day)}{365}\right) \quad (2.1)$$

όπου Day είναι η ημέρα του έτους. Η ηλιακή απόκλιση παίρνει τη μέγιστη τιμή της (23.45°) κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου), και την ελάχιστη τιμή της (-23.45°) κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου).



Εικόνα 2.4: Ηλιακή απόκλιση δ [2.2]

3. Γωνία ώρας ω

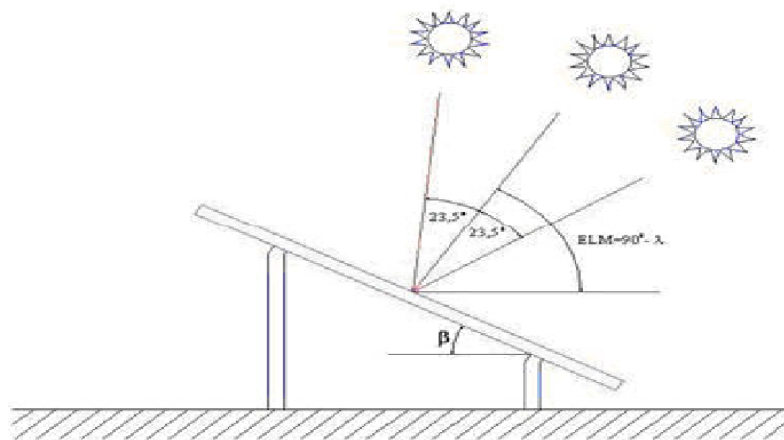
Η γωνία ώρας ω ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία κατά την οποία πρέπει να περιστραφεί ο μεσημβρινός του συγκεκριμένου σημείου για να γίνει παράλληλος προς τις ακτίνες του ήλιου και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \pm \frac{1}{4} \cdot (\text{αριθμός λεπτών από το τοπικό ηλιακό μεσημέρι}) \quad (2.2)$$

Οι γωνίες που αντιστοιχούν τις απογευματινές ώρες λαμβάνονται θετικές. Η γωνία ώρας σχετίζεται με τον ηλιακό χρόνο (t_s), ο οποίος είναι διαφορετικός από το χρόνο που μας δείχνει το ρολόι μας (τοπική ώρα t_c).

4. Κλίση επιφάνειας β_{col}

Η κλίση β_{col} μιας επιφάνειας είναι η γωνία που σχηματίζει σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 2.5: Κλίση επιφάνειας β_{col} [2.3]

5. Γωνία αζιμουθίου γ

Η γωνία αζιμουθίου γ περιγράφει την κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένη μια επιφάνεια. Για τοποθεσίες του βόρειου ημισφαιρίου (όπως η Ελλάδα), μηδενική τιμή του γ αντιστοιχεί σε νότια κατεύθυνση, θετικές τιμές του γ αναφέρονται σε δυτικούς προσανατολισμούς, και αρνητικές τιμές του γ σε ανατολικούς προσανατολισμούς.

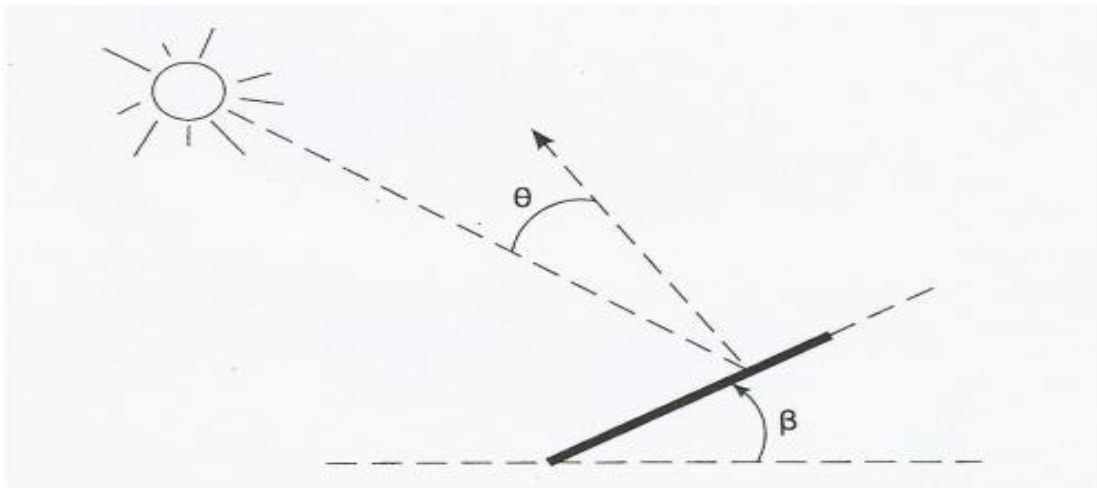
2.4 Ηλιακή Γεωμετρία-Προσδιορισμός γωνιών

Με τη βοήθεια των πέντε γωνιών που περιγράφηκαν προηγουμένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τις ακόλουθες γωνίες:

1. Γωνία πρόσπτωσης θ

Η γωνία πρόσπτωσης θ μιας επιφάνειας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi_0 \cdot \cos\beta_{col} - \sin\delta \cdot \cos\varphi_0 \cdot \sin\beta_{col} \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi_0 \cdot \cos\beta_{col} \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi_0 \cdot \sin\beta_{col} \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta_{col} \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (2.3)$$



Εικόνα 2.6: Γωνία πρόσπτωσης θ [2.2]

2. Γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z

3. Γωνία ύψους του ήλιου α_s

Η γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της κατακόρυφης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta_z = \sin\varphi_0 \cdot \sin\delta + \cos\varphi_0 \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (2.4)$$

Η γωνία ύψους του ήλιου a_s είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών και του οριζόντιου επιπέδου. Ισχύει επομένως ότι:

$$\theta_z + a_s = 90^\circ \quad (2.5)$$

4. Γωνία αζιμουθίου του ήλιου γ_s

Η γωνία αζιμουθίου του ήλιου γ_s είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή των ηλιακών ακτίνων στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου. Θετικές τιμές του γ_s αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου δυτικά της νότιας κατεύθυνσης, και αρνητικές τιμές του γ_s αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου ανατολικά της νότιας κατεύθυνσης. Η γ_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \cdot \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta_z \cdot \sin\varphi_0 - \sin\delta}{\sin\theta_z \cdot \cos\varphi_0} \right) \right| \quad (2.6)$$

όπου $\text{sign}(\omega)$ είναι η συνάρτηση προσήμου της γωνίας ώρας ω , που λαμβάνει

τιμή +1 εάν $\omega > 0$,

τιμή -1 εάν $\omega < 0$,

και τιμή 0 εάν $\omega = 0$.

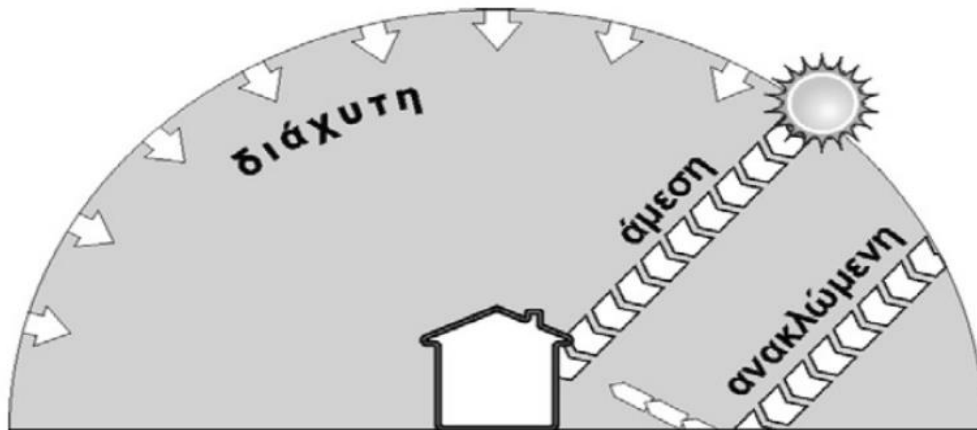
2.5 Ανάλυση Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η ποσότητα της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες: την άμεση (ή απευθείας) ακτινοβολία και τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η άμεση ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα.

Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης με αλλαγμένη διεύθυνση, αφού έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και ανάκλαση από το έδαφος. Επομένως, η διάχυτη ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης με τυχαίες διευθύνσεις από όλο τον ουράνιο θόλο.

Επιπλέον, σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ένα τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προέρχεται και από αυτήν που ανακλάται διάχυτα από το έδαφος.



Εικόνα 2.3: Ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας [2.4]

Δείκτης R_b

Ο δείκτης R_b δίνει το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια προς την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (2.7)$$

Ηλιακή σταθερά

Ως ηλιακή σταθερά ορίζεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας:

$$G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Οι τιμές στην βιβλιογραφία κυμαίνονται από 1353 έως 1395 W/m^2

Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής της ηλιακής σταθεράς G_{on} :

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot \text{Day}}{365}\right)\right) \quad (2.8)$$

Βιβλιογραφία 2^ο Κεφαλαίου

[2.1] Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Αθήνα 2015

[2.2] <http://www.geo.auth.gr/322/chapter041.html>

[2.3] <https://www.sunshine-energy.gr/en/node/67>

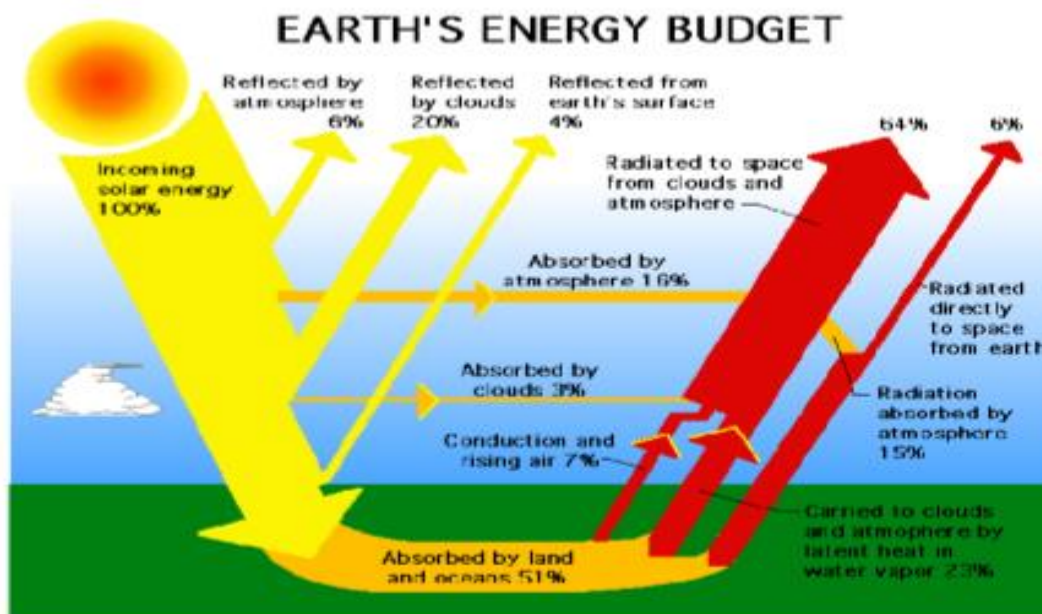
[2.4] <http://solarenergynews.cybercivilian.com/category/solar-energy/>

3

Ηλιακή Ενέργεια και φωτοβολταϊκά

3.1 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται στον ήλιο. Φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας, διαμέσου του διαστήματος, και στη συνέχεια κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές, που οφείλονται στην σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές ανακλάσεις δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και καλείται διάχυτη ακτινοβολία. [3.1]



Εικόνα 3.1: Καταμερισμός της Ηλιακής Ενέργειας [3.2]

Η γη δέχεται ετήσια ηλιακή ενέργεια με ακτινοβολία της τάξης του $173 \times 10^{15} \text{W}$. Σε ένα 24ωρο κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4-6 KWh ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία 800-2500 kWh/m³ ετησίως. Η ποσότητα αυτή είναι περίπου η διπλάσια από αυτή που θα μπορούσε ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών της Γης (πχ. Φυσικό αέριο, άνθρακα κτλ) και περισσότερη από αυτή που καταναλώνει σήμερα ο άνθρωπος σε ένα χρόνο [3.3]. Γι αυτό κρίνεται σκόπιμη η πρακτική εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

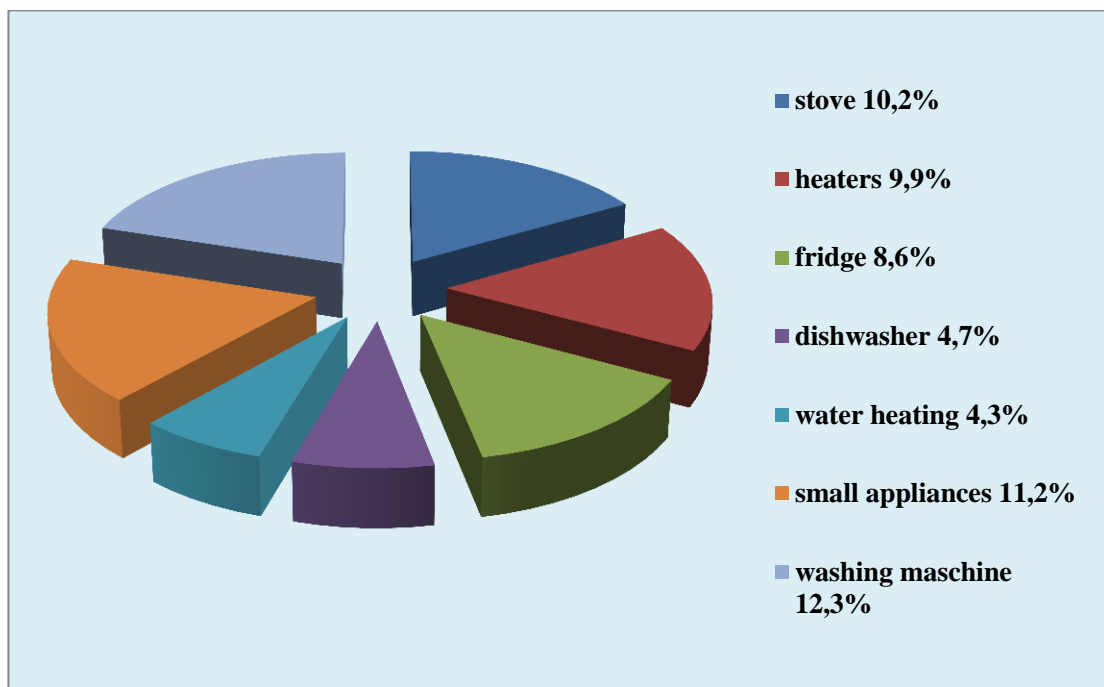
1. την άμεση παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας (με ατμοστρόβιλους). Η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή τη περίπτωση αναφερόμαστε σε θερμική παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια [3.1].

2. την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δύο τρόπους: θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστρόβιλων [3.4]. Η δεύτερη εφαρμογή θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Πλεονεκτήματα χρήσης της ηλιακής ενέργειας:

- Αποτρέπεται η κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κατά συνέπεια οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που προκαλούν τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές [3.5].
- Το φως του ήλιου είναι δωρεάν και διαθέσιμο σε όλο τον πλανήτη. Είναι ανανεώσιμη πηγή και δεν πρόκειται να εξαντληθεί.
- Η ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να απελευθερώνεται αργά και σταδιακά [3.6].
- Η τοποθέτηση ενός ηλιακού συστήματος είναι απλή. Η δε συντήρηση που απαιτεί είναι ελάχιστη [3.5] ενώ η ανθεκτικότητα τους φτάνει τα 25 και άνω έτη λειτουργίας.
- Πρόκειται για απλή και συμφέρουσα λύση καθώς με τη πάροδο του χρόνου τα ηλιακά συστήματα τείνουν να “πληρώνονται μόνα τους”. (μέσος χρόνος αποπληρωμής 4 ετών)
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μηχανήματα μικρής κλίμακας όσο και μεγάλης.
- Είναι η εναλλακτική ενέργεια που φαίνεται ότι μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα στις ανάγκες του μέλλοντος.
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι γενικώς αθόρυβα.
- Τα black-out είναι σπάνια

- Πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να επανατροφοδοτήσει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το κόστος δε μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου όπως συμβαίνει πχ με τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ηλιακή τεχνολογία είναι μια καθ'όλα ώριμη, δοκιμασμένη και αξιόπιστη τεχνολογία.
- Είναι ιδανική για απομονωμένες περιοχές, μακριά από γεννήτριες.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρισμού ακόμα κι όταν έχει συννεφιά.
- Η ενέργεια δε χάνεται κατά τη μεταφορά από τα κεντρικά σημεία, όταν τα καταναμημένα συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία.
- Το πυρίτιο το οποίο χρησιμοποιείται για ημιαγωγούς είναι το δεύτερο σε αφθονία ορυκτό στο πλανήτη [3.6].



Εικόνα 3.2:Κατανομή της Ηλιακής Ενέργειας σε διάφορες εφαρμογές [3.7]

3.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται με τα φωτοβολταϊκά κύτταρα των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο "φωτοβολταϊκό φαινόμενο". [3.1] Η συγκεκριμένη τεχνολογία εμφανίστηκε το 1838 από ένα ζευγάρι Γάλλων επιστημόνων που εργαζόντουσαν για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω χημικών αντιδράσεων. Παρατήρησαν ότι εκθέτοντας την συσκευή που είχαν κατασκευάσει στο ηλιακό φως, αύξησαν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το 1954 τα εργαστήρια Bell ανακοίνωσαν τις εξελίξεις που μετέφεραν τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία από τα εργαστήρια στην καθημερινή πρακτική αξιοποίησης, με την κατασκευή μίας μονής φωτοβολταϊκής κυψέλης από σιλικόνη. [3.7] Πρώτη φορά

εφαρμόστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ. Η εξέλιξή της επέτρεψε τη μείωση του κόστους (~4% το χρόνο) [3.6] στην παραγωγή ηλεκτρισμού από 300\$ σε 4\$ ανά Watt. Λόγω της σχετικά χαμηλής απόδοσής τους και του συνεπαγόμενου υψηλού συνολικού κόστους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκουν κυρίως εφαρμογή ως μονάδες μικρής δυναμικότητας σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή. [3.4]

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ή φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι κρυσταλλοδιόδοι οι οποίες αποτελούνται από ημιαγωγούς (φτιαγμένους από ημιαγώγιμα υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα της φωτοαγωγιμότητας, να απορροφούν δηλαδή φωτόνια και να μεταδίδουν την ενέργεια τους αυτή σε χωριστά ηλεκτρόνια.). Το πυρίτιο είναι το πιο συχνό υλικό που χρησιμοποιείται στη κατασκευή ημιαγωγών για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους.

Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο δημιουργείται με την τοποθέτηση ενός λεπτού στρώματος πυριτίου ενισχυμένου με φώσφορο, σε επαφή με ένα στρώμα από πυρίτιο ενισχυμένο με Βόριο. [3.8]

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ισχύς καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο. [3.9]

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 άτομα αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει τα υπολειπόμενα 4 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου. Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού καθώς δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια όπως στην περίπτωση του μεταλλικού πλέγματος. Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι σημαντικά περιορισμένος για να χρησιμεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό εισάγονται ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως π.χ. φωσφόρου. Η εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια εκ των οποίων τα 4 συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, ενώ το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια του πυρήνα. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απαιτεί σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια



ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρόσμιξη του κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί ημιαγωγό τύπου N.

Όταν προστίθεται στο κρυσταλλικό πυρίτιο βόριο προκύπτουν ημιαγωγοί τύπου P. Το βόριο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 3 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με άτομα πυριτίου. Επειδή σε κάθε άτομο απαιτούνται 8 ηλεκτρόνια για τη συμπλήρωση της εξωτερικής τους στοιβάδας, στην εξωτερική στοιβάδα του βορίου υπάρχουν διαθέσιμες 2 ελεύθερες θέσεις ηλεκτρονίων, δημιουργώντας αντίστοιχες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Η κατάληψη των οπών από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων δίνει την εικόνα διάδοσής τους στο υλικό ή μεταφοράς θετικών φορτίων στην κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού. [3.4]

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου N και P σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου P για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N αλλά όχι αντίστροφα. Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση P-N ημιαγωγών, το πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό N και θα οδηγήσει την οπή στο πυρίτιο P. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγωγή οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος. Το μέγιστο θεωρητικό ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι περίπου το 25% της ενέργειας που δέχεται, αλλά το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι λιγότερο από 15%. Καθώς η ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, αποτελείται από φάσμα διαφορετικών μηκών κυμάτων, άρα και από φωτόνια διαφορετικών επιπέδων ενέργειας. Τα φωτόνια χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου δεν μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και απλώς διέρχονται μέσα από το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Μόνο τα φωτόνια που μεταφέρουν μεγαλύτερη ή ίση ενέργεια από ένα συγκεκριμένο ποσό που εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Η τεχνολογία των ημιαγωγικών υλικών επέτρεψε την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς ενδεχόμενη χρήση αγωγικών υλικών, όπως τα μέταλλα, θα οδηγούσε μεν σε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων αλλά θα παρουσίαζε πολύ χαμηλή τάση πεδίου.[3.4]

Η μέγιστη πραγματική απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, κυμαίνεται από 7% (ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου) έως 12-

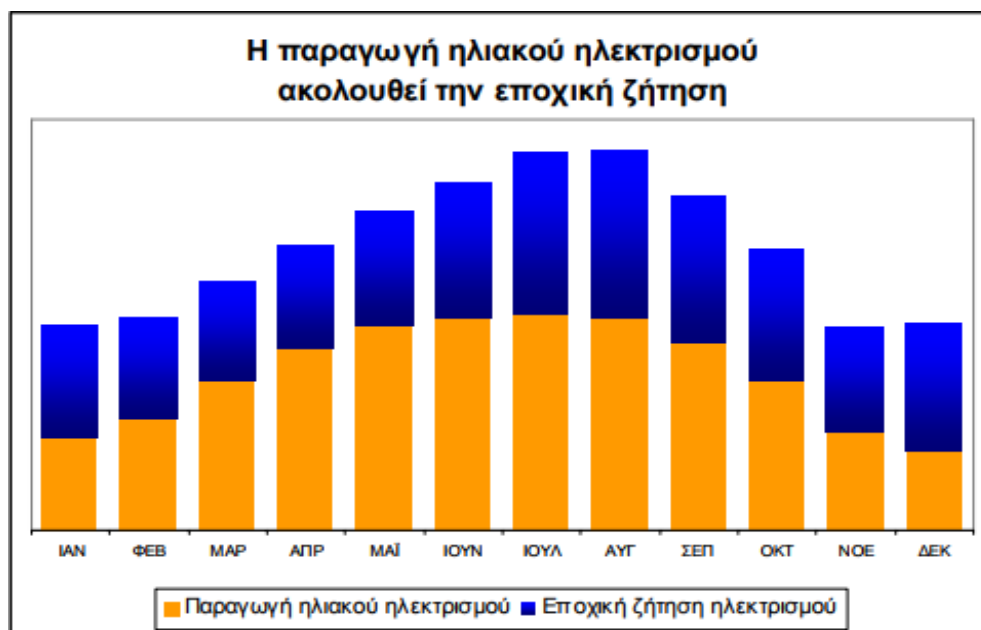
15% (ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). [3.4] Η απόδοση επίσης εξαρτάται από τη τοποθεσία, το προσανατολισμό και τη κλίση. Τα φωτοβολταϊκά έχουν τη μέγιστη απόδοση όταν έχουν νότιο προσανατολισμό. [3.10]

| Ενδεικτική απόδοση ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση | | | |
|---|---|---------------------------------|-----------------------|
| |  | | |
| Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο | Προσανατολισμός | | |
| | Νότιος | Νοτιοανατολικός Νοτιοδυτικός | Ανατολικός Δυτικός |
| 0 °  | 90% | 90% | 90% |
| 15 °  | 98% | 95% | 88% |
| 30 °  | 100% | 95% | 85% |
| 90 °  | 60% | 60% | 50% |

Εικόνα 3.3: Συσχετισμός βαθμού απόδοσης φ/β με τον προσανατολισμό [3.10]

Ας σημειωθεί ότι 1kWp (ισχύος αιχμής του Φ/Β συστοιχίας σε κατάσταση πλήρους ηλιοφάνειας 1000W/m² και θερμοκρασία 25°C) Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου ανάλογα με την απόδοση που διαθέτει, παράγει κατά μέσο όρο 1.350 kWh το χρόνο (με ηλιοφάνεια Αττικής), πάνω σε σταθερή βάση στήριξης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα Φ/Β συστήματα παρακολούθησης του ήλιου σε 2 άξονες αποδίδουν περίπου 25 με 30% επιπλέον ενέργεια το χρόνο στην Ελλάδα ενώ το κόστος τους είναι 10 με 15% ανώτερο από αυτό των Φ/Β συστημάτων σε σταθερές βάσεις. Ένα Φ/Β σύστημα 100 kW παράγει ετησίως ενέργεια 13.500 kWh [3.11]

Μελέτες σε περιοχές με αντίστοιχες κλιματικές συνθήκες με την Ελλάδα έδειξαν ότι κάθε μεγαβάτ (MW) φωτοβολταϊκών υποκαθιστά έως και 0,8 MW συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής τις καλοκαιρινές ώρες αιχμής. Ο μέσος συντελεστής εγγυημένης ισχύος (capacity credit) των φωτοβολταϊκών σε ετήσια βάση είναι, για περιοχές σαν τη δική μας, 64% και ανέρχεται σε 80% τις καλοκαιρινές ώρες αιχμής. [3.10]



Εικόνα3.4: Η Παραγωγή Ηλιακού Ηλεκτρισμού ανάλογα με την εποχή [3.10]

Σαν κυριότερες κατηγορίες εφαρμογών Φ/Β συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

Καταναλωτικά προϊόντα (1mW–100 Wp)

Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας ισχύος όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, εξωτερικός φωτισμός κήπων, ψύξη και προϊόντα όπως μικροί φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φανοί κ.ά.

Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100 Wp –200k Wp)

Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για:

- Ηλεκτροδότηση Ιερών Μονών.
- Αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού.
- Συστήματα εξωτερικού φωτισμού δρόμων, πάρκων, αεροδρομίων κλπ.
- Συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού.
- Συστήματα σηματοδότησης οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας κλπ.
- Αγροτικές εφαρμογές όπως άντληση νερού, ιχθυοκαλλιέργειες, ψύξη αγροτικών προϊόντων, φαρμάκων κλπ.

Μεγάλα Διασυνδεδεμένα στο Δίκτυο Φ/Β Συστήματα

Η κατηγορία αυτή αφορά Φ/Β σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγέθους 50kWp έως μερικά MWp, στους οποίους η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα – Οικιακός Τομέας

Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν Φ/Β συστήματα τυπικού μεγέθους 1,5kWp έως 20kW, τα οποία έχουν εγκατασταθεί σε στέγες ή προσόψεις κατοικιών και τροφοδοτούν άμεσα τις καταναλώσεις του κτιρίου, η δε πλεονάζουσα ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, η κατηγορία αυτή αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς Φ/Β συστημάτων. [3.12]

3.3 Απόσβεση της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία όταν προσπίπτει κάθετα σε μία επιφάνεια πάνω στην επιφάνεια της γης, υπόκειται σε ίδιες αιτίες διακύμανσης με την ακτινοβολία που προσπίπτει εξωτερικά της ατμόσφαιρας και σε δύο επιπρόσθετα και πιο σημαντικά φαινόμενα, (1) της ατμοσφαιρικής σκέδασης από μόρια του αέρα, του νερού και της σκόνης και (2) της ατμοσφαιρικής απορρόφησης από το O₃, το H₂O και το CO₂.

Η σκέδαση της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις αυτής με μόρια του αέρα, του νερού (ατμού ή σταγονίδια), και της σκόνης. Ο βαθμός της σκέδασης είναι συνάρτηση του μήκους της διαδρομής μέσω της οποίας η ακτινοβολία περνάει και του μεγέθους των σωματιδίων σχετικά με το λ, το μήκος κύματος δηλαδή της ακτινοβολίας. Το μήκος της διαδρομής μέσω της οποίας η ακτινοβολία περνάει μετράται με την αέρια μάζα. Ο αριθμός των μορίων του νερού και της σκόνης που συναντά η ακτινοβολία κατά το πέρασμά της εξαρτάται λοιπόν τόσο από την αέρια μάζα όσο και από τις ποσότητες σκόνης και υγρασίας της ατμόσφαιρας οι οποίες είναι συνάρτηση της συγκεκριμένης περιοχής και της ώρας.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στο φάσμα της ηλιακής ενέργεια οφείλεται κυρίως στο όζον για το φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας και στο νερό και το διοξείδιο του άνθρακα για το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Υπάρχει σχεδόν απόλυτη απορρόφηση των χαμηλού-μήκους κύματος ακτινοβολιών από το όζον στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας σε μήκη κύματος μικρότερα από 0,29μm. Η απορρόφηση του όζοντος μειώνεται όσο αυξάνεται το λ σε τιμές μεγαλύτερες από 0,29μm, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές από 0,35μm είναι μηδενική. Υπάρχει επίσης μια ασθενής ζώνη απορρόφησης του όζοντος κοντά στα 0,6μm.

Οι υδρατμοί απορροφούν κυρίως στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας με ισχυρές απορροφητικές ζώνες με κέντρα στα 1.0, 1.4 και 1.8μm. Πέρα από τα 2.5μm, η περατότητα της ατμόσφαιρας είναι μικρή εξαιτίας της απορρόφησης από το H₂O και το CO₂. Εξάλλου, η ενέργεια στο φάσμα της ακτινοβολίας της εξωτερικά από την ατμόσφαιρα για λ μεγαλύτερα από 2.5μm είναι λιγότερη από 5% της ολικής

ενέργειας, έτσι και η ενέργεια που λαμβάνεται από το έδαφος για αυτά τα μήκη κύματος είναι πολύ μικρή.

Έτσι, η κάθετη ακτινοβολία που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα της γης έχει φασματική κατανομή όπως αυτή παρουσιάστηκε στην εικόνα 2.1. Όμως το φάσμα των ακτινών X και των άλλων πολύ χαμηλού μήκους κύματος ακτινοβολιών απορροφάται σε μεγάλο υψόμετρο στην ιονόσφαιρα από το άζωτο, το οξυγόνο και τα άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας. Το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφάται από το όζον. Σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 2.5μm, ένα συνδυασμός μικρής εξωγήινης ακτινοβολίας και ισχυρής απορρόφησης από το CO₂ έχει ως αποτέλεσμα μικρά ποσά ενέργειας να φτάνουν στο έδαφος. Έτσι, από την σκοπιά των εφαρμογών στην επιφάνεια της γης, μόνο η ακτινοβολία σε μήκη κύματος μεταξύ 0,29 και 2,5 μm πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

3.4 Εισαγωγή στους Ηλιακούς συλλέκτες

Οι συλλέκτες είναι εγκαταστάσεις, οι οποίες ουσιαστικά χρησιμοποιούνται για την συλλογή και την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε χρήσιμη θερμική ενέργεια (συνηθέστερα θερμική ενέργεια νερού). Χωρίς του συλλέκτες, η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας θα μας ήταν 'άχρηστη'. Τα 2 βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών είναι οι επίπεδοι και οι συγκεντρωτικοί. Η κατασκευαστική τους διαφορά είναι ότι οι μεν επίπεδοι είναι επίπεδες επιφάνειες στην οποία γίνεται η αξιοποίηση της ακτινοβολίας, ενώ στους συγκεντρωτικούς υπάρχει συνήθως μια ανακλαστική επιφάνεια η οποία συγκεντρώνει την ακτινοβολία σε ένα σημείο/ή μια ευθεία. Η λειτουργική τους διαφορά είναι ότι οι επίπεδοι συλλέκτες κάνουν χρήση κυρίως της διάχυτης ακτινοβολίας ενώ οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες αξιοποιούν κυρίως την άμεση ακτινοβολία. Το βασικό πλεονέκτημα των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων έναντι των επίπεδων είναι ότι οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες επιτυγχάνουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και αποδίδουν μεγαλύτερες ισχύεις. Από την άλλη μεριά όμως είναι πολύ πολυπλοκότερα συστήματα και πολύ πιο ακριβά.

3.5 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Πρώτο βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο λόγος συγκέντρωσης. Ειδικότερα ο λόγος συγκέντρωσης είναι το πηλίκο της επιφάνειας "παραθύρου" ή "ανοίγματος" προς την επιφάνεια του δέκτη. Επιφάνεια παραθύρου ορίζεται η επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία, A_a (m²) και επιφάνεια του δέκτη είναι η επιφάνεια που απορροφά την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία A_r (m²)

$$C=A_a/A_r \quad (3.1)$$

Ο λόγος συγκέντρωσης κυμαίνεται από 1.5 έως 10.000. Όσο αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αλλά και η ακρίβεια κατασκευής και η ποιότητα του οπτικού συστήματος. Η υψηλότεροι συντελεστές συγκέντρωσης συναντώνται σε εργαστηριακές εφαρμογές στις οποίες αναπτύσσονται

πολύ μεγάλες θερμοκρασίες. Στις πραγματικές εγκαταστάσεις συναντώνται μικροί ή μεσαίοι λόγοι συγκέντρωσης. Τα δύο βασικά μέρη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής και ο δέκτης. Ο συγκεντρωτής αποτελείται από τα κάτοπτρα τα οποία συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στον δέκτη. Ο δέκτης περιλαμβάνει τον απορροφητή με το σύστημα μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως θερμική ενέργεια του ρευστού και μπορεί να είναι κυρτός, επίπεδος, κοίλος, καλυμμένος ή ακάλυπτος.

Ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι:

(α) Ανακλαστικός ή διαθλαστικός

(β) Επιμήκης (κυλινδρικός) ή κυκλικός. Ο επιμήκης συγκεντρωτής χαρακτηρίζεται ως δισδιάστατος και εστιάζει σε ευθεία γραμμή. Αν η κάθετος τομή του προς την ευθεία αυτή είναι παραβολή, τότε ονομάζεται παραβολικός συγκεντρωτής. Ο κυκλικός συγκεντρωτής είναι επιφάνεια εκ περιστροφής (π.χ. σφαίρα ή παραβολοειδές), εστιάζει σε σημείο και χαρακτηρίζεται ως τρισδιάστατος.

(γ) Συνεχής ή αποτελούμενος από τμήματα

(δ) Χωρίς είδωλο ή με είδωλο. Οι συγκεντρωτές χωρίς είδωλο δίδουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης ($C < 10$) και δεν σχηματίζουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ηλίου πάνω στον απορροφητή. Οι συγκεντρωτές με είδωλο δίδουν είδωλο πάνω στον απορροφητήρα και οι επιτυγχανόμενοι λόγοι συγκέντρωσης μπορούν να φθάσουν σε πολύ υψηλές τιμές.

Η βασική αρχή των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ότι αποτελούνται από μια ανακλαστική επιφάνεια (το σχήμα και η θέση της οποία χαρακτηρίζει και το είδος του συλλέκτη) και από ένα σημείο/ευθεία εστίασης-συγκέντρωσης της ακτινοβολίας που ανακλάται. Από αυτό το σημείο/ευθεία εστίασης διατρέχει συνήθως κάποιο ρευστό το οποίο προσλαμβάνει την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια του ρευστού μέσω αύξησης της θερμοκρασίας του.

Τα βασικά είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι τα εξής:

- Παραβολικά ηλιακά κοίλα (parabolic trough)
- Ηλιακός πύργος ισχύος (solar power tower)
- Συλλέκτες Fresnel
- Ηλιακός δίσκος (dish stirling)
- Συλλέκτες τύπου CPC

Τα διάφορα είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών διαφέρουν ως προς διάφορα κατασκευαστικά και λειτουργικά σημεία. Κάποια κύρια σημεία είναι:

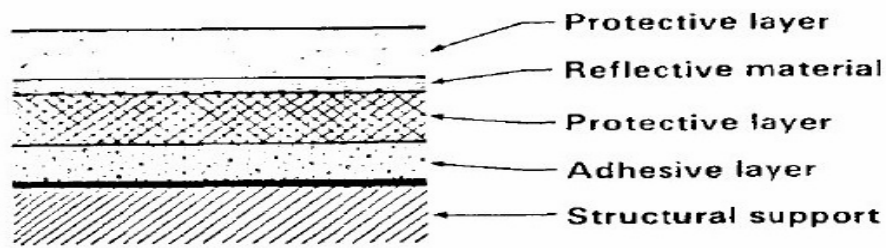
- Σταθερότητα συγκεντρωτή
- Σταθερότητα σημείου εστίασης (δέκτη)
- Θερμοκρασία λειτουργίας
- Αποδιδόμενη ισχύς
- Βαθμός απόδοσης
- Μέγεθος, πολυπλοκότητα και κόστος συστήματος

Έτσι λοιπόν ανάλογα με τις ανάγκες και τις δυνατότητες σε κάθε περίπτωση που αφορά την εγκατάσταση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος, εκτιμώνται οι παραπάνω παράμετροι και γίνεται επιλογή του βέλτιστου συστήματος για την κάθε περίπτωση. Παρακάτω θα γίνει ανάλυση του κάθε συστήματος με την παρουσίαση των βασικών κατασκευαστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών.

3.5.1 Ηλιακός Πύργος

Ο ηλιακός πύργος ή και συλλέκτης με κεντρικό δέκτη (στα αγγλικά γνωστός ως solar power tower ή central tower ή heliostat) αποτελεί ένα τύπο συγκεντρωτικού συλλέκτη στον οποίο υπάρχει ένας κεντρικός πύργος ο οποίος φέρει το δέκτη(ή και στόχο όπως αναφέρεται συχνά) στον οποίο και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία τα διάφορα κάτοπτρα (ανακλαστικοί συγκεντρωτές ή και ηλιοστάτες). Τα κάτοπτρα είναι επίπεδα και συνήθως κινούμενα. Στην συνέχεια η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία αποδίδεται για την θέρμανση νερού και την μετατροπή του σε ατμό ώστε έπειτα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια συνήθως σε συμβατικό κύκλο Rankine. Νέα σχέδια που χρησιμοποιούν υγρό νάτριο έχουν επιδειχθεί και συστήματα που χρησιμοποιούν άλατα (40% νιτρικό άλας καλίου) ως το λειτουργικό υγρό βρίσκονται τώρα σε χρήση. Αυτά τα λειτουργικά υγρά έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, ιδιότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση ενέργειας. Με την αποθήκευση ενέργειας ανοίγονται δυνατότητες για την παραγωγή ατμού ακόμα και σε στιγμές χωρίς ηλιοφάνεια. Γενικά τέτοιες κατασκευές στις οποίες ο ανακλαστήρας αποτελείται από τμήματα (επιμέρους επίπεδα κάτοπτρα) απαιτείται ο σωστός σχεδιασμός ώστε να μην σκιάζει το ένα κάτοπτρο το άλλο καθώς επίσης και να μην εμποδίζει κανένα κάτοπτρο την ανακλώμενη ακτινοβολία κάποιου γειτονικού του κατόπτρου. Σε κάποιες εγκαταστάσεις όπου υπάρχει περιθώριο μεγαλύτερης επένδυσης χρησιμοποιούνται αντί επίπεδων, κοίλοι συλλέκτες. Επίσης στην όλη εγκατάσταση τοποθετείται και κατάλληλο σύστημα παρακολούθησης της θέσης των κατόπτρων καθώς και σύστημα μετακίνησής τους σε κατάλληλη θέση για να παρακολουθούν τον ήλιο. Συνήθεις εγκαταστάσεις είναι ισχύος 10-400 [MWe]. Τέτοιες εγκαταστάσεις εκτείνονται σε 1.500.000-2.300.000 m² γεγονός που κάνει τους ηλιακούς πύργους συμφέροντες σε περιπτώσεις υψηλής ακτινοβολίας και χαμηλού κόστους γης, ώστε το επενδυτικό κόστος να παραμένει σε φυσιολογικά όρια. Τέλος να αναφέρουμε ότι τα κύρια υλικά ενός ηλιοστάτη είναι 87% προϊόντα χάλυβα και καθρέπτες και η ανακλαστική επιφάνεια βρίσκεται πίσω από ένα διαφανές υπόστρωμα. Η δομή της κατασκευής αποτελείται από μια στήριξη από

χάλυβα, ένα συγκολλητικό στρώμα, ένα προστατευτικό στρώμα από χαλκό, μια στρώση από ανακλαστικό ασήμι και ένα προστατευτικό στρώμα από χοντρό γυαλί όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 3.5.



Εικόνα3.5 : Υλικά της ανακλαστικής επιφάνειας [3.6]

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων



Εικόνα3.6 : Ηλιακός πύργος από τον σταθμό PS10 (Ισπανία) [11 MW] [3.13]



Εικόνα 3.7 : Ηλιακός πύργος από τον σταθμό Crescent Dunes Solar Energy Project (Η.Π.Α.) [110 MW] [3.13]

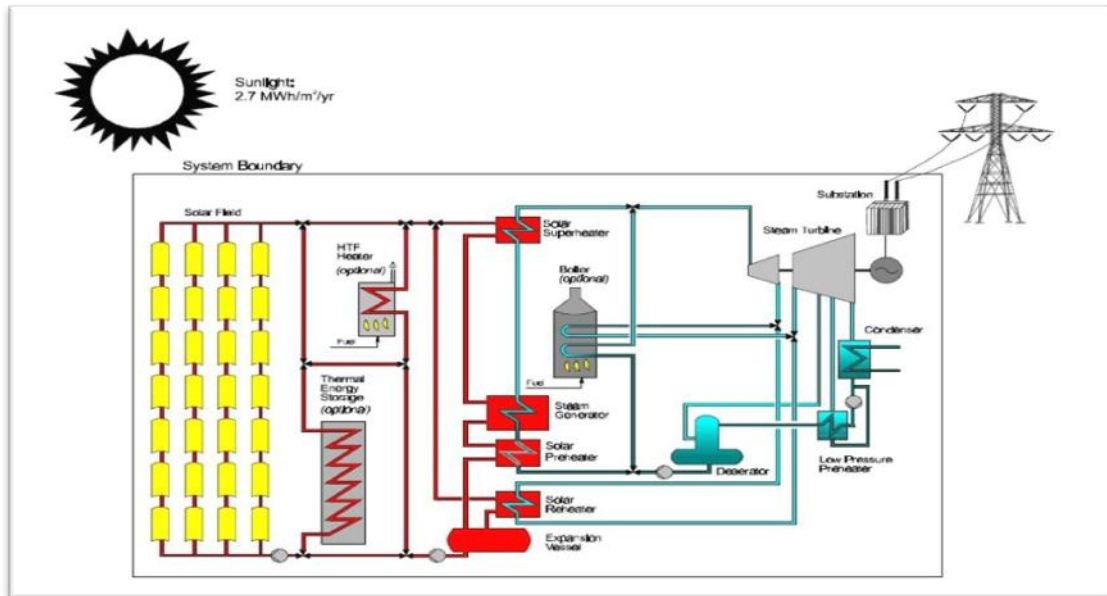
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρείται η εκτενής έκταση που λαμβάνει ένας τέτοιος σταθμός.

3.5.2 Παραβολικά Ηλιακά κοίλα

Οι εγκαταστάσεις παραβολικών συλλεκτών αποτελούνται από παραβολικά κάτοπτρα τα οποία είναι γραμμικά κατά την μια διάσταση ενώ η προβολή του στις άλλες δύο διαστάσεις αποτελεί παραβολή. Τα παραβολικά ηλιακά κοίλα συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στην γραμμή εστίασης, στην οποία συνήθως τοποθετείται ο αγωγός στον οποίο ρέει το προς θέρμανση ρευστό. Τα ηλιακά κοίλα αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα ηλιακά θερμικά συστήματα για την ηλεκτροπαραγωγή. Το ρευστό το οποίο θερμένεται σε θερμοκρασίες 150-350 °C, ατμοποιείται και στην συνέχεια εισέρχεται ως επί το πλείστο σε κύκλο Rankine. Τα κάτοπτρα συνήθως είναι ευθυγραμμισμένα στην ευθεία βορρά-νότου και έχουν την δυνατότητα περιστροφής για την καλύτερη ‘παρακολούθηση’ του ήλιου και την αποτελεσματικότερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Εναλλακτικά ο συλλέκτης ευθυγραμμίζεται στην κατεύθυνση δύσης-ανατολής, με μικρότερη αποτελεσματικότητα στην συγκέντρωση της ακτινοβολίας λόγω απωλειών συνημιτόνου αλλά δεν χρειάζεται σύστημα παρακολούθησης του ήλιου. Οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με παραβολικά κάτοπτρα είναι υβριδικοί σταθμοί, καθώς χρησιμοποιούν και ορυκτά καύσιμα για τη παραγωγή ατμού σε περιπτώσεις νέφωσης ή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Βέβαια υπάρχει ανώτατο όριο του ποσοστού κάλυψης

της ισχύος του σταθμού από συμβατικά καύσιμα και αυτό για να αποτελεί ο σταθμός ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το όριο αυτό ποικίλει από χώρα σε χώρα. Οι παραπάνω σταθμοί συναντώνται σε ισχύς έως και 350 MWe.

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται ένα βασικό σχέδιο ενός σταθμού με παραβολικά κάτοπτρα, τα οποία δημιουργούν ατμό, ο οποίος χρησιμοποιείται σε κύκλο Rankine:



Εικόνα 3.8 : Σύστημα παραβολικών κατόπτρων και θερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής κύκλου Rankine [3.14]

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από εγκαταστάσεις παραβολικών ηλιακών κοίλων:



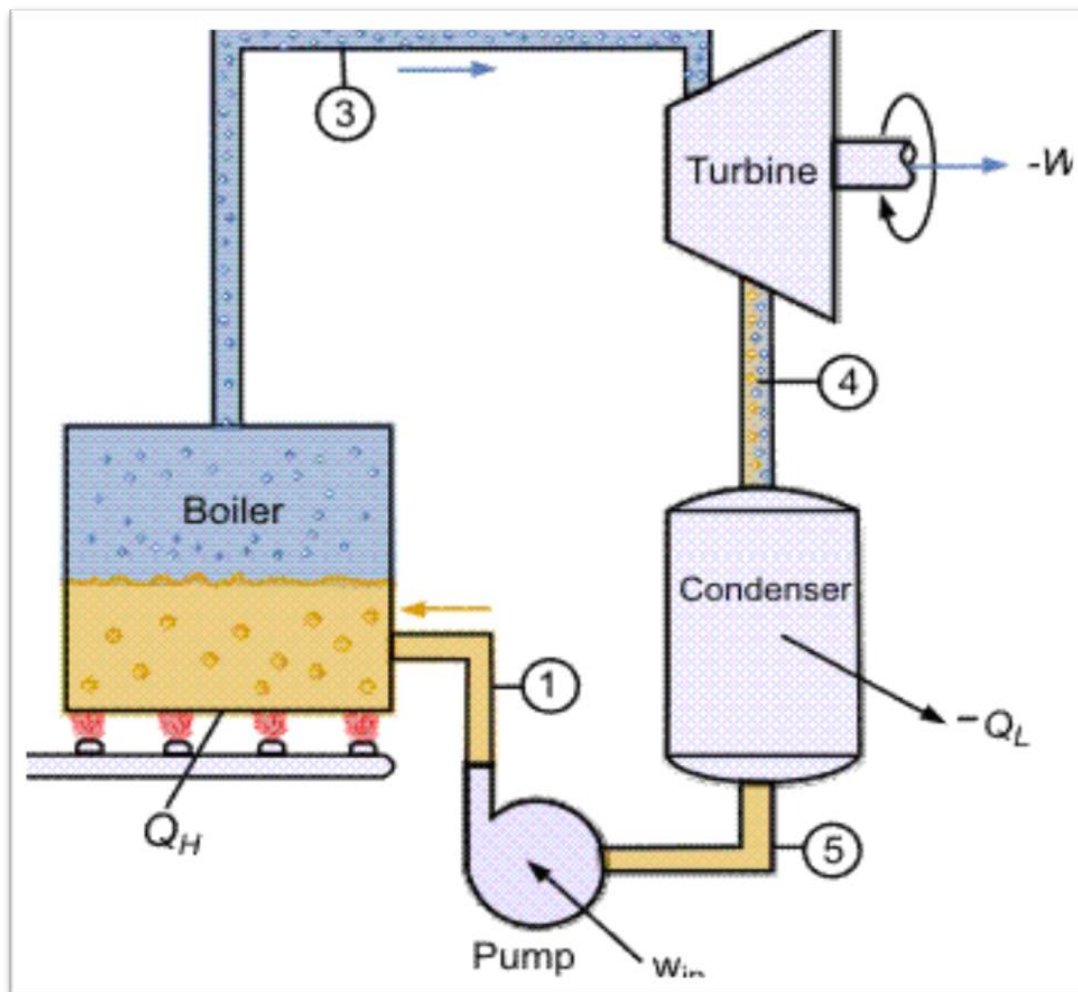
Εικόνα 3.9: : Παραβολικά κάτοπτρα από το σταθμό Solar Energy Generating Systems (SEGS) στην Καλιφόρνια (U.S.A.) [394 MW] [3.15]



Εικόνα 3.10 : Παραβολικά κάτοπτρα από το σταθμό Andasol solar power station στην Ισπανία [150 MW] [3.15]

Εδώ είναι χρήσιμο να περιγράψουμε τον κύκλο Rankine, καθώς είναι ο βασικός κύκλος ηλεκτροπαραγωγής με τον ατμό που δημιουργείται από τα κάτοπτρα. Αναλυτικότερα ο ατμός εισέρχεται σε μια τουρμπίνα, η οποία στρέφει μια γεννήτρια. Στη συνέχεια, από την έξοδο της τουρμπίνας, εξέρχεται σε κατάσταση συνήθως κορεσμένου ατμού και στην συνέχεια συμπυκνώνεται στον ψύκτη, από τον οποίο εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου νερού. Στην συνέχεια μέσω αντλιών επιτυγχάνεται πίεση στο νερό, ίση με την πίεση λειτουργίας της τουρμπίνας και διέρχεται από τους απορροφητές του δέκτη του συλλέκτη. Αυτός αποτελεί τυπική μορφή ενός κύκλου Rankine, στον οποίο ανάλογα την περίπτωση και με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης, δύναται να υπάρξει αναθέρμανση ατμού χρησιμοποιώντας ορυκτό καύσιμο.

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες περιγραφής του κύκλου Rankine:



Εικόνα 3.11 : Τυπικός κύκλος Rankine [3.16]

Όπου στη θέση του boiler υπάρχει ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος προσδίδει στο διακινούμενο ρευστό τη θερμότητα από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες.

3.5.3 Συλλέκτης τύπου CPC

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (Compound parabolic Concentrators) είναι συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας και περιέχουν στοιχεία τόσο από συγκεντρωτικούς συλλέκτες όσο και από επίπεδους συλλέκτες. Αυτό γιατί δεν συγκεντρώνουν απλά την ηλιακή δέσμη στο δέκτη με έναν ανακλαστήρα αλλά αξιοποιούν και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία όπως οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Η αξιοποίηση γίνεται υπό ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης και έτσι υπάρχουν ελάχιστες απαιτήσεις για την παρακολούθηση του ήλιου. Ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών χωρίς είδωλο και επιτυγχάνουν μικρούς λόγους συγκέντρωσης. Οι συγκεντρωτές με δύο άξονες μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερους λόγους συγκέντρωσης αλλά η

επιβάρυνση και τα προβλήματα της συντήρησης του εξοπλισμού τους κάνουν λιγότερο αποδοτικούς οικονομικά.

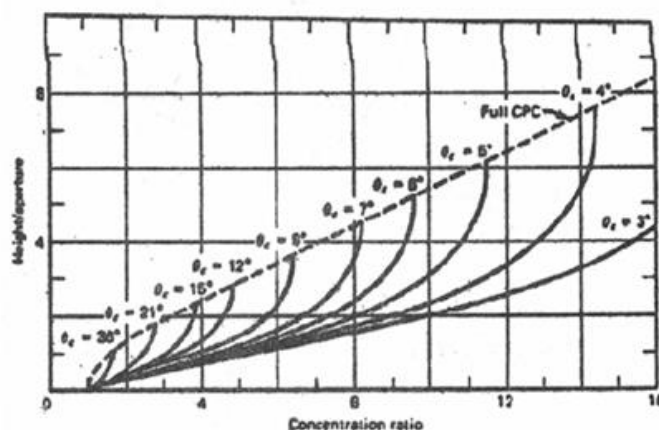
Η συνηθέστερη μορφή των συλλεκτών CPC είναι η διδιάστατη τύπου σκάφης. Και οι δύο παραβολικές επιφάνειες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του CPC. Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του CPC και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος, ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής θ_c . Αν οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι (οπτικά) τέλειες, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία θ , έτσι ώστε $-\theta_c < \theta < \theta_c$, ανακλάται προς το δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του CPC. Για $\theta < -\theta_c$ ή $\theta > \theta_c$ η ακτινοβολία δεν φτάνει στο δέκτη. Ο λόγος συγκέντρωσης για ένα (οπτικά) τέλειο επιμήκη CPC δίνεται από τη σχέση:

$$C_i = 1/\sin\theta_c \quad (3.2)$$

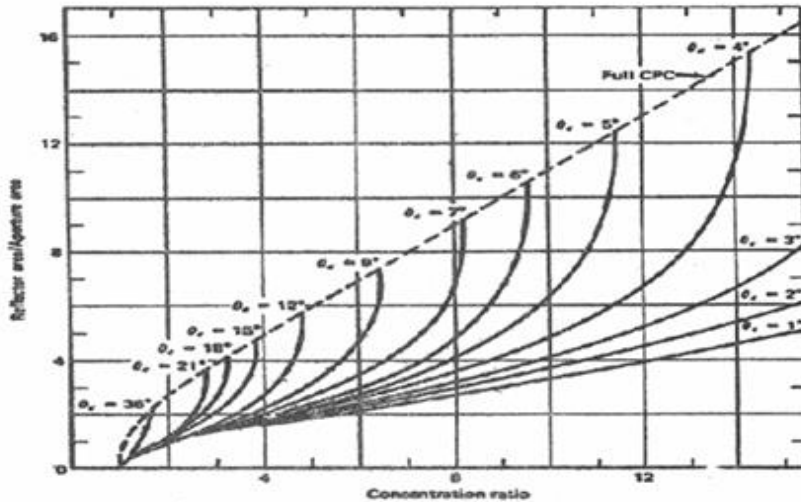
Τα άνω άκρα των παραβολικών πλευρών του CPC συνεισφέρουν ελάχιστα στην ανάκλαση της ακτινοβολίας προς τον δέκτη και συνεπώς μπορούν να αποκοπούν. Έτσι, το ύψος του CPC μπορεί να μειωθεί με ελάχιστη μείωση στην απόδοση, αλλά σημαντική μείωση στο κόστος κατασκευής. Η αποκοπή των άνω άκρων:

- δεν μεταβάλλει την ημιγωνία αποδοχής
- μεταβάλλει το λόγο του ύψους προς το άνοιγμα
- μεταβάλλει το λόγο συγκέντρωσης
- μεταβάλλει το μέσο αριθμό ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στον απορροφητήρα.

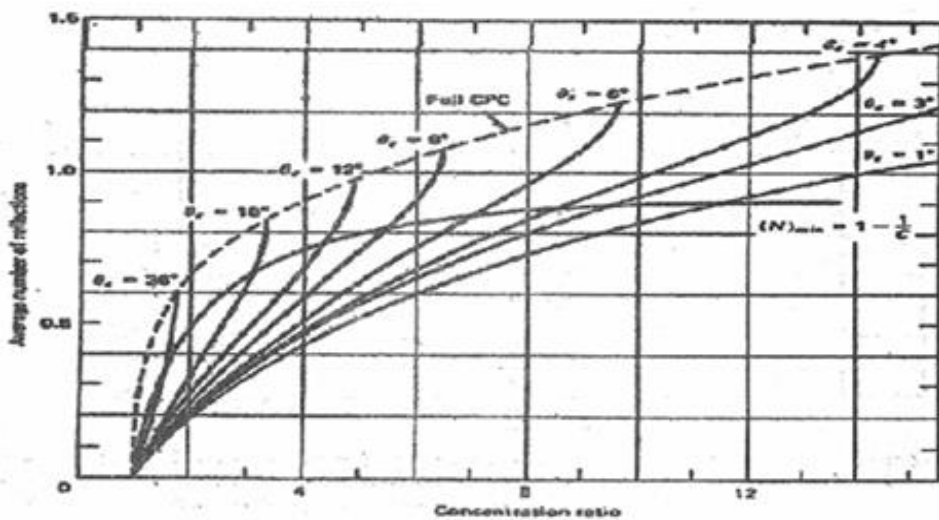
Ο λόγος του ύψους προς το άνοιγμα, ο λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος και ο μέσος αριθμός ανακλάσεων δίδονται στις εικόνες 3.12α, 3.12β, 3.12γ αντίστοιχα συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και με παράμετρο την ημιγωνία αποδοχής θ_c , για πλήρεις και αποκομμένους, τέλειους, CPC.



Εικόνα 3.12α: Λόγος του ύψους προς το άνοιγμα για πλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής [3.17]

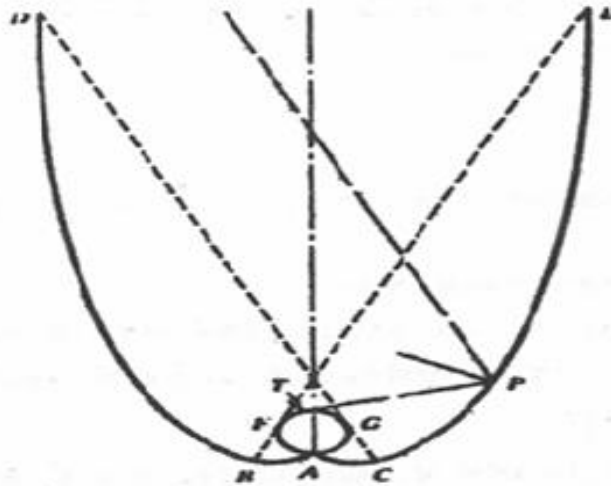


Εικόνα 3.12β: Λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος για πλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής [3.17]



Εικόνα 3.12γ: Μέσος αριθμός ανακλάσεων για πλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής [3.17]

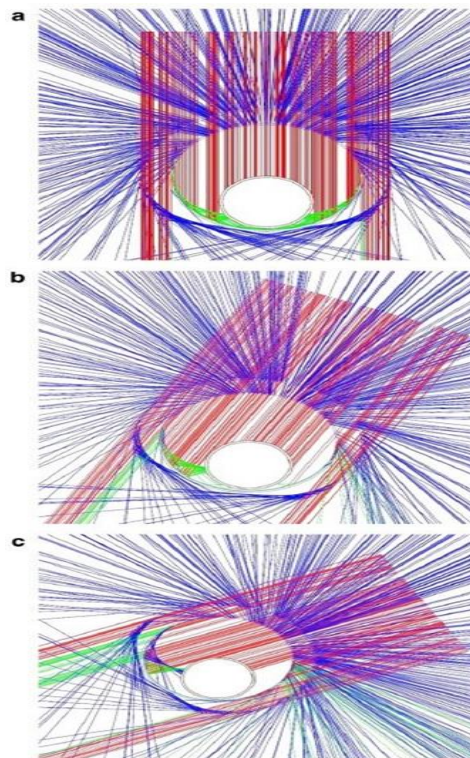
Στην εικόνα 3.13 φαίνεται ένας συλλέκτης τύπου CPC με κυλινδρικό δέκτη, στην οποία φαίνεται και ο τρόπος γένεσης του σχήματος της ανακλαστικής επιφάνειας που απαιτείται για τον δέκτη αυτό. Έτσι, στο τυχόν σημείο P της επιφάνειας CE πρέπει η κάθετος στο κάτοπτρο να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον απορροφητήρα, PT, και η ευθεία που διέρχεται από το P και σχηματίζει γωνία θ_c με τον άξονα του CPC. Η παραπάνω μέθοδος γένεσης της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε σχήμα κυρτού δέκτη, δημιουργώντας έτσι συλλέκτες τύπου CPC, οι οποίοι δεν είναι κατ' ανάγκη παραβολικοί.



Εικόνα 3.13: CPC με κυλινδρικό δέκτη(σωλήνα) [3.17]

Ο CPC της παραπάνω εικόνας χρησιμοποιείται συνήθως αποκομμένος με σωληνοειδή δέκτη κενού και μάλιστα σε συστοιχία πολλών ομοίων CPC, η οποία φέρει επίπεδο υάλινο κάλυμμα.

Στην εικόνα 3.14 βλέπουμε τα αποτελέσματα της ανίχνευσης των ακτίνων φωτός για γωνίες πρόσπτωσης (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° . Με κόκκινο χρώμα είναι οι προσπίπτουσες ακτίνες, με πράσινο οι ανακλώμενες στον απορροφητήρα και με μπλε η διαθλώμενες και ανακλώμενες ακτίνες προς το περιβάλλον.



Εικόνα 3.14: Οι ακτίνες φωτός σε έναν συλλέκτη CPC για γωνίες πρόσπτωσης
a) $\theta=0^\circ$, b) $\theta=30^\circ$, c) $\theta=60^\circ$ [3.7]

Απορροφούμενη ακτινοβολία

Οι συλλέκτες CPC τοποθετούνται συνήθως με τον διαμήκη άξονα οριζόντιο και προσανατολισμένο κατά την Ανατολή-Δύση. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι στραμμένο προς τον ισημερινό, σχηματίζοντας γωνία β με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως υπάρχει δυνατότητας ρύθμισης (περιστροφής) περί τον επιμήκη άξονα, έτσι ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει εντός των ορίων που επιβάλλει η γωνία αποδοχής $2 \cdot \theta_c$. Αυξανόμενου του λόγου συγκέντρωσης μειώνεται η θ_c με συνέπεια την απαίτηση συχνότερης ρύθμισης.

Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που απορροφά ο δέκτης του CPC, με προσανατολισμό όπως περιγράφεται παραπάνω, γίνεται ως εξής:

- Ελέγχεται αν η άμεσος ακτινοβολία προσπίπτει εντός των επιβαλλομένων ορίων. Αυτό συμβαίνει αν πληρείται η συνθήκη :

$$(\beta - \theta_c) \leq \tan^{-1}(\tan \theta_z \cdot \cos \gamma_s) \leq (\beta + \theta_c) \quad (3.3)$$

Όπου: θ_z είναι η γωνία ζενίθ και γ_s είναι το αζιμούθιο του ήλιου που υπολογίζεται συναρτήσει της ηλιακής απόκλισης δ του γεωγραφικού πλάτους ϕ_0 και της ωριαίας γωνίας ω από τη σχέση :

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_z} \quad (3.4)$$

$$\tan \gamma_s = \frac{\sin \omega}{\sin \phi_0 \cos \omega - \cos \phi_0 \tan \delta} \quad (3.5)$$

- Υπολογίζεται η αξιοποιούμενη προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος $G_{b,CPC}$ από τη σχέση:

$$G_{b,CPC} = F \cdot G_{bn} \cos \theta \quad (3.6)$$

όπου: F = συνάρτηση ελέγχου που λαμβάνει την τιμή 1 ή 0 αν ικανοποιείται ή όχι η συνθήκη

G_{bn} = άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου

θ = η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στο άνοιγμα

- Υποθέτοντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισότροπη υπολογίζεται η αξιοποιούμενη διάχυτη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος $G_{d,CPC}$ από τη σχέση :

$$G_b = \frac{G_d}{c} \quad \text{αν } \beta + \theta_c < 90^\circ \quad (3.7)$$

ή

$$G_{b,CPC} = G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G_p \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \text{αν } \beta + \theta_c > 90^\circ \quad (3.8)$$

Όπου c είναι ο λόγος συγκέντρωσης, G_d η ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία, G_p η ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και ρ_a ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους.

Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της εξίσωσης (3.7), επειδή $\beta + \theta_c < 90^\circ$, εισέρχεται στο CPC μόνο η διάχυτη προερχόμενη από τον ουρανό, ενώ στην περίπτωση της εξίσωσης (3.8) λαμβάνεται υπόψη και η διάχυτη από τον ουρανό και η διάχυτη που προκύπτει από ανάκλαση της ολικής ακτινοβολίας στο έδαφος.

- Τέλος, υπολογίζεται η συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του ανοίγματος, S , την οποία απορροφά ο απορροφητήρας του συλλέκτη, από τη σχέση:

$$S = (G_{b,CPC} \tau_{cb} a_b + G_{d,CPC} \tau_{cd} a_d) \tau_{CPC} \quad (3.9)$$

όπου $\tau_{cb} \cdot a_b =$ γινόμενο, για άμεση ακτινοβολία, της διαπερατότητας του καλύμματος που συνήθως τοποθετείται πάνω από την συστοιχία των CPC, επί την απορροφητικότητα του απορροφητήρα

$\tau_{cd} \cdot a_d =$ το αντίστοιχο γινόμενο για διάχυτη ακτινοβολία

τ_{CPC} είναι η διαπερατότητα του συγκεντρωτή, η οποία λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ανάκλασης. Έτσι, αν ρ_a είναι ο συντελεστής ανάκλασης του ανακλαστήρα και N_a ο μέσος αριθμός ανακλάσεων, ισχύει

$$\tau_{CPC} = \rho_a^{N_a} \quad (3.10)$$

3.5.4 Ηλιακός Δίσκος

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου ηλιακού συλλέκτη διαφέρει από τους υπόλοιπους τύπους. Συνήθως, η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για να ατμοποιήσει το διακινούμενο ρευστό και στην συνέχεια αυτός ο ατμός να εκτονωθεί σε έναν κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, στους ηλιακούς δίσκους, η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για την πρόσδοση θερμότητας σε έναν κύκλο stirling, ο οποίος παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης (έως και 31.25%) από τους κύκλους Rankine και Brayton, πλησιάζοντας περισσότερο τον βαθμό απόδοσης του αντίστοιχου κύκλου Carnot. Αυτό κάνει την παραγόμενη ενέργεια πιο φθηνή και κατά συνέπεια συμφέρουσα επιλογή στην ηλεκτροπαραγωγή με ηλιακά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ένα μεγάλο παραβολικό κάτοπτρο, το οποίο εστιάζει την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη και στην συνέχεια αυτή η θερμότητα προσδίδεται στην μηχανή stirling ως ωφέλιμη ενέργεια. Εναλλακτικά, αντί της μηχανής stirling, μπορεί να υπάρχει ατμομηχανή, η οποία μετατρέπει την ενέργεια σε περιστροφική ενέργεια και στην συνέχεια αυτή η ενέργεια τροφοδοτεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις ηλιακών δίσκων δεν διαθέτουν δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και κατά συνέπεια οι συγκεκριμένοι συλλέκτες λειτουργούν μόνο σε περιόδους ηλιοφάνειας. Βέβαια γίνεται μεγάλη έρευνα γύρω από την ανάπτυξη

μοντέλων, στα οποία θα υπάρχει και αποθήκευση θερμικής ενέργειας με διάφορες τεχνικές. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες απαιτείται να λειτουργούν σε θερμοκρασίες γύρω στους 800 °C, ώστε να λειτουργήσει η μηχανή stirling. Επιπλέον, ο ηλιακός δίσκος δίνει την δυνατότητα για υβριδική λειτουργία, δηλαδή και την καύση κάποιου συμβατικού ορυκτού καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας σε περιόδους με ανεπαρκή ηλιοφάνεια. Ο δέκτης της μηχανής stirling περιλαμβάνει δέσμη σωλήνων με διακινούμενο ρευστό, συνήθως υδρογόνο ή ήλιο, το οποίο απορροφά τη θερμότητα και την προσδίδει στη μηχανή stirling. Η συγκεκριμένη μηχανή παρουσιάζει πολύ μικρή θερμική αδράνεια και άρα η μηχανή μπορεί πολύ γρήγορα να μεταβάλλει την ισχύ στην οποία λειτουργεί, όταν μεταβάλλεται η ακτινοβολία.



Εικόνα3.15 : Τυπική μορφή ηλιακού δίσκου [3.18]



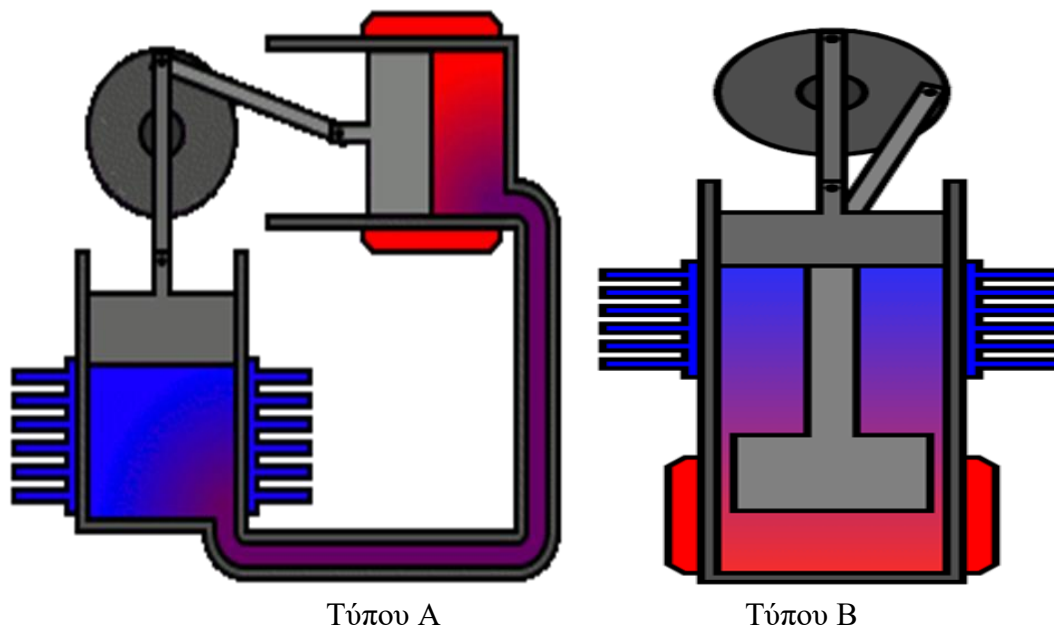
Εικόνα 3.16: Ηλιακός δίσκος με μηχανή stirling [3.18]

Κύκλος λειτουργίας μηχανής Stirling

Μια μηχανή Stirling είναι μια κλειστού κύκλου λειτουργίας θερμική μηχανή στην οποία λειτουργεί μόνιμα ένα εργαζόμενο ρευστό μεταξύ δύο θερμοκρασιών, μιας υψηλής και μίας χαμηλής. Πιο συγκεκριμένα το εργαζόμενο μέσο (συνήθως κάποιο αέριο) ακολουθεί κυκλική συμπίεση και εκτόνωση και έτσι υπάρχει καθαρή μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική. Η πηγή θερμότητας βρίσκεται εξωτερικά της μηχανής, σε αντίθεση με τις μηχανές στις οποίες η πηγή θερμότητας βρίσκεται εντός της μηχανής (κύκλος Otto/ Diesel) και αυτό κάνει εύχρηστη τη μηχανή σε διάφορες εγκαταστάσεις, στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιείται οποιαδήποτε πηγή θερμότητας. Βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε εγκαταστάσεις στις οποίες χρησιμοποιείται ανανεώσιμη πηγή θερμότητας (χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς συλλέκτες Dish-Stirling). Παρουσιάζουν αθόρυβη λειτουργία και ταυτόχρονα ο θερμικός κύκλος Stirling παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τους υπόλοιπους θερμικούς κύκλους (κύκλος Rankine/Otto/Diesel/Joule-Brayton), έως και 50%, γεγονός που καθιστά τον βαθμό απόδοσης του κύκλου Stirling τον κοντινότερο στον ιδανικό κύκλο Carnot. Το βασικό μειονέκτημα της μηχανής Stirling είναι ο χαμηλός λόγος ισχύος προς βάρος και έκταση της μηχανής, γεγονός που τον καθιστά ανταγωνιστικό σε στατικές εγκαταστάσεις όπου η εξοικονόμηση χώρου δεν αποτελεί προτεραιότητα της εγκατάστασης. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μηχανών Stirling:

Τύπος Α δύο κυλίνδρων. Ο κύλινδρος εκτόνωσης (κόκκινο) διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ η συμπίεση του κυλίνδρου (μπλε) ψύχεται. Το πέρασμα μεταξύ των δύο κυλίνδρων περιέχει τον αναγεννητή.

Τύπος Β ενός κυλίνδρου, ο οποίος είναι ζεστός στο ένα άκρο και κρύος στο άλλο. Μια φαρδιά εκτόπισης μεταστρέφει τον αέρα ανάμεσα στο ζεστό και κρύο άκρο του κυλίνδρου. Ένα έμβολο στο άκρο του κυλίνδρου οδηγεί το σφόνδυλο.



Εικόνα 3.17: Τύποι μηχανών stirling [3.19]

3.5.5 Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel

Μία ακόμα διαφορετική τεχνολογία ηλιακών συλλεκτών είναι οι συλλέκτες Fresnel (Linear Fresnel Reflector ή και L.F.R.). Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες αποτελούνται όπως και όλα τα άλλα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, από τον συγκεντρωτή και το δέκτη. Αναλυτικότερα, ο συγκεντρωτής αποτελείται από μια συστοιχία επίπεδων ηλιακών ανακλαστήρων, σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, συγκεντρώνοντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη, ο οποίος είναι ένας σταθερός σωλήνας σε αρκετό ύψος πάνω από το επίπεδο (εστιακό ύψος). Ο δέκτης ενδείκνυται να είναι σωλήνας κενού, και αυτό καθώς ο σωλήνας κενού, λόγω της πολύ χαμηλής πίεσης που επικρατεί, παρουσιάζει ελάχιστες θερμικές απώλειες συναγωγής. Επιπλέον, ο συλλέκτης εμφανίζεται κάποιες φορές να φέρει και δευτερεύον κάτοπτρο, το οποίο δεν τοποθετείται τόσο για αύξηση της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας αλλά για μόνωση. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά την συγκέντρωση ακτινοβολίας, το δευτερεύον κάτοπτρο συγκεντρώνει κάποιες από τις ηλιακές ακτίνες οι οποίες διαφεύγουν και δεν προσπίπτουν κατά τις ανακλάσεις στο σωλήνα του απορροφητή, αλλά ταυτόχρονα σκιάζει (συνήθως 1-2 κάτοπτρα), είτε τα κάτοπτρα που βρίσκονται κατακόρυφα του σωλήνα για την κατακόρυφη θέση του ήλιου (ηλιακό μεσημέρι) είτε κάποια άλλα κάτοπτρα, ανάλογα με τη θέση του ήλιου. Οπότε η χρησιμότητα του δευτερεύοντος κατόπτρου δεν είναι τόσο η αύξηση της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας αλλά η μόνωση του σωλήνα απορρόφησης. Ο ηλιακός Fresnel μπορεί

να λειτουργήσει είτε με κάποιο διαθερμικό υγρό το οποίο να φτάνει σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια να αποδίδει με εναλλάκτη θερμότητας την θερμότητα σε νερό για την παραγωγή ατμού, είτε απευθείας με νερό το οποίο ατμοποιείται εντός του απορροφητή.

Σύντομη ιστορική αναδρομή

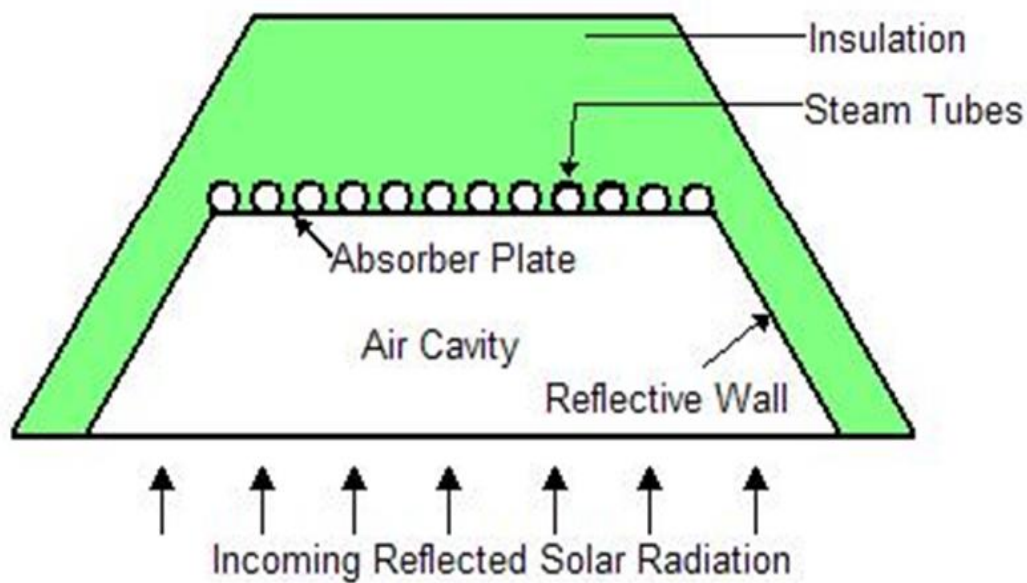
Η τεχνολογία των Fresnel αναπτύχθηκε εργαστηριακά από τον Giovanni Francia το 1961 στο πανεπιστήμιο της Γένοβα. Συγκεκριμένα, απέδειξε ότι ένα τέτοιο ηλιακό σύστημα είναι ικανό να φθάσει θερμοκρασίες ικανές για την παραγωγή ατμού και τη χρήση του σε κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία των Fresnel μελετήθηκε ακόμα περισσότερο κατά την διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης του 1973 αλλά παρόλα αυτά για πολλά χρόνια παρέμειναν αμέτοχα και δεν δημιουργήθηκαν ηλιακοί θερμοκοί σταθμοί με ηλιακά Fresnel. Τελικά το 1993 δημιουργείται ο πρώτος ηλιακός Fresnel που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο του Σίδνεϋ και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1995.

Συγκεντρωτής στον συλλέκτη Fresnel

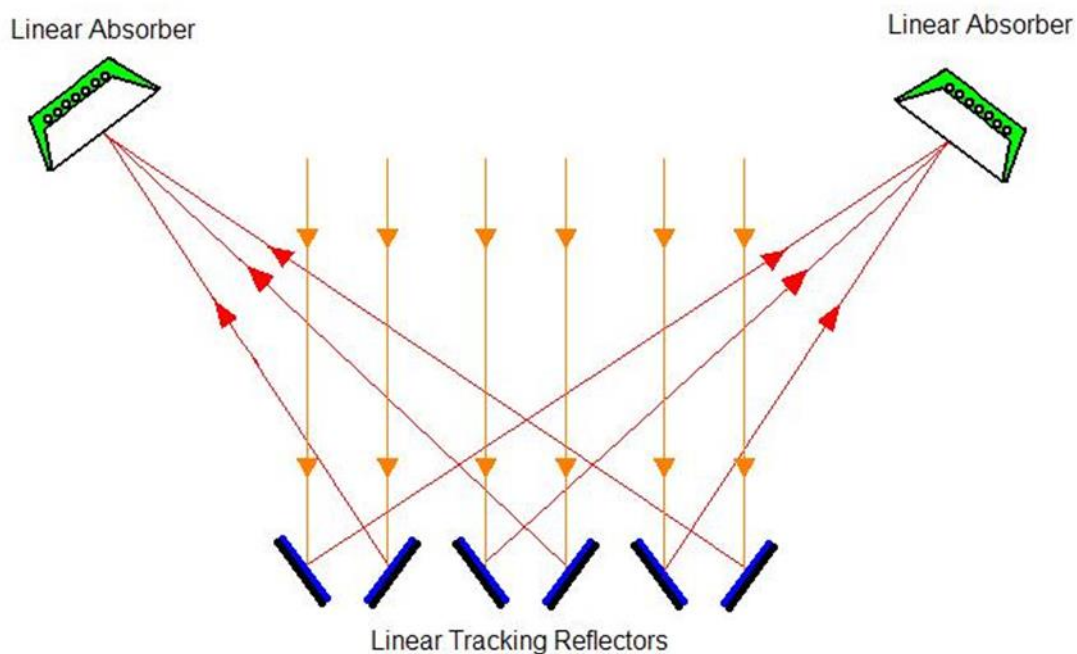
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο συγκεντρωτής αποτελείται από μια συστοιχία επίπεδων ανακλαστήρων, με μικρά κενά μεταξύ τους. Συνήθως προσανατολίζονται από βορρά προς νότο και έχουν την δυνατότητα περιστροφής περί του άξονα τους για την καλύτερη παρακολούθηση του ήλιου. Η μεγαλύτερη πρόκληση σε όλα τα συγκεντρωτικά συστήματα είναι η καλύτερη παρακολούθηση του ήλιου. Τα ηλιακά συστήματα σχεδιάζονται για το ηλιακό μεσημέρι, αλλά η σχετική θέση των ηλιακών ακτινών με τους ανακλαστήρες μετατοπίζεται συνεχώς οπότε και είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ένας μηχανισμός περιστροφής των κατόπτρων για την αποδοτικότερη συγκέντρωση των ακτινών στον απορροφητή. Έτσι τοποθετείται ένας υπολογιστής ο οποίος ανάλογα με την χρονική στιγμή και την θέση του ήλιου μεταβάλλει-περιστρέφει τα κάτοπτρα γύρω από έναν άξονα, ώστε να ρυθμίζεται η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών (γωνία πρόσπτωσης ορίζεται η γωνία που σχηματίζει η ηλιακή ακτίνα με το επίπεδο του κατόπτρου). Το κάθε κάτοπτρο στρέφεται κατά διαφορετική γωνία. Ταυτόχρονα, σημαντικό σημείο σχεδιασμού του συγκεντρωτή, είναι η τοποθέτηση των κατόπτρων σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους, ώστε όταν περιστρέφονται για να παρακολουθούν τον ήλιο, να μην σκιάζονται τα κάτοπτρα από άλλα γειτονικά τους.

Απορροφητής στον συλλέκτη Fresnel

Ο απορροφητής εκτείνεται κατά την εστιακή γραμμή και συγκεντρώνει τις ηλιακές ακτίνες από τους ανακλαστήρες. Η εστιακή γραμμή, είναι η ευθεία η οποία βρίσκεται στο εστιακό ύψος και εκτείνεται παράλληλα με την διεύθυνση προσανατολισμού του συλλέκτη (συνήθως διεύθυνση βορρά-νότου).



Εικόνα3.18: Απορροφητής πολλαπλών σωλήνων (τύπος 1) [3.20]



Εικόνα3.19: Απορροφητής πολλαπλών σωλήνων (τύπος 2) [3.20]

Το μοντέλο συλλέκτη Fresnel με πολλούς απορροφητές ονομάζεται συμπαγής γραμμικός Fresnel (Compact Linear Fresnel Reflector ή C.L.F.R.). Ο συγκεκριμένος τρόπος διάταξης του απορροφητή παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την διάταξη του ενός απορροφητή. Πιο συγκεκριμένα, στους C.L.F.R. ο λόγος απορροφούμενης ακτινοβολίας προς τα m^2 συλλεκτικής επιφάνειας αυξάνεται

σημαντικά καθώς αξιοποιείται καλύτερα η ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια απαιτείται μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια και άρα λιγότερα κάτοπτρα. Επιπλέον, στην περίπτωση πολλαπλών απορροφητών, υπάρχει δυνατότητα για μεγαλύτερες αλλαγές στις κλίσεις των κατόπτρων, χωρίς να αλληλοσκιάζονται γειτονικά κάτοπτρα μεταξύ τους. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να τοποθετούμε με μικρότερα κενά τα κάτοπτρα και κατά συνέπεια να μειώνεται το μήκος της εστιακής γραμμής, δηλαδή το μήκος των απορροφητών και κατά συνέπεια έχουμε μικρότερες θερμικές απώλειες στου απορροφητές λόγω του μικρότερου μήκους τους.

Συνοπτικά λοιπόν από την περιγραφή των συλλεκτών Fresnel προκύπτουν τα εξής πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (κυρίως έναντι των παραβολικών συλλεκτών, η οποία είναι η κύρια ανταγωνιστική τεχνολογία):

Πλεονεκτήματα

- Πολύ μικρότερο κόστος κατασκευής των κατόπτρων καθώς είναι επίπεδοι και δεν χρειάζεται πολύπλοκη επεξεργασία και κατεργασία για την διαμόρφωση καμπύλων επιφανειών
- Πολύ μικρότερα φορτία ανέμου για τα κάτοπτρα καθώς είναι επίπεδα
- Πολύ πιο μικρή και εύκολη κατασκευή και άρα φθηνή
- Σταθερός απορροφητής χωρίς μηχανισμό κίνησής του, ο οποίος συνήθως είναι πολύπλοκος και ακριβή κατασκευή
- Δυνατότητα χρήσης νερού και ατμοποίησης του κατευθείαν χωρίς χρήση διαθερμικού υγρού
- Μικρότερο κόστος επένδυσης για γη, καθώς οι συλλέκτες Fresnel καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση και τοποθετούνται σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους

Μειονεκτήματα

- Ο συλλέκτης Fresnel λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους άλλους τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών
- Παρουσιάζει μικρότερο βαθμό απόδοσης
- Υπάρχει πολύ πιο ευρεία εφαρμογή των συγκεντρωτικών συλλεκτών και αυτό έχει δημιουργήσει ένα προβάδισμά τους έναντι των συλλεκτών Fresnel

Ειδικά για το τελευταίο σημείο να αναφέρουμε ότι τα τελευταία χρόνια έχει γίνει προσπάθεια στροφής της παγκόσμιας αγοράς στον χώρο της ενέργειας από ηλιακά για την προώθηση των Fresnel. Πολλοί ειδικοί επιστήμονες αναφέρουν ότι θα πρέπει να ξεκινήσει μια προσπάθεια με έργα μικρότερης έκτασης για την ενεργό ένταξη των Fresnel στην αγορά των ηλιακών. Σημαντικό να αναφέρουμε ότι για το 2013 από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ από ηλιακά, τα παραβολικά καταλάμβαναν το 87.606% ενώ οι Fresnel καταλάμβαναν μόλις το 1.056% με μόλις 47.4 MW. Έως το 2018 θα έχουν προστεθεί 261 MW από ηλιακά Fresnel και 885 MW από

παραβολικούς συλλέκτες, γεγονός το οποίο δείχνει ότι υπάρχει μια σαφής εισχώρηση των Fresnel στην αγορά των ηλιακών θερμικών σταθμών.

3.6 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες

Η πιο γνωστή τεχνολογία σήμερα είναι αυτή των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο νερό και παράλληλων σωλήνων. Έγιναν γνωστοί κυρίως με την εμπορευματοποίηση των ηλιακών θερμοσίφωνων συστημάτων για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης κατά την δεκαετία του '60. Η γεωμετρία τους παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 3.20: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [3.21]

- Περίβλημα συλλέκτη: συνήθως από γυαλί ή διάφανο πλαστικό και μεταλλικό πλαίσιο στην πίσω πλευρά
- Μόνωση: από ελαστικά υλικά για στεγανοποίηση και θερμομόνωση
- Δίκτυο σωληνώσεων όπου κυκλοφορεί το εργαζόμενο μέσο
- Απορροφητική επιφάνεια: από χαλκό ή αλουμίνιο. Συνήθως ενσωματωμένη στους σωλήνες
- Διαφανές κάλυμμα: στην εκτεθειμένη πλευρά. Επιτρέπει την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας και αποτρέπει την έξοδο της παραγόμενης υπέρυθρης

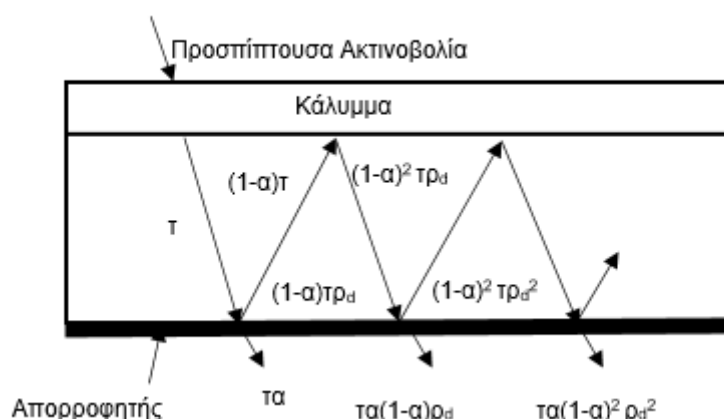
Η λειτουργία των επίπεδων συλλεκτών είναι σχετικά απλή και βασίζεται εξ' ολοκλήρου στην μεταφορά θερμότητας. Η ηλιακή ακτινοβολία συναντά το διαφανές κάλυμμα και προσπίπτει στην απορροφητική επιφάνεια και έπειτα στους σωλήνες. Μέσα στους σωλήνες κυκλοφορεί υγρό μεταφοράς θερμότητας, στο οποίο μεταφέρεται η ηλιακή ενέργεια με την μορφή θερμικής. Θα πρέπει οι σωλήνες να έχουν πολύ καλή επαφή με το στρώμα απορρόφησης για βέλτιστη μετάδοση

θερμότητας στο υγρό μεταφοράς. Στη συνέχεια, αυτό οδηγείται προς δεξαμενή αποθήκευσης ή προς εναλλάκτη θερμότητας, όπου μεταφέρεται η ενέργειά του σε άλλο εργαζόμενο μέσο για την περαιτέρω εκμετάλλευσή του. Το ρευστό μπορεί να είναι νερό, νανούλικό, υγρό άλας ή έλαιο. Για καλύτερη απόδοση οι επίπεδοι συλλέκτες τοποθετούνται με νότια κατεύθυνση, προς τον Ισημερινό ώστε να αυξάνονται οι ώρες ηλιοφάνειας.

Η ενεργειακή ανάλυση του συλλέκτη βασίζεται στην εκτίμηση των εισερχόμενων και εξερχόμενων ενεργειακών ροών.

Η ακτινοβολία G_T που προσπίπτει πάνω στο κάλυμμα του συλλέκτη ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μονοπάτι μερικής απορρόφησης και ανάκλασης. Το μονοπάτι, αυτό, εξαρτάται απόλυτα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά του τζαμιού και της απορροφητικής επιφάνειας, όπως διακρίνεται στην εικόνα 3.20. Οι οπτικές απώλειες σχετίζονται με τέσσερις παραμέτρους, οι οποίες είναι:

- Διαπερατότητα τ (transmissivity): η ακτινοβολία που περνά μέσα από το γυάλινο κάλυμμα προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Απορροφητικότητα α (absorptivity): το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Ανακλαστικότητα ρ_a (reflectivity): το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει από την επιφάνεια προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Στιγμιαίος παράγοντας ανάσχεσης γ (intercept factor), ο οποίος περιλαμβάνει τις απώλειες που προκαλούνται στην απορροφούμενη ακτινοβολία. Αυτές συμβαίνουν λόγω των μικρο-σωματιδίων της ατμόσφαιρας μεταξύ της απόστασης από την ανακλαστική επιφάνεια έως τον δέκτη, λόγω της μηχανικής παραμόρφωσης του συλλέκτη αλλά και του συστήματος στήριξης.



Εικόνα 3.21: Ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κάλυμμα επίπεδου συλλέκτη [3.22]

Πολλαπλασιασμός των τεσσάρων αυτών παραμέτρων (ανακλαστικότητα, ανάσχεση, διαπερατότητα και απορροφητικότητα) δίνει την μέγιστη οπτική απόδοση για μηδενική γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια

$$\eta_{opt,0^\circ} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad (3.11)$$

Από την προσπίπτουσα ακτινοβολία G_T στον συλλέκτη ένα ποσοστό $(\tau\alpha)$ απορροφάται και ένα ποσοστό $(1-\alpha)$ ·τα ανακλάται πίσω προς το κάλυμμα, ώσπου τελικά προκύπτει η παρακάτω τιμή :

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho d} \quad (3.12)$$

Τότε ορίζεται η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία ως:

$$S = (\tau\alpha)_{ave} I_T \quad (3.13)$$

Οι Beckmann και Duffie μελέτησαν αναλυτικά τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και υποστηρίζουν ότι υπό σταθερές συνθήκες η θερμότητα που παράγεται από έναν επίπεδο συλλέκτη επιφάνειας A_c με θερμοκρασία απορροφητή T_{pm} βρισκόμενος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{am} υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Qu = Ac[S - U_L(T_{pm} - T_{am})] \quad (3.14)$$

Ενώ ορίζεται ο συντελεστή απωλειών που εκφράζει το σύνολο των απωλειών από πάνω (U_t), από πίσω (U_b) και από το πλάι (U_e).

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (3.15)$$

Τότε, η απόδοση του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη θεωρείται ίση με την ωφέλιμη ενέργεια σε κάποιο χρόνο προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον ίδιο χρόνο:

$$\eta = \frac{\int Qu dt}{Ac \int G_T dt} \quad (3.16)$$

Ωστόσο, ο συντελεστής απωλειών U_L εξαρτάται απόλυτα από τα υλικά και την θερμοκρασία. Λαμβάνοντας αυτό το γεγονός υπόψιν, τότε η απόδοση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ορίζεται ως μία δευτεροβάθμια εξίσωση με την εξής μορφή:

$$\eta = FR(\tau\alpha) - \alpha_1 \frac{(T_{in} - T_{am})}{GT} - \alpha_2 \left[\frac{(T_{in} - T_{am})}{GT} \right]^2 \quad (3.17)$$

όπου α_1, α_2 σταθερές για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και συγκεκριμένη παροχή.

Ακόμη ορίζεται FR ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη επιφάνειας A_c με ροή ρευστού \dot{m} σε θερμοκρασία εισόδου T_{in} και θερμοκρασία εξόδου T_{out} :

$$FR = \frac{\dot{m} Cp(T_{out} - T_{in})}{Ac[S - U_L(T_{in} - T_{am})]} \quad (3.18)$$

ο οποίος εκφράζει την πραγματική ωφέλιμη ενέργεια που προκύπτει προς την ωφέλιμη ενέργεια που θα πρόκυπτε αν όλος ο συλλέκτης βρισκόταν σε θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Στην τελευταία περίπτωση προκύπτει η μέγιστη απόδοση του

συλλέκτη ίση με την οπτική του απόδοση, όπως προκύπτει και από τον τύπο (3.17) μηδενίζοντας τους όρους ($T_{in} - T_{am}$)

Για την απόδοση των επίπεδων συλλεκτών σημαντικό ρόλο έχουν η γωνία τοποθέτησης, το ρευστό απολαβής θερμότητας, το υλικό της απορροφητικής επιφάνειας αλλά και το σύνολο των υλικών της κατασκευής. Οι συλλέκτες αυτοί, χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται με σταθερή κλίση, ώστε να «κοιτούν» τον ισημερινό. Η κλίση τους επηρεάζει την απόδοσή τους, καθώς κατά την διάρκεια λειτουργίας τους αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και συνεπώς η πυκνότητά της. Επιπλέον, ως ρευστό απολαβής επιλέγεται κάποιο με υψηλή θερμοχωρητικότητα, με πιο διαδεδομένη την χρήση του νερού.

Για την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη συνήθης επιλογή είναι υλικά μαύρου χρώματος με σκοπό την προσομοίωση της λειτουργίας ενός μέλανος σώματος. Όμως όταν η χρήση τους προορίζεται για εφαρμογές που αναζητείται και το βέλτιστο αισθητικό αποτέλεσμα, τότε χρησιμοποιούνται «έγχρωμοι» απορροφητικοί δέκτες. Σε πολλές περιπτώσεις η απόδοσή τους είναι μικρότερη από αυτή των μαύρων επιφανειών, ωστόσο είναι ικανή να καλύψει το απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο για τις εγκαταστάσεις που προορίζονται. Τέλος, μελέτες γίνονται και για την βελτιστοποίηση των οπτικών ιδιοτήτων των υλικών της άνω επιφάνειας, με αύξηση του βαθμού διαπερατότητας του καλύμματος αλλά και μείωση των θερμικών απωλειών της μόνωσης και της επιφάνειας του περιβλήματος.

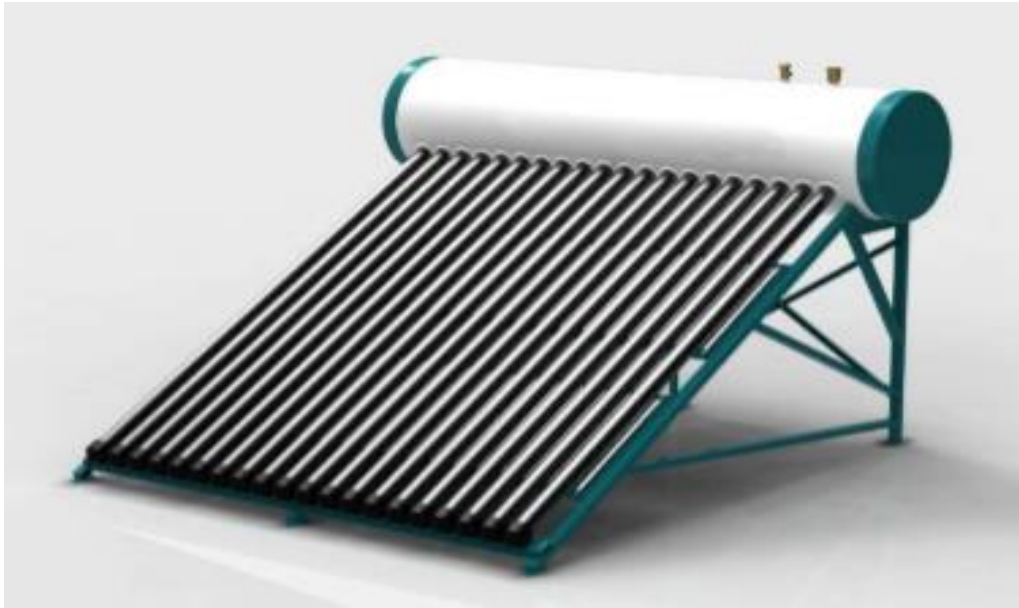
Οι επίπεδοι συλλέκτες αποτελούσαν την κύρια τεχνολογία για αρκετά χρόνια λόγω της απλούστερης κατασκευής τους. Επιπλέον είναι ιδανικοί για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης σε οικίες και μικρές βιομηχανίες λόγω των μικρών θερμοκρασιών που μπορούν να φτάσουν με λιγότερο κόστος, είναι εύκολοι στην εγκατάσταση και συχνά γίνεται εντοιχισμός τους. Ωστόσο έχουν σημαντικές απώλειες και το όριο της μέγιστης θερμοκρασίας δεν επιτρέπει κάποια άλλη χρήση τους.

3.7 Ηλιακοί Συλλέκτες με σωλήνες κενού

Οι συλλέκτες κενού είναι βιομηχανικής αλλά και οικιακής χρήσης με προηγμένα τεχνολογικά χαρακτηριστικά. Η συλλεκτική επιφάνεια αποτελείται από μία σύνδεση σωλήνων ειδικής κατασκευής και γεωμετρίας, ανάλογα με το είδος του συλλέκτη. Ανάλογα τις ενεργειακές απαιτήσεις επιλέγεται ο αριθμός και το είδος των σωλήνων. Στην αγορά υπάρχει η εξής ταξινόμηση:

- Άμεσης ροής
 - Ομόκεντροι σωλήνες
 - Χωριστοί σωλήνες
 - Τύπου Σύδνεϋ
- Θερμοσωλήνες

Οι συλλέκτες κενού χρησιμοποιούνται, κυρίως, για τις μεγάλες αποδόσεις στις υψηλές θερμοκρασίες που μπορούν να επιτύχουν σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες και τις μικρότερες απώλειες λόγω του κενού αέρος. Παρ' όλα αυτά, το κόστος της επένδυσης είναι αρκετά υψηλό λόγω των ακριβών υλικών των σωληνώσεων και για αυτό τον λόγο δεν προτείνεται η επένδυση σε αυτήν την τεχνολογία, παρά μόνο σε περιπτώσεις λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, η γυάλινη κατασκευή τους προκαλεί δυσκολία στην εγκατάσταση, διότι είναι εξαιρετικά εύθραυστη και απαιτεί μεγάλη προσοχή και μετά την εγκατάσταση.

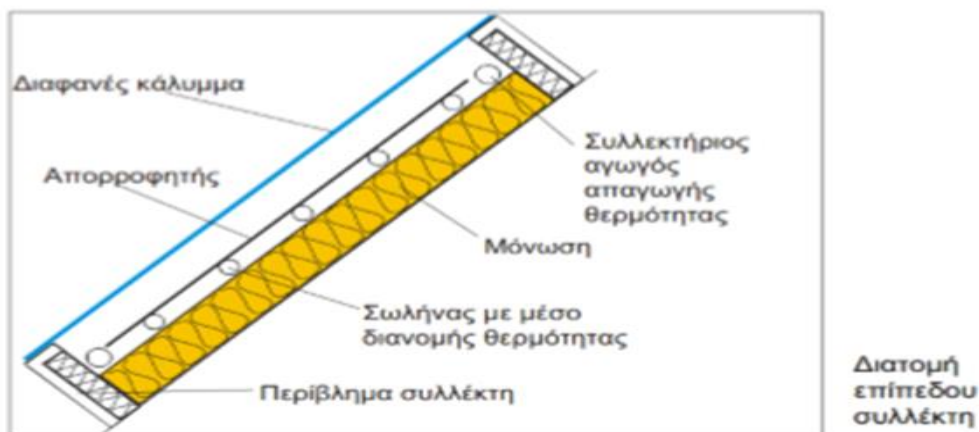


Εικόνα 3.22: Συλλέκτης κενού [3.23]

3.8 Είδη θερμικών ηλιακών συλλεκτών

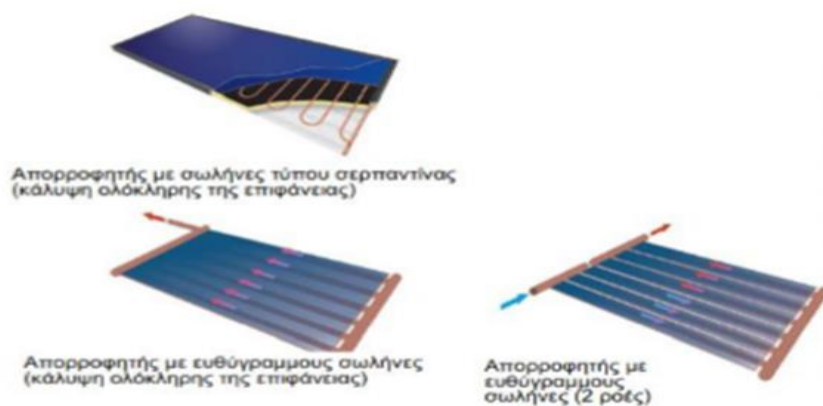
3.8.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες νερού ή αέρα

Οι συνηθισμένοι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες αποτελούνται από ένα ή δύο διαφανή καλύμματα που επιτρέπουν την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα χωρίς να επιτρέπουν την έξοδο της θερμικής ακτινοβολίας, από ένα στρώμα αέρα και από μια μαύρη επιφάνεια που απορροφά την ακτινοβολία που πέφτει πάνω της και θερμαίνεται. Κάτω από τη μαύρη επιφάνεια μέσα σε κατάλληλους σωλήνες κυκλοφορεί ρευστό, συνήθως νερό, που θερμαίνεται. Τέλος, πίσω από τους σωλήνες καθώς και στο πλάι τοποθετείται μόνωση με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών.



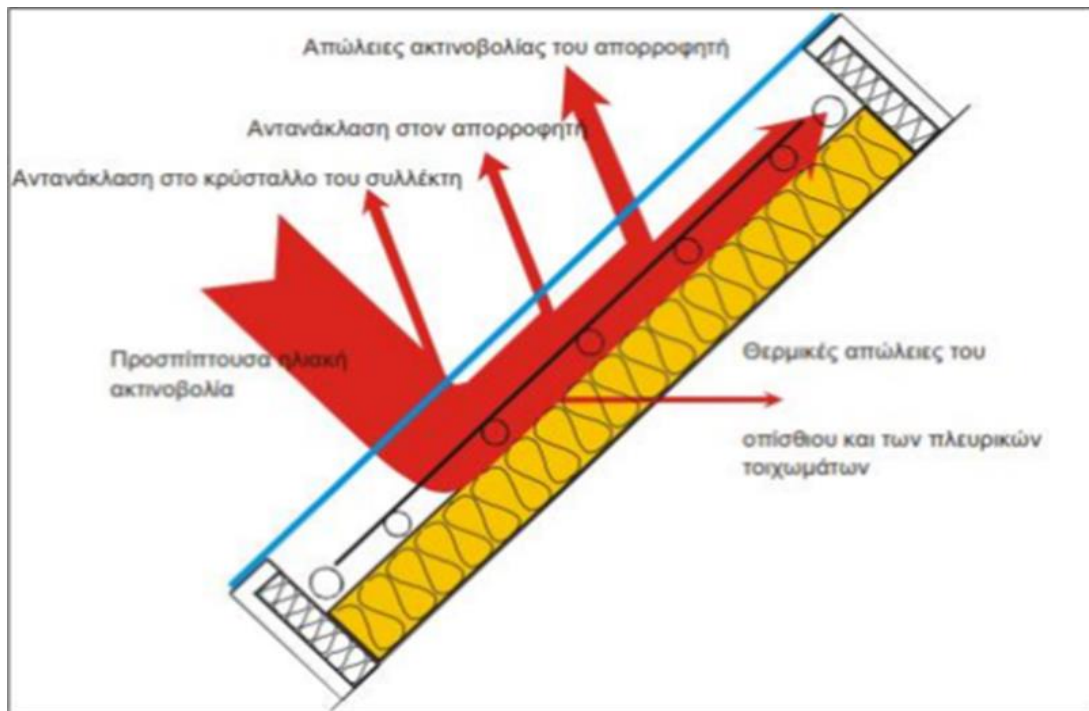
Εικόνα 3.23: Διατομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [3.21]

Υπάρχουν διάφοροι τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των σωλήνων του απορροφητή και τη ροή του ρευστού μέσα σ' αυτούς. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται μερικοί από αυτούς.



Εικόνα 3.24: Τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών [3.21]

Υπάρχει ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην απορροφητική επιφάνεια που δεν απορροφάται από τον απορροφητή αλλά επιστρέφει λόγω ανακλάσεων. Οι απώλειες αυτές προέρχονται από ανάκλαση στον απορροφητή, ανάκλαση στο γυάλινο κάλυμμα, απώλειες με ακτινοβολία από τον απορροφητή καθώς και θερμικές απώλειες από την πίσω επιφάνεια και από τα πλευρικά τοιχώματα. Γι' αυτό το λόγο ο βέλτιστος σχεδιασμός τους γίνεται με τη μέγιστη προσπάθεια μείωσης των θερμικών απωλειών.



Εικόνα 3.25: Θερμικές απώλειες ενός επίπεδου συλλέκτη [3.24]

Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συντελεστή απορρόφησης και τον συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας, στην οποία η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα. Οι κοινές μαύρες απορροφητικές επιφάνειες έχουν μεν μεγάλο συντελεστή απορρόφησης αλλά και μεγάλο συντελεστή εκπομπής και συνεπώς μεγάλο ποσοστό θερμικών απωλειών. Οι επιλεκτικές επιφάνειες, είναι επιφάνειες κυρίως μαύρες, με υψηλό συντελεστή απορρόφησης και χαμηλό συντελεστή εκπομπής, προκαλώντας έτσι μικρό ποσοστό θερμικών απωλειών. Γι' αυτό το λόγο οι επιλεκτικές επιφάνειες έχουν καθιερωθεί και χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στους ηλιακούς συλλέκτες.



Εικόνα 3.26: Επιλεκτικός απορροφητής [3.21]

Παρόλα αυτά, σε μια ευρεία εφαρμογή των ηλιακών συλλεκτών σε κτίρια, το αποτέλεσμα από τη χρήση απλού ή επιλεκτικού απορροφητή θα είναι μια μονοτονία μαύρου χρώματος στις οροφές και στις προσόψεις των κτιρίων. Το θέμα αυτό

απασχολεί τους αρχιτέκτονες και επηρεάζει δυσμενώς την διεύρυνση των εφαρμογών των ηλιακών συλλεκτών, καθώς δεν είναι πάντα συμβατή η θέα των μαύρων επιφανειών με την αισθητική των κτιρίων.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν μελετηθεί ηλιακοί συλλέκτες με χρωματιστή απορροφητική επιφάνεια, με προοπτική την αισθητική τους ένταξη σε κτίρια παραδοσιακής ή σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Έχει αρχίσει μια στροφή στο θέμα αυτό, όπου επιδιώκεται η κατασκευή θερμικών ηλιακών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών με χρωματιστή όψη της απορροφητικής επιφάνειας. Στην κατεύθυνση αυτή ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα έγχρωμων επιλεκτικών απορροφητικών επιφανειών για μείωση των θερμικών απωλειών ακτινοβολίας, ως αντιστάθμισμα της μειωμένης οπτικής απόδοσης των έγχρωμων απορροφητών [3.25].



Εικόνα 3.27: Ηλιακοί συλλέκτες με χρωματιστό απορροφητή [3.25]

Η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών σε οριζόντιες επιφάνειες διευκολύνει τη χρήση ακίνητων επίπεδων ανακλαστήρων για ενίσχυση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των συλλεκτών, που αυξάνει την ωφέλιμη θερμότητα και την ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού. Ηλιακοί συλλέκτες με μπλε χρώμα απορροφητή ενδείκνυται για εφαρμογές σε κτίρια των Κυκλάδων, καθώς εναρμονίζονται με τις μπλε πόρτες και παράθυρα των λευκών κτιρίων. Ηλιακοί συλλέκτες με κεραμιδί χρώμα απορροφητή είναι κατάλληλοι για επικλινείς κεραμοσκεπές διαφόρων κτιρίων. Ηλιακοί συλλέκτες ποικίλων χρωμάτων μπορούν να εναρμονίζονται με τις αισθητικές απαιτήσεις κτιρίων σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Έτσι, η εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών με χρωματιστό απορροφητή μπορεί να συμβάλλει στην διεύρυνση της χρήσης ηλιακών συλλεκτών, με θετικές συνέπειες στον περιορισμό της υποβάθμισης τόσο του φυσικού όσο και του αισθητικού περιβάλλοντος [3.26].



Εικόνα 3.28: Ενσωμάτωση μπλε ηλιακών συλλεκτών σε κτίριο των Κυκλάδων [3.27]

Η απόδοση συλλογής ενός συλλέκτη, δηλαδή ο λόγος της ενέργειας που δεσμεύει ο συλλέκτης προς την ηλιακή ενέργεια που πέφτει πάνω του, είναι συνάρτηση διάφορων παραμέτρων, όπως ο συντελεστής απορροφήσεως και εκπομπής της μαύρης επιφάνειας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα του αέρα, η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που πέφτει πάνω στο συλλέκτη και η τελική θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το νερό. Η θερμική απόδοση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_{th}=(m \cdot C_p \cdot \Delta T)/(A \cdot G_T) \quad (3.19)$$

όπου dm/dt ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας, C_p είναι η ειδική θερμότητα του ρευστού, $\Delta T=T_{out}-T_{in}$ είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου – εξόδου, A_c το εμβαδόν της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και G_T η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Κάθε συλλέκτης χαρακτηρίζεται από μια εξίσωση γνωστή ως ‘χαρακτηριστική εξίσωση ηλιακού συλλέκτη’ με βάση τις οπτικές και θερμικές απώλειές του. Η γενική μορφή της εξίσωσης δίνεται παρακάτω.

$$\eta_{th}=FR(\tau\alpha)-FR \cdot U_L(T_{in}-T_{am})/G_T \quad (3.20)$$

Για κάθε θερμοκρασία της μαύρης επιφάνειας αντιστοιχεί μια θερμοκρασία καταστάσεως ισορροπίας του καλύμματος, επειδή έχουμε μεταφορά θερμότητας από τη μαύρη επιφάνεια προς το κάλυμμα. Η θερμοκρασία αυτή του καλύμματος καθορίζει και τις απώλειες του συλλέκτη προς το περιβάλλον, αν υποθέσουμε ότι απ’ όλες τις άλλες πλευρές ο συλλέκτης είναι θερμικά μονωμένος.

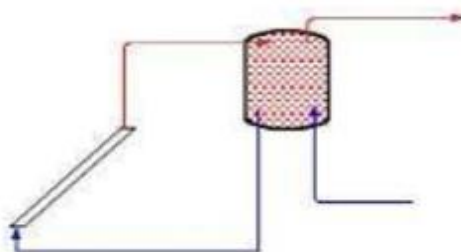
3.8.2 Θερμοσιφωνικοί ηλιακοί συλλέκτες νερού

Η λειτουργία των θερμοσιφωνικών συσκευών θέρμανσης νερού με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες βασίζεται στη φυσική κυκλοφορία του νερού ή κάποιου άλλου κατάλληλου υγρού (λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και συνεπώς διαφοράς πυκνότητας), το οποίο θερμαίνεται στους συλλέκτες και αποδίδει τη θερμότητά του

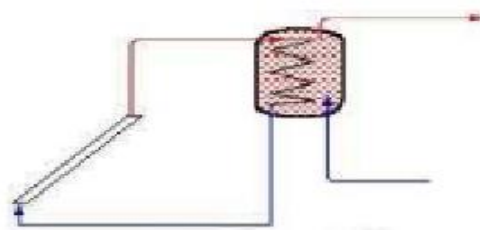
στο νερό του δοχείου. Έτσι, πετυχαίνεται με φυσικό τρόπο συνεχής ροή του θερμαινόμενου μέσου, από το θερμότερο σημείο (ηλιακοί συλλέκτες) προς το ψυχρότερο (δεξαμενή νερού), μέχρις ότου τα δύο σημεία να αποκτήσουν παρόμοιες θερμοκρασίες.

Σε αντίθεση με τα υγρά, ο αέρας ως θερμοανταλλακτικό ρευστό δεν συνηθίζεται στις συσκευές αυτής της κατηγορίας, αν και θα μείωνε το κόστος και τα λειτουργικά προβλήματα των μονάδων αυτών. Βασική αιτία γι' αυτό είναι η μικρή πυκνότητα του αέρα, που δε διευκολύνει την αποδοτική εναλλαγή θερμότητας στο κλειστό κύκλωμα συλλέκτη – δοχείο και σε συνδυασμό με τη μικρή ταχύτητα φυσικής κυκλοφορίας του, συντελεί στο να μην επιτυγχάνεται αξιόλογη απόδοση της όλης διάταξης [3.28].

Διακρίνουμε δύο είδη ηλιακών θερμοσίφωνων ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου (ανοικτού κυκλώματος και κλειστού κυκλώματος). Στα ανοικτού κυκλώματος συστήματα πραγματοποιείται απευθείας θέρμανση του νερού χρήσης που αποθηκεύεται τελικά στη δεξαμενή (το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που χρησιμοποιείται). Στα κλειστού κυκλώματος συστήματα πραγματοποιείται έμμεση θέρμανση του νερού χρήσης μέσω εναλλάκτη θερμότητας (το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί σε ιδιαίτερο κύκλωμα το οποίο θερμαίνει το νερό χρησιμοποιείται χωρίς να γίνεται ανάμιξή τους). Οι ηλιακοί θερμοσίφωνοι ανοικτού κυκλώματος είναι απλούστεροι και φθηνότεροι, έχουν όμως προβλήματα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (πάγωμα και καταστροφή του συλλέκτη) καθώς δε μπορούμε να προσθέσουμε αντιψυκτικά μίγματα, αφού το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό χρήσης. [3.29]



Εικόνα 3.29: Ηλιακός θερμοσίφοντας ανοικτού κυκλώματος [3.29]



Εικόνα 3.30: Ηλιακός θερμοσίφοντας κλειστού κυκλώματος [3.29]

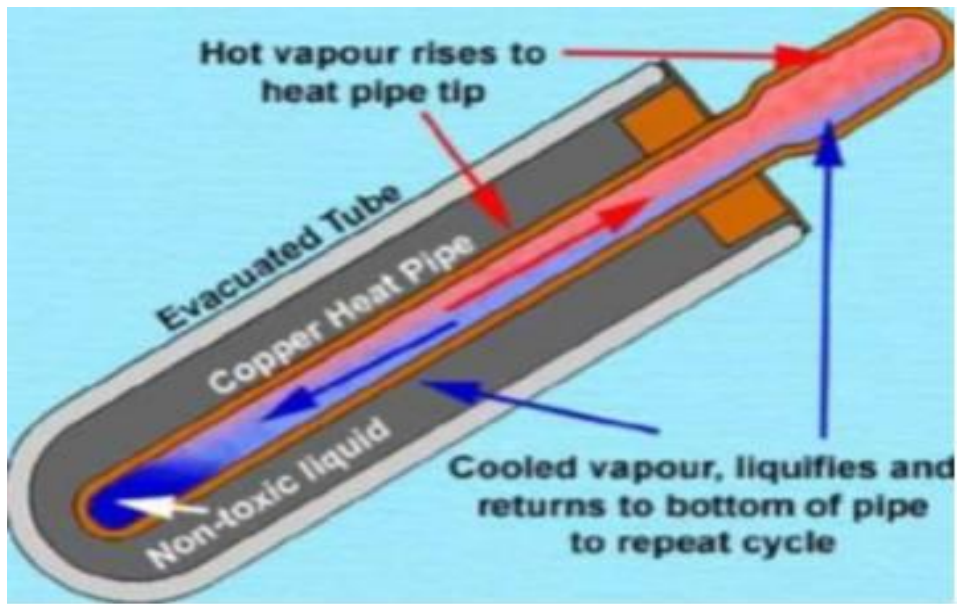
3.8.3 Ηλιακοί συλλέκτες κενού



Εικόνα 3.31: Συλλέκτες κενού [3.21]

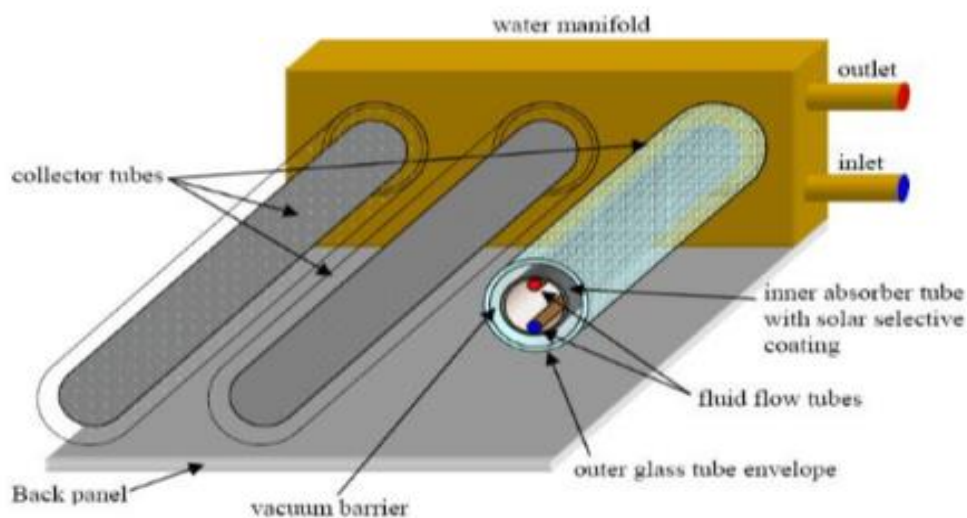
Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού είναι δύο τύπων, οι μονοσωλήνιοι και διπλοσωλήνιοι, που αποτελούνται από σωλήνες διπλής υάλωσης μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό αέρος. Το γυαλί που χρησιμοποιείται είναι ιδιαίτερης σκληρότητας, με μεγάλες αντοχές επίσης είναι επικολλημένο με ειδικό υλικό το οποίο προκαλεί την μέγιστη απορρόφηση των ηλιακών ακτινών και ελάχιστες απώλειες επανεκπομπών. Ενδιάμεσα των δύο γυάλινων επιφανειών υπάρχει θερμοαποροφητικό υλικό που με πολύ αποτελεσματικό τρόπο μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Το κενό αέρος το οποίο επικρατεί μεταξύ των δύο σωλήνων, αποτρέπει τη μετάδοση θερμότητας από τον εσωτερικό σωλήνα προς τον εξωτερικό, μέσω αγωγής ή συναγωγής. Έτσι λοιπόν, το σύνολο σχεδόν της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, μεταφέρεται και μετατρέπεται σε θερμότητα, στο θερμικό μέσο το οποίο ρέει μέσα στον εσωτερικό σωλήνα.

Το θερμικό μέσο, το οποίο περιέχεται στον εσωτερικό σωλήνα, είναι ένα ανόργανο μη τοξικό υγρό, το οποίο βρίσκεται σε συνθήκες εξαιρετικά χαμηλών πιέσεων, βοηθώντας το να εξατμίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου στους 25°C. Ο θερμός ατμός, λοιπόν, ανεβαίνει μέσα στο σωλήνα, μέχρι τη κορυφή του (συμπυκνωτής), όπου ανταλλάσει θερμότητα με το νερό χρήσης. Με την ανταλλαγή θερμότητας το αέριο μετατρέπεται σε υγρό, και λόγω της βαρύτητας, κατέρχεται στο κάτω μέρος του σωλήνα και εκτίθεται και πάλι στην ηλιακή ακτινοβολία. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τομή αυτού του τύπου σωλήνα κενού [3.30].



Εικόνα 3.32: Σωλήνας κενού [3.30]

Ένας άλλος τύπος σωλήνων κενού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αποτελείται από δύο σωλήνες στο εσωτερικό, όπου ρέει το ρευστό. Τέτοιου τύπου σωλήνες χρησιμοποιεί και η εταιρία Calpak για την κατασκευή ηλιακών συλλεκτών κενού.



Εικόνα 3.33: Σωλήνες του συλλέκτη κενού [3.21]

Παρακάτω αναφέρονται μερικά από τα πλεονεκτήματα του συλλέκτη κενού:

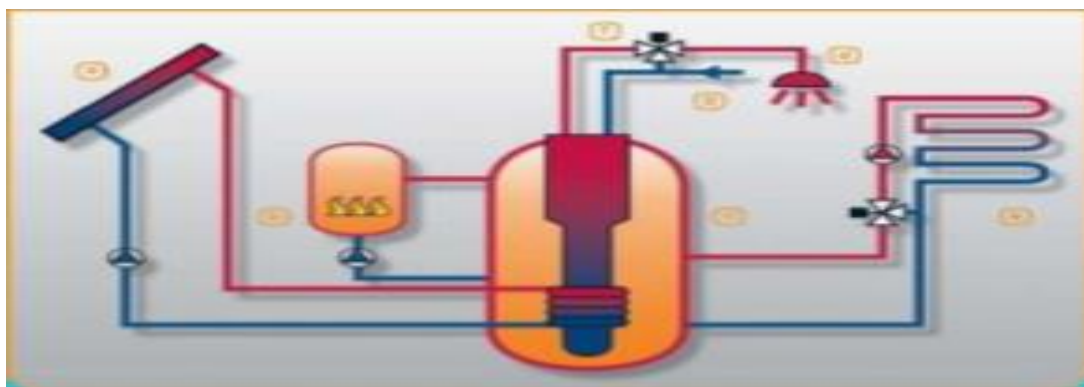
- Η κυκλική διατομή των σωλήνων, προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια (μέσα στην ημέρα) πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, στην απορροφητική επιφάνεια.
- Το κυλινδρικό σχήμα τους, προσφέρει τη δυνατότητα να γίνεται εκμετάλλευση ακόμη και της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ανακλάται από τον περιβάλλοντα χώρο.

- Η κυκλική διατομή προσφέρει δυνατότητα τοποθέτησης σε ένα ευρύτερο φάσμα γωνίας τοποθέτησης ως προς τον ορίζοντα, η οποία μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 20°C και 80°C (μπορούν να τοποθετηθούν ακόμη και σε προσόψεις).
- Στο κλειστό κύκλωμα του συλλέκτη δεν κυκλοφορεί πλέον κανενός είδους υγρού, αποφεύγοντας το κίνδυνο των παγετών και των επικαθίσεων αλάτων λόγω πολυκαιρίας.
- Οι σωλήνες συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας, είναι τοποθετημένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση βλάβης ενός σωλήνα, το σύστημα μπορεί να συνεχίσει τη λειτουργία του, χωρίς απολύτως κανένα πρόβλημα, έως την αποκατάσταση της βλάβης. Δεν σημειώνονται διαρροές νερού, ενώ ακόμη και στην απίθανη περίπτωση της ανάμειξης του θερμικού υγρού, με το νερό χρήσης, το θερμικό υγρό είναι απολύτως μη τοξικό και σε ελάχιστες ποσότητες [3.30].

3.8.4 Κεντρικά θερμικά ηλιακά συστήματα

Ως προς τους θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, κυρίως διαδεδομένοι είναι οι θερμοσιφωνικού τύπου ηλιακοί συλλέκτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσεως.

Άλλη κατηγορία αποτελούν τα κεντρικά θερμικά ηλιακά συστήματα στα οποία οι συλλέκτες είναι ξεχωριστά από τη δεξαμενή αποθήκευσης νερού και χρησιμοποιούνται τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη χώρων [3.31].



Εικόνα 3.34: Κεντρικό θερμικό ηλιακό σύστημα [3.31]

Τα κεντρικά θερμικά ηλιακά συστήματα που είναι λιγότερο διαδεδομένα στη χώρα μας, σε αντίθεση με την κεντρική Ευρώπη (Αυστρία και Γερμανία), μπορούν να συμβάλουν στη μερική θέρμανση χώρων και έχουν αισθητική ένταξη των συλλεκτών στις στέγες των κτιρίων.



Εικόνα 3.35: Ενσωμάτωση κεντρικού θερμικού ηλιακού συστήματος σε κτίριο [3.31]

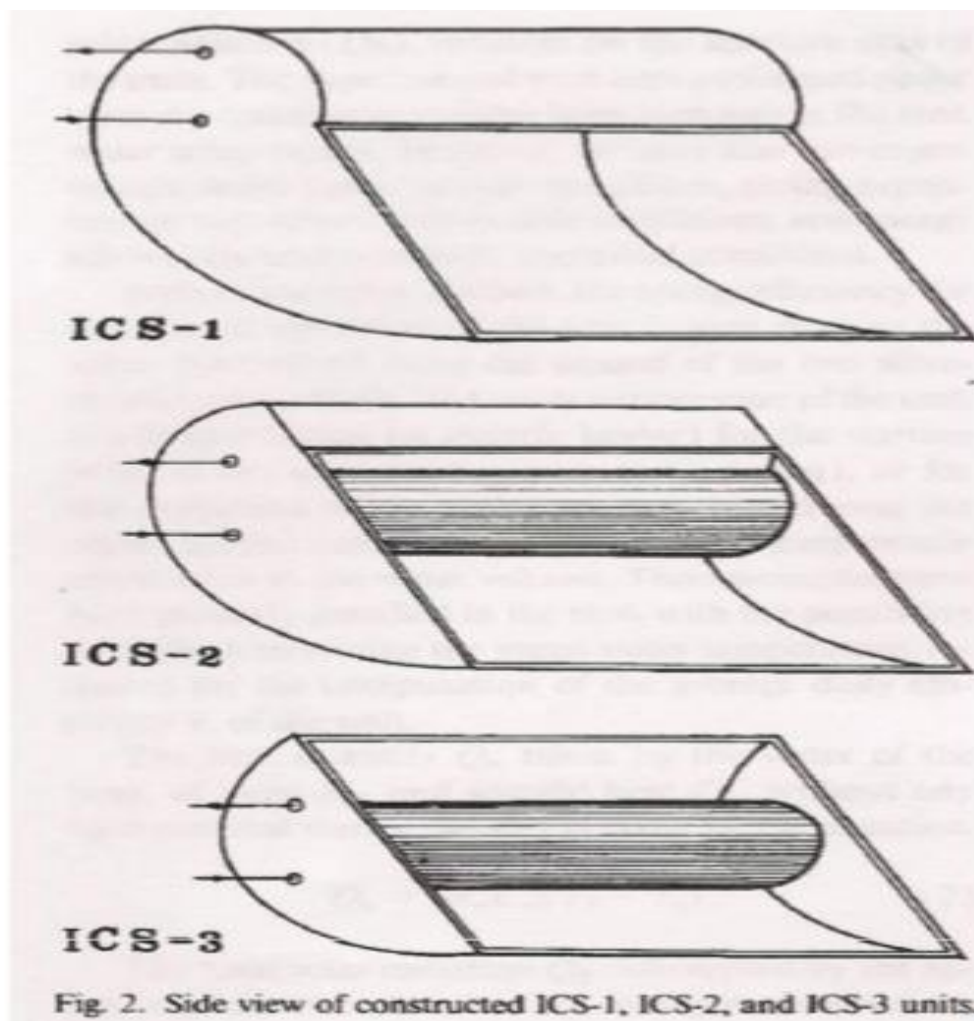
3.8.5 Ολοκληρωμένες συσκευές συλλέκτη αποθήκευσης ζεστού νερού (ICS)

Οι ολοκληρωμένες συσκευές συλλέκτη – αποθήκης θερμού νερού (ICS) αποτελούνται από δοχείο νερού (κυλινδρικό, επίπεδο ή άλλου σχήματος) το οποίο έχει και την απορροφητική επιφάνεια. Το δοχείο – συλλέκτης προστατεύεται θερμικά με διαφανές κάλυμμα και θερμομόνωση στα μη φωτιζόμενα τμήματα της συσκευής. Το κύριο πρόβλημα της συσκευής ICS είναι οι υψηλές θερμικές απώλειες από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς το περιβάλλον καθώς το κύριο μέρος της δεξαμενής δε μπορεί να μονωθεί θερμικά επειδή χρησιμοποιείται σαν απορροφητής ηλιακής ακτινοβολίας. Γι' αυτό η κατασκευή τους πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι θερμικές απώλειες λόγω μεταφοράς από τον απορροφητή στο περιβάλλον να μειώνονται. Μερικοί μέθοδοι μείωσης των θερμικών απωλειών αποτελούν η χρήση ενός ή περισσοτέρων διαφανών καλυμμάτων (γυαλί ή πλαστικό), η χρήση επιλεκτικής επιφάνειας απορροφητή, η καλή θερμική μόνωση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους της δεξαμενής καθώς και ο ειδικός σχεδιασμός του σχήματος του συλλέκτη.

Η μελέτη ποικίλων πιθανών ICS σχεδιασμών οδήγησε στην κατασκευή ακίνητης μονάδας ICS με καμπύλα κατόπτρα, ώστε η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή να γίνεται για οποιαδήποτε θέση του ήλιου. Η χρήση ασύμμετρου κατόπτρου διευκολύνει τη δημιουργία θερμού αέρα παγιδευμένου μεταξύ κατόπτρου και συλλέκτη, για βελτίωση της αποδοτικής λειτουργίας της συσκευής. [3.32]

Ο παγιδευμένος θερμός αέρας θερμαίνεται λόγω επαφής του με την επιφάνεια του απορροφητή, αλλά επειδή το πάνω μέρος στο εσωτερικό μεταξύ κατόπτρου και απορροφητή είναι κλειστό η ροή του θερμού αέρα προς τα πάνω σταματά και έτσι παγιδεύεται θερμός αέρας. Έτσι, έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτή την περιοχή. Για αυτό χρειάζεται μόνωση της επιφάνειας εξωτερικά ώστε να αποφύγουμε τη μεταφορά θερμότητας. Έχουν σχεδιαστεί τρεις βασικές περιπτώσεις μονάδων ICS μέσα από τις οποίες μπορούμε να δούμε τη γεωμετρία του κατόπτρου και την περιοχή

παγιδευμένου θερμού νερού ώστε να έχουμε μειωμένες θερμικές απώλειες από τον απορροφητή [3.32].



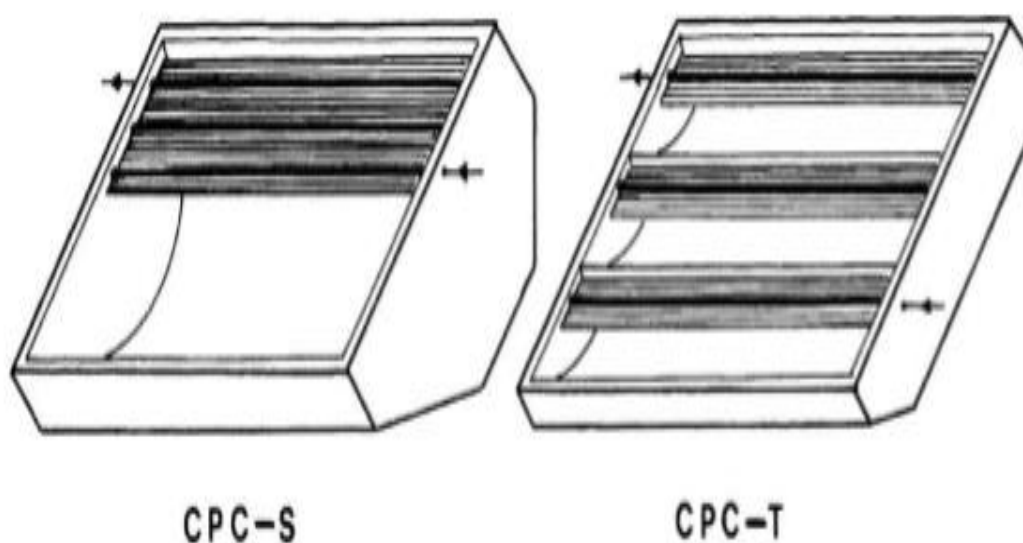
Εικόνα 3.36: Τρεις τύποι ολοκληρωμένων συσκευών συλλέκτη [3.33]

Ο θερμοσιφωνικός ηλιακός συλλέκτης είναι πιο σύνθετος και κοστίζει περισσότερο των συσκευών ICS αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τις συσκευές ICS. Αυτό οφείλεται κυρίως στην χαμηλότερη οπτική απόδοση των συσκευών ICS λόγω της παρεμβολής του κατόπτρου και στις περισσότερες θερμικές απώλειες της δεξαμενής θερμού νερού των ICS.

Σε υψηλές θερμοκρασίες το σύστημα με την καλύτερη λειτουργία είναι η συσκευή ICS-1 λόγω της μεγαλύτερης μείωσης των θερμικών απωλειών, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες καλύτερη λειτουργία παρουσιάζει η συσκευή ICS-2. Η συσκευή ICS-3 είναι η πιο απλή μορφή συστήματος θέρμανσης νερού κατά τη διάρκεια της μέρας με χαμηλό κόστος. Παρόλα αυτά παρουσιάζει υψηλότερες θερμικές απώλειες σε σχέση με τις άλλες δύο συσκευές ICS-1 και ICS-2 [3.32].

3.8.6 Ηλιακοί συλλέκτες με ακίνητους σύνθετους παραβολικούς ανακλαστήρες συγκέντρωσης (συλλέκτες CPC)

Μικρή συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ανακλαστήρων CPC. Συνήθως, οι ανακλαστήρες CPC συνδυάζονται με επίπεδους απορροφητές τοποθετημένους κάθετα ή παράλληλα στο γυάλινο κάλυμμα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται δύο τύποι σύνθετων παραβολικών ανακλαστήρων. Στην εικόνα αριστερά η συσκευή αποτελείται από μία απορροφητική επιφάνεια (CPC-S) ενώ στην εικόνα δεξιά αποτελείται από τρεις μικρότερες απορροφητικές επιφάνειες ενσωματωμένες σε μια συσκευή (CPC-T) [3.33].

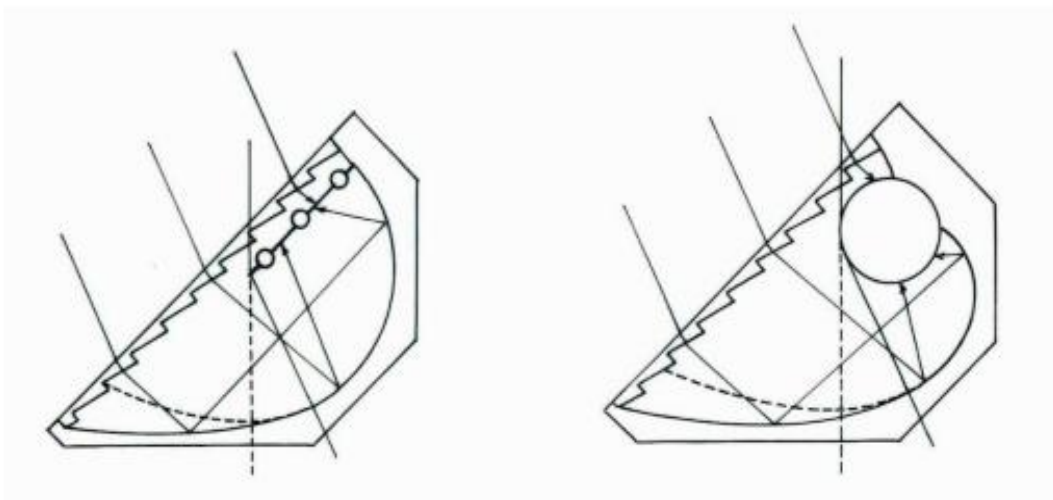


Εικόνα 3.37: Παραβολικοί ανακλαστήρες συγκέντρωσης (CPC) [3.33]

Οι CPC ηλιακοί συλλέκτες έχουν χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες λόγω της υψηλότερης οπτικής απόδοσης των επίπεδων συλλεκτών.

3.8.7 Συνδυασμός διαθλαστήρα Fresnel με ηλιακό συλλέκτη τύπου CPC και ICS

Έχει πραγματοποιηθεί μελέτη συνδυασμού διαθλαστήρων Fresnel με ηλιακούς συλλέκτες τύπου CPC και ICS, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι διαθλαστήρες αυτοί εκτρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στον απορροφητή, σε αντίθεση με τους φακούς Fresnel που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συγκεκριμένο σημείο. Οι παράλληλες πρισματικές ραβδώσεις των διαθλαστήρων εκτρέπουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία πάνω στον απορροφητή με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης [3.34].



Εικόνα 3.38: Συνδυασμός διαθλαστήρων Fresnel με ηλιακό συλλέκτη τύπου CPC και ICS [3.34]

Βιβλιογραφία 3ου Κεφαλαίου

[3.1] http://www.europeangreencities.com/pdf/TrainingTools/65.%20SOLAR%20ENERGY_GR.pdf

[3.2] <http://solarenergynews.cybercivilian.com/category/solar-energy/>

[3.3] http://energysolar.org.uk/sun_power.html

[3.4] <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>

[3.5] <http://www.celsius.gr/1128CC47.el.aspx>

[3.6] http://energysolar.org.uk/solar_power_adv.html

[3.7] <http://air-sun.oospa.gr/systems.html>

[3.8] Παπαζής Σ. «Αξιολόγηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: προβλέψεις με εναλλακτικά σενάρια σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο», Διδακτορική Διατριβή, 1998

[3.9] PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY Development and current research http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2009_report-solar-energy.pdf

[3.10] http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv_guide_jan11.pdf

[3.11] http://www.cres.gr/kape/PV_INFO.pdf

[3.12] http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_photovol.htm

[3.13] <http://www.zeroenergybuildings.org/2012/10/blog-post.html>

- [3.14] http://www.enforce-eeen.eu/wp/gre/wp-content/uploads/2011/10/Solar_2.pdf
- [3.15] <http://www.thermopedia.com/content/1072/https://endlessphere.com/forums/viewtopic.php?f=41&t=46911>
- [3.16] <http://www.thermopedia.com/content/1072/>
- [3.17] Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Κεφάλαιο Γ, Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Αθήνα 2015,
- [3.18] <http://www.stirlingengines.org.uk/sun/sola3.html>
- [3.19] <https://triz-journal.com/using-triz-to-develop-a-new-stirlingbrayton-engine/>
- [3.20] http://www.wikiwand.com/en/Compact_linear_Fresnel_reflector
- [3.21] <http://docplayer.gr/43080417-Enallaktikes-piges-energeias-se-agrotikes-periohes-page-2.html>
- [3.22] Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Κεφάλαιο Β, Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Αθήνα 2015
- [3.23] http://www.interen.gr/index.php/proionta/product/3704-iliakos_syllektis_kenou
- [3.24] <http://www.mechanicalengineeringblog.com/4329-flat-plate-collectors-flat-plate-heat-exchanger-solar-thermal-collectors/>
- [3.25] Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis and D. Patrikios, Colored solar thermal and hybrid PV-TC systems for aesthetically sensitive applications. Proc. Int. Conf. Solar Energy in Architecture and Urban Planning, pp 505-506, Berlin, Germany (1996)
- [3.26] Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, Ηλιακοί συλλέκτες με χρωματιστή απορροφητική επιφάνεια, 6ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ, Βόλος, 3-5, 1999
- [3.27] Y. Tripanagnostopoulos and M. Souliotis, Photovoltaics, small wind turbines and thermal collectors, an effective approach for building integrated solar and wind energy technologies, University of Patras
- [3.28] Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, Ν. Θωμαΐδης, Π. Γιαννούλης, Θερμοσιφωνικές συσκευές θέρμανσης νερού με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες αέρα, 4ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ, Ξάνθη, 1992
- [3.29] <http://13epal-esp-thess.thess.sch.gr/>
- [3.30] http://www.e-domisi.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=1085:-a-&catid=66:2010-06-27-11-44-20&Itemid=97

[3.31] Τρυπαναγνωστόπουλος Ι. Αν. Καθηγητής Παν/μίου Πατρών, Ηλιακή Ενέργεια ένας εθνικός αναπτυξιακός δρόμος, παρουσίαση στο Μουσείο Επιστημών και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών, 1 Φεβρουαρίου 2013

[3.32] Y. Tripanagnostopoulos and P. Yianoulis, Integrated collector – storage systems with suppressed thermal losses, Solar Energy Vol. 48, 31-43, 1992

[3.33] Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis, S. Papaefthimiou and S. Zafeiratos, CPC solar collectors with flat bifacial absorbers, Solar Energy 69, 191-203, 2000

[3.34] Y. Tripanagnostopoulos, CPC reflectors – Fresnel deflector solar thermal system, Cologne 2002

4

Μέθοδοι

4.1 Εισαγωγή στην χρήση νανοϋλικών στα φωτοβολταϊκά

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ένας από τους πιο ευνοϊκούς τρόπους για την επίτευξη της ενεργειακής βιωσιμότητας στην κοινωνία μας [4.1-4.3]. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί είτε σε χρήσιμη θερμότητα είτε στην ηλεκτρική ενέργεια γεγονός που την καθιστά ευέλικτη πηγή ενέργειας [4.4,4.5]. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι οι συσκευές που μπορούν να μεταφέρουν την κατάλληλη ηλιακή ενέργεια σε χρήσιμες εξόδους. Διαχωρίζονται κυρίως σε ηλιακούς συλλέκτες και σε φωτοβολταϊκά πλαίσια [4.6]. Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες είναι συσκευές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας που συλλέγουν την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπουν σε χρήσιμη θερμότητα. Από την άλλη πλευρά, τα φωτοβολταϊκά πάνελ συλλαμβάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια, τα υβριδικά φωτοβολταϊκά (PV) κερδίζουν όλο και περισσότερη προσοχή επειδή αυτές οι συσκευές είναι συγχρόνως θερμικοί συλλέκτες και φωτοβολταϊκά [4.7,4.8]. Συγκεκριμένα, αυτές οι συσκευές προσλαμβάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπουν τόσο σε χρήσιμη θερμότητα όσο και σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το υβριδικό φωτοβολταϊκό (PV) ή θερμικό φωτοβολταϊκό (PVT) είναι ιδανικές συσκευές για χρήση στον κατασκευαστικό τομέα επειδή η παραγόμενη χρήσιμη θερμότητα είναι συνήθως σε χαμηλές θερμοκρασίες (~50°C) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ζεστό νερό οικιακής χρήσης ή για θέρμανση χώρου [4.9,4.10]. Μπορούν να συνδυαστούν με αντλίες θερμότητας για να δώσουν τη ζητούμενη θερμότητα στην είσοδο και την απαιτούμενη είσοδο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, τα κτίρια έχουν μεγάλες ηλεκτρικές ανάγκες και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε αυτά. Πολλές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση των υβριδικών Φ/Β. Οι πιο συνηθισμένες είναι η χρήση συγκεντρωτών (CPC -PVT) [4.11-4.14] και η χρήση νανοϋλικών ως υγρών εργασίας σε αυτές [4.15-4.18]. Τα νανοϋλικά δημιουργούνται με τη διασπορά μεταλλικών νανοσωματιδίων, όπως Cu, CuO, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ και Fe μέσα σε ένα ρευστό το οποίο είναι συνήθως νερό ή θερμικό πετρέλαιο. Η βασική ιδέα είναι να αυξηθεί η υγρή θερμική ικανότητα και με αυτόν τον τρόπο να ενισχυθούν οι συνθήκες μεταφοράς θερμότητας μέσα στην ροή.

Η χρήση νανοϋλικών είναι μία τεχνική που αυξάνει τη θερμική απόδοση του συλλέκτη με ταυτόχρονη αποτελεσματική ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών. Οι

Khanjari et al [4.19] εξέτασαν τη χρήση νανοσωματιδίων Ag ($\varphi= 10\%$) σε νερό και κατέδειξε τελικά ηλεκτρική ενίσχυση 3.9% και θερμική ενίσχυση 12.43%. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλότερη ενίσχυση βρέθηκε με Al_2O_3 ($\varphi= 10\%$) στην ίδια μελέτη με 1.83% ηλεκτρική και 4.54% θερμική ενίσχυση. Οι Ghadiri et al. [4.20] εξέτασαν τη χρήση Fe_3O_4 ($\varphi= 3\%$) στο νερό και τελικά βρήκαν ηλεκτρική βελτίωση 4.93% και θερμική βελτίωση 46.29%. Οι Xu και Kleinstreuer [4.21] διερεύνησαν τη χρήση του νανοσωματιδίου Al_2O_3 σε νερό ($\varphi= 5\%$) και απέδειξαν ηλεκτρική ενίσχυση 9.72% χωρίς θερμική ενίσχυση. Οι ίδιοι ερευνητές [4.22] απέδειξαν ότι η χαμηλότερη συγκέντρωση ($\varphi= 4\%$) του Al_2O_3 οδηγεί μόνο σε ηλεκτρική ενίσχυση 1.45% χωρίς θερμική ενίσχυση. Οι Al-Shamani et al. [4.23] εξέτασαν τρία διαφορετικά νανοσωματίδια με συγκέντρωση 1%. Αποδείχθηκε ότι το SiC οδηγεί σε ηλεκτρική ενίσχυση 42.97% και θερμική ενίσχυση 13.16%, ενώ τα SiO_2 και TiO_2 μειώνουν τις βελτιώσεις. Οι Rejeb et al. [4.24] πραγματοποίησαν μια ενδιαφέρουσα μελέτη σχετικά με τη χρήση του Al_2O_3 και Cu ($\varphi= 0,4\%$) σε υβριδικά φωτοβολταϊκά. Αποδείχθηκε τελικά ότι το Cu οδηγεί σε υψηλότερες ηλεκτρικές και θερμικές βελτιώσεις (0.77% και 79.97% αντίστοιχα) σε σύγκριση με το Al_2O_3 με 0.15% και 8.88% αντίστοιχα. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα Ag και Cu αποδείχθηκαν ότι είναι τα πιο αποτελεσματικά νανοσωματίδια σε σύγκριση με τα άλλα συνηθισμένα, σύμφωνα με τις μελέτες [4.25,4.26]. Μια άλλη ενδιαφέρουσα μελέτη έδειξε ότι υψηλότερες ποσότητες νανοσωματιδίων οδηγούν σε μεγαλύτερες θερμικές και εξεργειακές βελτιώσεις [4.27]. Οι Khanjari et al. [4.28] απέδειξαν ότι η χρήση νανοσωματιδίων Al_2O_3 μέσα στο νερό οδηγεί πάντα σε υψηλότερες θερμικές επιδόσεις σε ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, εξέτασαν διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και επίπεδα παροχής του ρευστού εισόδου προκειμένου να διεξάγουν μια πολυμερή μελέτη.

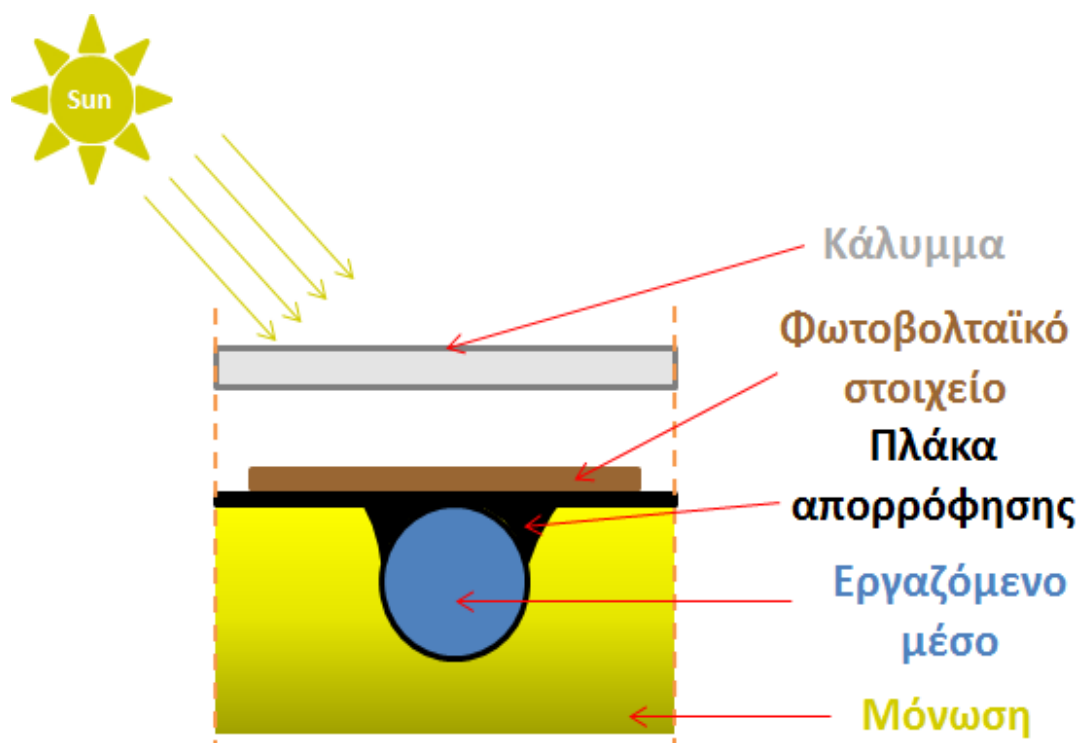
Όπως είναι προφανές από τις προηγούμενες μελέτες της βιβλιογραφίας, η χρήση νανοϋλικών ενισχύει τόσο την ηλεκτρική όσο και τη θερμική απόδοση της υβριδικής φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Η πλειοψηφία των μελετών της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της απόδοσης του συστήματος με νανοϋλικά και όχι στην ημερήσια απόδοση ενός ολοκληρωμένου υβριδικού Φ/Β με μία δεξαμενή αποθήκευσης που λειτουργεί με νανοϋλικό. Αυτή η μελέτη στοχεύει στην εκτίμηση της ετήσιας βελτίωσης της απόδοσης με τη χρήση νανο-σωματιδίων μέσα στο ρευστό βάσης (νερό). Το Cu είναι το εξεταζόμενο νανοσωματίδιο και αυτή η επιλογή βασίζεται στην παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία την υποδεικνύει ως ένα από τα πλέον κατάλληλα νανοσωματίδια. Μια τυπική υβριδική φωτοβολταϊκή μονάδα εξετάζεται για τις καιρικές συνθήκες της Αθήνας (Ελλάδα) για δώδεκα διαφορετικές συνήθειες μέρες, μία για κάθε μήνα. Ένα θερμικό μοντέλο αναπτύσσεται στο EES (Engineering Equation Solver) και επικυρώνεται με μια πειραματική βιβλιογραφική μελέτη. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μεθοδολογία του ISO 9459-2 [4.29] ακολουθείται από τον καθορισμό της ημερήσιας θερμικής απόδοσης του ολοκληρωμένου συστήματος. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εξετάζονται διαφορετικοί όγκοι δεξαμενών αποθήκευσης προκειμένου να καθοριστεί η καταλληλότερη επιλογή για το εξεταζόμενο σύστημα.

4.2 Περιγραφή της Μεθοδολογίας

Αυτό το τμήμα είναι αφιερωμένο στην περιγραφή της ακολουθούμενης μεθοδολογίας. Το εξεταζόμενο μοντέλο περιγράφεται με πολλές λεπτομέρειες και δίνεται η βασική μαθηματική μοντελοποίηση. Επιπλέον, οι ιδιότητες των εργαζόμενων υγρών και τα δεδομένα καιρού δίδονται επίσης με λεπτομέρειες.

4.2.1 Το εξεταζόμενο σύστημα

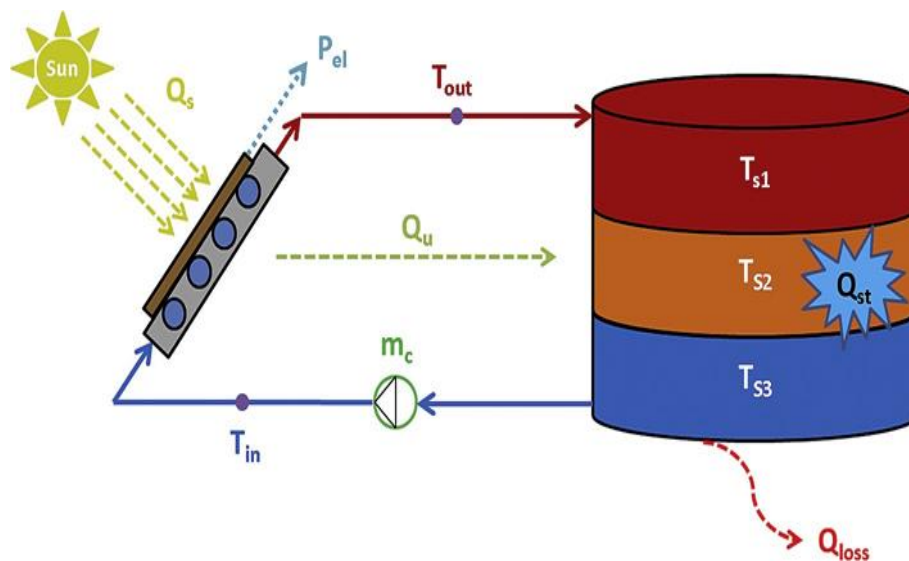
Ο εξεταζόμενος συλλέκτης είναι ένας υβριδικός φωτοβολταϊκός συλλέκτης ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1. Ειδικότερα, μία ενδιάμεση λωρίδα αυτού του συλλέκτη δίνεται σε αυτό το σχήμα. Υπάρχει γυάλινο κάλυμμα, φωτοβολταϊκά κύτταρα, πλάκα απορρόφησης, σωλήνας εργασίας και μόνωση. Στην παρούσα μελέτη διερευνώνται υγρά εργαζόμενα ρευστά και στο συλλέκτη υπάρχουν συνολικά 10 σωλήνες ($N=10$). Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει όλα τα δεδομένα σχετικά με τις διαστάσεις του συλλέκτη και τις άλλες χρήσιμες παραμέτρους [4.30,4.31]. Η υβριδική φωτοβολταϊκή μονάδα εξετάζεται επίσης με δεξαμενή αποθήκευσης και η εικόνα 4.2 απεικονίζει αυτή τη διαμόρφωση.



Εικόνα 4.1: Η εξεταζόμενη ταινία του υβριδικού PV

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ | ΤΙΜΕΣ |
|--|------------------------|
| Συλλεκτική επιφάνεια (A_c) | 2 m ² |
| Μήκος (L) | 1.916 m |
| Αριθμός σωλήνων (N) | 10 |
| Εσωτερική διάμετρος (d_{in}) | 7.72 mm |
| Εξωτερική διάμετρος (d_{out}) | 9.52 mm |
| Διαπερατότητα καλύμματος (τ) | 0.83 |
| Απορροφητικότητα πλάκας (α) | 0.95 |
| Συντελεστής εκπομπής καλύμματος (ϵ_c) | 0.88 |
| Συντελεστής εκπομπής πλάκας (ϵ_p) | 0.93 |
| Απόδοση αναφοράς για το PV (η_{ref}) | 0.173 |
| Παράγων επιφάνειας PV (PF) | 0.804 |
| Θερμοκρασία αναφοράς (T_{ref}) | 298 K |
| Συντελεστής θερμοκρασίας PV (b) | 0.041 K ⁻¹ |
| Πάχος μόνωσης (L_{ins}) | 0.03 m |
| Απόσταση πλάκας-καλύμματος (δ_{pc}) | 0.03 m |
| Κλίση του συλλέκτη (β_{col}) | 45° |
| Θερμική αγωγιμότητα μόνωσης (k_{ins}) | 0.034 W/mK |
| Πυκνότητα (ρ_{np}) | 8933 kg/m ³ |
| Ειδική θερμοχωρητικότητα Cu (c_{pnp}) | 396 J/kgK |
| Θερμική αγωγιμότητα Cu (k_{np}) | 332 W/mK |

Πίνακας 4.1: Βασικές παράμετροι του συλλέκτη



Εικόνα 4.2: Το εξεταζόμενο σύστημα με δεξαμενή αποθήκευσης

4.2.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

4.2.2.1 Βασικές εξισώσεις για τον καθορισμό των επιδόσεων του συλλέκτη

Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη (Q_s) υπολογίζεται ως το προϊόν της περιοχής συλλογής (A_c) επί την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (G_T):

$$Q_s = A_c \cdot G_T \quad (4.1)$$

Η παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας (Q_u) υπολογίζεται από το ενεργειακό ισοζύγιο στον όγκο του ρευστού χρησιμοποιώντας την ροή μάζας (m_c), την ειδική θερμότητα (c_p), καθώς και τις θερμοκρασίες εισόδου (T_{in}) και εξόδου (T_{out}).

$$Q_u = m_c \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4.2)$$

Η θερμική αποτελεσματικότητα (η_{th}) του συλλέκτη είναι η αναλογία της χρήσιμης θερμότητας (Q_u) προς την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο συλλέκτη (Q_s):

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (4.3)$$

Η παραγωγή ηλεκτρισμού (P_{el}) μπορεί να υπολογιστεί ως το προϊόν της περιοχής συλλογής (A_c), του συντελεστή συσσώρευσης (PF) και της αποτελεσματικότητας των φωτοβολταϊκών κυψελών (h_{PV}) [4.28]:

$$P_{el} = A_c \cdot PF \cdot h_{PV} \quad (4.4)$$

Η ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού κυττάρου (h_{PV}) είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του κυττάρου (T_{cell}), της θερμοκρασίας αναφοράς αναφοράς (b) και της απόδοσης αναφοράς (h_{ref}), όπως παρουσιάζεται παρακάτω [4.28,4.30]:

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \cdot (1 - b \cdot (T_{cell} - T_{ref})) \quad (4.5)$$

Η ηλεκτρική απόδοση (η_{el}) του συλλέκτη υπολογίζεται ως η αναλογία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (P_{el}) προς την ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο συλλέκτη (Q_s):

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_s} \quad (4.6)$$

Η συνολική αποτελεσματικότητα (η_{tot}) του συλλέκτη περιλαμβάνει την παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας (Q_u) και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (P_{el}), όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.7) [4.28,4.30]:

$$\eta_{tot} = \frac{Q_u + P_{el}}{Q_s} \quad (4.7)$$

Η εξεργειακή παραγωγή του ηλιακού συλλέκτη (EX_u) περιλαμβάνει την παραγωγή ηλεκτρισμού (P_{el}) και την εξερχόμενη ροή της χρήσιμης θερμότητας [4.32]:

$$EX_u = Q_u - m_c \cdot c_p \cdot T_{am} \cdot \ln\left[\frac{T_{out}}{T_{in}}\right] + P_{el} \quad (4.8)$$

Η εξερχόμενη ροή της ηλιακής ακτινοβολίας (EX_s) εκτιμάται σύμφωνα με το μοντέλο Petela [4.33]. Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη ότι ο ήλιος είναι δεξαμενή ακτινοβολίας και όχι δεξαμενή θερμότητας.

$$EX_s = Q_s \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_{am}}{T_{sun}}\right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_{am}}{T_{sun}}\right]^4\right) \quad (4.9)$$

Η εξεργειακή αποτελεσματικότητα του ηλιακού συλλέκτη (η_{ex}) είναι η αναλογία της χρήσιμης παραγωγής εξεργειακής ενέργειας προς την εξεργειακή ροή της ηλιακής ακτινοβολίας [4.34]:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_u}{Ex_s} \quad (4.10)$$

4.2.2.2 Το ανεπτυγμένο θερμικό μοντέλο

Η βασική εξίσωση στο παρόν μοντέλο είναι το ενεργειακό ισοζύγιο του απορροφητή. Η εξίσωση (4.11) δείχνει ότι η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμότητα, σε ηλεκτρική ενέργεια και σε θερμικές απώλειες (Q_{loss}) [4.32].

$$(\alpha \cdot \tau) \cdot Q_s = Q_u + P_{el} + Q_{loss} \quad (4.11)$$

Η συνολική ωφέλιμη θερμότητα υπολογίζεται επίσης με τη χρήση της μεταφοράς θερμότητας από το σωλήνα στο εργαζόμενο ρευστό. Είναι σημαντικό να δηλωθεί ότι ο σωλήνας και η πλάκα, καθώς και το κελί, υποτίθεται ότι έχουν το ίδιο επίπεδο θερμοκρασίας (T_p). Επιπλέον, η εξίσωση (4.12) περιλαμβάνει το σύμβολο "N" για να ληφθούν υπόψη όλοι οι σωλήνες.

$$Q_u = N \cdot (\pi \cdot D_{in} \cdot L) \cdot h_f \cdot (T_p - T_{fm}) \quad (4.12)$$

Η μέση θερμοκρασία εργασίας (T_{fm}) θεωρείται ότι είναι η μέση τιμή της εισόδου και της θερμοκρασίας εξόδου [4.35]:

$$T_{fm} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (4.13)$$

Οι θερμικές απώλειες του συλλέκτη χωρίζονται στην κορυφή (Q_{top}) και τις απώλειες στον πυθμένα (Q_{back}).

$$Q_{loss} = Q_{top} + Q_{back} \quad (4.14)$$

Οι απώλειες κορυφής μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.15) και (4.16). Η εξίσωση (4.15) περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ πλάκας και καλύμματος, ενώ η εξίσωση (4.16) μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος. Όπως και στην παρούσα μελέτη, αυτές οι θερμικές απώλειες υποτίθεται ότι είναι το ίδιο και έτσι μπορούν να υπολογιστούν τα επίπεδα θερμοκρασίας της πλάκας και του καλύμματος.

$$Q_{top} = A_c \cdot h_{in} \cdot (T_p - T_c) + \frac{A_c \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_c^4)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1} \quad (4.15)$$

$$Q_{top} = A_c \cdot h_{out} \cdot (T_c - T_{am}) + A_c \cdot \epsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad (4.16)$$

Η θερμοκρασία του ουρανού (T_{sky}) εκτιμάται σύμφωνα με τον ακόλουθο συνήθη τύπο [4.24, 4.36]:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T^{1,5} \quad (4.17)$$

Οι απώλειες πυθμένος δίνονται λαμβάνοντας υπόψη τη θερμική αντίσταση της μονωτικής στρώσης και τη θερμότητα με την ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h_{out}):

$$Q_{back} = \frac{Ac(T_p - T_{am})}{\frac{1}{h_{out}} + \frac{L_{ins}}{K_{ins}}} \quad (4.18)$$

4.2.2.3 Υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας

Σε αυτή την υποενότητα, υπολογίζονται οι διάφοροι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Πρώτον, παρουσιάζεται η σχέση μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στην πλάκα και το κάλυμμα (h_{in}). Ο αριθμός Rayleigh (Ra) χρησιμοποιείται σε αυτόν τον υπολογισμό επειδή πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας με φυσική μεταφορά [4.37]:

$$Ra_{air} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_p - T_c) \cdot \delta_{pc}^3}{\nu_{air}^2} \cdot Pr_{air} \quad (4.19)$$

$$Nu_{air} = \frac{h_{in}}{k_{air}} \cdot \delta_{pc} = 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708 \cdot [\sin(1.8 \cdot \beta)]^{1.6}}{\cos(\beta) \cdot Ra_{air}} \right] \cdot a_1 + a_2 \quad (4.20)$$

$$a_1 = \max \left\{ 0, \left[1 - \frac{1708}{\cos(\beta) \cdot Ra_{air}} \right] \right\} \quad (4.21)$$

$$a_2 = \max \left\{ 0, \left[\left(\frac{\cos(\beta) \cdot Ra_{air}}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\} \quad (4.22)$$

Είναι σημαντικό να δηλώσουμε ότι οι ιδιότητες του αέρα υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία μεταξύ θερμοκρασίας καλύμματος και πλάκας [4.37]. Επιπλέον, το b υπολογίζεται ως $1 / (T_p + T_c)$.

Η συνάρτηση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος (h_{out}) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [4.24, 4.38]:

$$h_{out} = 5.7 + 3.8 \cdot U_{wind} \quad (4.23)$$

Για την παρούσα μελέτη, η ταχύτητα ανέμου είναι ίση με 1,3 m / s και σύμφωνα με την εξίσωση (4.21), ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι περίπου 10,64 W / m²K που είναι μια λογική τιμή.

Ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του σωλήνα και του ρευστού εργασίας πραγματοποιείται με τη χρήση του αριθμού Nusselt (Nu_f) για ροή εντός των σωλήνων. Ο αριθμός Reynolds (Re_f) υπολογίζεται ως εξής:

$$Re_f = 4 \frac{\dot{m}_c}{\pi \cdot D_{in} \cdot \mu_f} \quad (4.24)$$

Όλες οι εξεταζόμενες περιπτώσεις σε αυτή την εργασία χαρακτηρίζονται ως ελασματοποιημένες περιπτώσεις επειδή ο αριθμός Reynolds είναι χαμηλότερος από το όριο των 2300. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος τύπος για στρωτή ροή για την περίπτωση νερού [4.39]:

$$Nu_f = \frac{h_f \cdot D_{in}}{k_f} = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot \left(\frac{D_{in} \cdot Re_f \cdot Pr_f}{L}\right)}{1 + 0.04 \left(\frac{D_{in} \cdot Re_f \cdot Pr_f}{L}\right)^{2/3}} \quad (4.25)$$

Αυτή η εξίσωση υποθέτει ότι η θερμοκρασία του σωλήνα είναι σταθερή. Αυτή η υπόθεση είναι λογική λόγω των μικρών αποκλίσεων θερμοκρασίας στο PVT.

4.2.2.4 Μοντελοποίηση Νανοϋλικού

Η χρήση νανοσωματιδίων Cu μέσα στο νερό καθιστά τις υγρές θερμικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές του νερού. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.24) - (4.27) υπολογίζονται οι κυριότερες θερμικές ιδιότητες του νανοϋλικού. Ως ρευστό βάσης (bs) θεωρείται το νερό, ως νανο-σωματίδιο (np) το Cu και το μείγμα τους είναι το νανορευστό (nf). Η παράμετρος (φ) είναι η συγκέντρωση όγκου του νανοσωματιδίου στο ρευστό.

Πυκνότητα (ρ_{nf}) [4.40]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \varphi) + \rho_{np} \cdot \varphi \quad (4.26)$$

Ειδική θερμική ισχύς (c_p , nf) [4.41]:

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \varphi)}{\rho_{nf}} \cdot C_{p,bf} + \frac{\rho_{np} \cdot \varphi}{\rho_{nf}} \cdot C_{p,np} \quad (4.27)$$

Η θερμική αγωγιμότητα (k_{nf}) δίνεται από την εξίσωση Maxwell [4.42,4.43]:

$$K_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2 \cdot \varphi \cdot (k_{bf} - k_{np})}{\frac{k_{np}}{k_{bf}} + 2 + \varphi \cdot \frac{k_{bf} - k_{np}}{k_{bf}}} \quad (4.28)$$

Δυναμικό ιξώδες (μ_{nf}) [4.44]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5 \cdot \varphi + 6.5 \cdot \varphi^2) \quad (4.29)$$

Ο αριθμός Nusselt για το μείγμα νερού-Cu εκτιμάται σύμφωνα με την εξίσωση (4.28) που είναι κατάλληλη για στρωτή ροή, όπως στις εξεταζόμενες περιπτώσεις [4.45]:

$$Nu_{nf} = 0.4328 \cdot (1 + 11.285 \cdot \varphi^{0.754} \cdot (Pe)^{0.218}) \cdot Re^{0.333} \cdot Pr^{0.4} \quad (4.30)$$

Η εξεταζόμενη συγκέντρωση νανοσωματιδίων μέσα στο νερό (φ) είναι έως 4% και σε αυτήν την περιοχή, η εξίσωση (4.28) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια. Ο πίνακας 4.2 περιλαμβάνει τις κύριες θερμικές ιδιότητες για τα διάφορα εργαλεία και για τέσσερα χαρακτηριστικά επίπεδα θερμοκρασίας που σχετίζονται με τα επίπεδα θερμοκρασίας λειτουργίας στο PVT. Είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη χωρητικότητα είναι χαμηλότερη στο νανοϋλικό, ενώ οι άλλες θερμικές ιδιότητες είναι υψηλότερες. Η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα του νανοϋλικού είναι ο κύριος λόγος για τους υψηλότερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας στις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Ιδιαίτερα στην πλανητική ροή, όπως και σε αυτό το έργο, η υψηλότερη

θερμική αγωγιμότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας που είναι σε θέση να υποδείξει τη χρήση των νανοϋλικών.

4.2.2.5 Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης

Η μοντελοποίηση της δεξαμενής αποθήκευσης βασίζεται στη μοντελοποίηση των θερμικών ζωνών που χρησιμοποιείται συνήθως στις ηλιακές θερμικές εφαρμογές [4.37,4.46]. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η δεξαμενή αποθήκευσης χωρίζεται σε οριζόντιες ζώνες οι οποίες συνήθως έχουν το ίδιο ύψος. Η θερμοκρασία του ρευστού μέσα σε κάθε ζώνη θεωρείται ομοιόμορφη. Η μάζα και η θερμότητα ανταλλάσσονται μεταξύ των γειτονικών ζωνών και έτσι υπάρχει διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας μέσα στη δεξαμενή. Το θερμότερο ρευστό με την χαμηλότερη πυκνότητα βρίσκεται στο άνω μέρος της δεξαμενής ενώ το ψυχρότερο νερό με υψηλότερη πυκνότητα αποθηκεύεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής.

| T(K) | φ(%) | ρ(Kg/m ³) | cp(J/kgK) | k(W/mK) | μ*10 ^{^-3} (Pa*s) |
|------|------|-----------------------|-----------|---------|----------------------------|
| 300 | 0 | 997 | 4183 | 0,598 | 0,854 |
| 300 | 1 | 1076 | 3869 | 0,604 | 0,876 |
| 300 | 2 | 1155 | 3597 | 0,609 | 0,899 |
| 300 | 3 | 1235 | 3361 | 0,614 | 0,923 |
| 300 | 4 | 1314 | 3153 | 0,62 | 0,949 |
| 320 | 0 | 989 | 4182 | 0,627 | 0,577 |
| 320 | 1 | 1069 | 3865 | 0,633 | 0,592 |
| 320 | 2 | 1148 | 3593 | 0,638 | 0,608 |
| 320 | 3 | 1228 | 3355 | 0,644 | 0,624 |
| 320 | 4 | 1307 | 3147 | 0,65 | 0,641 |
| 340 | 0 | 980 | 4185 | 0,647 | 0,422 |
| 340 | 1 | 1059 | 3866 | 0,653 | 0,433 |
| 340 | 2 | 1139 | 3591 | 0,659 | 0,444 |
| 340 | 3 | 1218 | 3352 | 0,665 | 0,456 |
| 340 | 4 | 1298 | 3142 | 0,671 | 0,469 |
| 360 | 0 | 967 | 4201 | 0,66 | 0,326 |
| 360 | 1 | 1047 | 3876 | 0,666 | 0,335 |
| 360 | 2 | 1127 | 3598 | 0,672 | 0,343 |
| 360 | 3 | 1206 | 3356 | 0,678 | 0,353 |
| 360 | 4 | 1286 | 3144 | 0,684 | 0,362 |

Πίνακας 4.2: Θερμικές ιδιότητες του νανοϋλικού (Νερό +Cu) και του νερού.

Το γενικό ενεργειακό ισοζύγιο στη δεξαμενή αποθήκευσης δίνεται από την εξίσωση (4.31). Η αποθηκευμένη ενέργεια (Q_{st}) είναι η διαφορά μεταξύ της ωφέλιμης θερμότητας του συλλέκτη μείον τις θερμικές απώλειες στο περιβάλλον. Στην παρούσα μελέτη, δεν υπάρχει εξαγωγή φορτίου κατά τη διάρκεια της καθημερινής λειτουργίας και θεωρείται ότι το φορτίο εξάγεται στο τέλος της ημέρας.

$$Q_{st}=Q_u-Q_{loss} \quad (4.31)$$

Οι εξισώσεις (4.32) - (4.34) είναι οι ενεργειακές ισορροπίες στις τρεις χρησιμοποιούμενες ζώνες ανάμιξης. Αυτές οι εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου είναι

παρόμοιες με την εξίσωση (4.31) αλλά είναι πιο αναλυτικές και προσαρμοσμένες για κάθε ζώνη ξεχωριστά.

$$\frac{\rho_f \cdot V_T}{3} \cdot c_p \cdot \frac{dT_{s1}}{dt} = m_c \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{s1}) - U_T \cdot A_{T1} \cdot (T_{s1} - T_{am}) \quad (4.32)$$

$$\frac{\rho_f \cdot V_T}{3} \cdot c_p \cdot \frac{dT_{s2}}{dt} = m_c \cdot c_p \cdot (T_{s1} - T_{s2}) - U_T \cdot A_{T2} \cdot (T_{s2} - T_{am}) \quad (4.33)$$

$$\frac{\rho_f \cdot V_T}{3} \cdot c_p \cdot \frac{dT_{s3}}{dt} = m_c \cdot c_p \cdot (T_{s2} - T_{s3}) - U_T \cdot A_{T3} \cdot (T_{s3} - T_{am}) \quad (4.34)$$

Είναι σημαντικό να δηλώνεται ότι η θερμοκρασία εισόδου στο συλλέκτη θεωρείται ότι είναι ίση με τη στάθμη θερμοκρασίας στο κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης:

$$T_{in} = T_{s3} \quad (4.35)$$

Η μέση θερμοκρασία δεξαμενής αποθήκευσης (T_s) είναι περίπου η μέση τιμή των τριών επιπέδων θερμοκρασίας μέσα στη δεξαμενή. Αυτή η υπόθεση είναι λογική επειδή όλες οι ζώνες περιλαμβάνουν την ίδια ποσότητα υγρού.

$$T_s = \frac{T_{s1} + T_{s2} + T_{s3}}{3} \quad (4.36)$$

Οι εξισώσεις (4.37) - (4.39) δίνουν την εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής αποθήκευσης (A_T) για τις τρεις ζώνες ανάμιξης:

$$A_{T1} = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} + \frac{\pi \cdot D_T \cdot L_T}{3} \quad (4.37)$$

$$A_{T2} = \frac{\pi \cdot D_T \cdot L_T}{3} \quad (4.38)$$

$$A_{T3} = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} + \frac{\pi \cdot D_T \cdot L_T}{3} \quad (4.39)$$

Η δεξαμενή αποθήκευσης θεωρείται κυλινδρική και ο όγκος της (V_T) υπολογίζεται ως:

$$V_T = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L_T \quad (4.40)$$

Τέλος, είναι σημαντικό να δηλωθεί ότι η διάμετρος της δεξαμενής (D_T) έχει επιλεγεί να είναι ίση με το συνολικό ύψος (L_T) [4.46] μια παραδοχή χωρίς σημαντική επίπτωση στα αποτελέσματα, όπως αποδεικνύεται μετά από μια απλή ανάλυση ευαισθησίας.

4.2.2.6 Δείκτες ημερήσιων επιδόσεων

Η ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανά m^2 στο επίπεδο συλλέκτη (H_T) δίνεται ως εξής:

$$H_T = \int_{N_D} G_T \cdot 10^{-3} \cdot dt_h \quad (4.41)$$

Η ημερήσια ηλιακή ενέργεια (E_S) στο 'άνοιγμα' του συλλέκτη υπολογίζεται ως:

$$E_S = A_c \cdot H_T \quad (4.42)$$

Η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια (E_{st}) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση.

$$E_{st} = \frac{\rho_f \cdot V_T \cdot C_p \cdot (T_{s,end} - T_{s,start}) \cdot 10^{-3}}{3600} \quad (4.43)$$

Αυτή η εξίσωση λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία του ρευστού στην αρχή και στο τέλος της ημέρας. Η αποθηκευμένη ενέργεια μέσα στη δεξαμενή θεωρείται ότι είναι η χρήσιμη θερμική παραγωγή σε καθημερινή βάση, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9459-2.

Η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (E_{el}) υπολογίζεται ως:

$$E_{el} = \int_{N_D} P_{el} \cdot 10^{-3} \cdot dt_h \quad (4.44)$$

Η ημερήσια εξεργειακή παραγωγή του συστήματος (Z_u) υπολογίζεται ως:

$$Z_u = E_{el} + E_{st} \cdot \left(1 - \frac{T_{am}}{T_{s,end}}\right) \quad (4.45)$$

Η συνολική εξεργεια της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (Z_s) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.45), χρησιμοποιώντας το μοντέλο Petela:

$$Z_s = A_c \cdot H_T \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_{am}}{T_{sun}}\right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_{am}}{T_{sun}}\right]^4\right) \quad (4.46)$$

Η ημερήσια θερμική αποτελεσματικότητα του συστήματος ($h_{th, sys}$), η οποία συνδέεται με το σύστημα δεξαμενής συλλογής και αποθήκευσης, δίδεται ως

$$\eta_{th,sys} = \frac{E_{st}}{E_S} \quad (4.47)$$

Η ημερήσια ηλεκτρική απόδοση του συστήματος ($h_{el, sys}$) δίνεται ως εξής:

$$\eta_{el,sys} = \frac{E_{el}}{E_S} \quad (4.48)$$

Η ημερήσια συνολική απόδοση (θερμική και ηλεκτρική) του συστήματος ($h_{tot, sys}$) δίνεται ως εξής:

$$\eta_{\text{tot,sys}} = \frac{E_{el} + E_{st}}{E_s} \quad (4.49)$$

Η ημερήσια εξεργειακή αποτελεσματικότητα ($h_{\text{ex, sys}}$) υπολογίζεται ως:

$$\eta_{\text{ex,sys}} = \frac{Z_u}{Z_s} \quad (4.50)$$

4.2.2.7 Μοντελοποίηση μετεωρολογικών δεδομένων

Τα δεδομένα καιρού σε αυτή την εργασία αφορούν τις κλιματικές συνθήκες της Αθήνας ($37^{\circ}59'N$, $23^{\circ}44'E$). Η 21^η ημέρα κάθε μήνα επιλέγεται ως η πλέον κατάλληλη ημέρα για εξέταση, σύμφωνα με τα πρότυπα ASHRAE. Για αυτές τις μέρες, υπολογίζονται ορισμένες χρήσιμες παράμετροι. Η γωνία κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας (δ) δίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.51) [4.37]. Η παράμετρος "Ημέρα" είναι ο αριθμός ημέρας του έτους (για παράδειγμα n ημέρας = 1 για την 1η Ιανουαρίου).

| Μήνας | H_T | $G_{T,max}$ | Day | δ | N_D | $T_{am,m}$ | DR |
|-------------|-----------------------|---------------------|-----|----------|-------|------------|-------|
| | (kWh/m ²) | (W/m ²) | (-) | (μοίρες) | (h) | (K) | (K) |
| Ιανουάριος | 3,308 | 531,3 | 21 | -20,14 | 9,78 | 281,61 | 7,67 |
| Φεβρουάριος | 4,236 | 615,6 | 52 | -11,23 | 10,81 | 282,41 | 8,21 |
| Μάρτιος | 5,161 | 675,5 | 81 | 0 | 12 | 285,25 | 9,17 |
| Απρίλιος | 5,829 | 692,1 | 111 | 11,58 | 13,23 | 289,58 | 10,36 |
| Μάιος | 6,202 | 685,1 | 141 | 20,14 | 14,22 | 294,18 | 11,45 |
| Ιούνιος | 6,466 | 693,8 | 172 | 23,45 | 14,64 | 297,97 | 12,17 |
| Ιούλιος | 6,649 | 732,4 | 202 | 20,44 | 14,26 | 299,71 | 12,29 |
| Αύγουστος | 6,533 | 774,5 | 233 | 11,75 | 13,25 | 299,03 | 11,78 |
| Σεπτέμβριος | 5,842 | 766 | 264 | -0,2 | 11,98 | 296,02 | 10,77 |
| Οκτώβριος | 4,697 | 686,3 | 294 | -11,75 | 10,75 | 291,69 | 9,57 |
| Νοέμβριος | 3,525 | 568,5 | 325 | -20,44 | 9,74 | 286,94 | 8,45 |
| Δεκέμβριος | 2,988 | 501,4 | 355 | -23,45 | 9,36 | 283,33 | 7,77 |

Πίνακας 4.3: Δεδομένα καιρού για την 21η ημέρα κάθε μήνα [4.49,4.50].

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (284 + Day)}{365}\right) \quad (4.51)$$

Η διάρκεια ημέρας (N_D) υπολογίζεται ως [4.37]:

$$N_D = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan(\varphi_0) \cdot \tan(\delta)) \quad (4.52)$$

Η ηλιακή ακτινοβολία για κάθε στιγμή (G_T) υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο [4.47]. Αυτός ο τύπος προϋποθέτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο του συλλέκτη είναι μια συνάρτηση ημιτονοειδής που είναι μια ρεαλιστική υπόθεση.

$$G_T = \frac{\pi \cdot H_T \cdot 10^3}{2 \cdot N_D} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t_h)}{N_D}\right) \quad (4.53)$$

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{am}) κατά τη διάρκεια της ημέρας θεωρείται ότι δίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση [4.48]:

$$T_{am} = T_{am,m} + \frac{DR}{2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t_h - \frac{N_D}{2} - 2}{24}\right) \quad (4.54)$$

Η εξίσωση (4.53) δείχνει ότι η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος παρατηρείται στις 14:00, μια ρεαλιστική παραδοχή. Θα ήταν χρήσιμο να δηλώσουμε ότι η χρονική παράμετρος (t_h) λαμβάνει τιμές από 0 έως N_D στις εξισώσεις (4.53) και (4.54). Ο Πίνακας 4.3 περιλαμβάνει όλα τα σημαντικά δεδομένα σχετικά με το ηλιακό δυναμικό και το επίπεδο θερμοκρασίας περιβάλλοντος για όλους τους εξεταζόμενους μήνες [4.49,4.50]. Επίσης, η γωνία κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας και η διάρκεια της ημέρας δίνονται για τις δώδεκα ημέρες που εξετάστηκαν. Οι Εικόνες 4.3 και 4.4 απεικονίζουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και το επίπεδο θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων ημερών αντιστοίχως. Είναι σημαντικό να δηλώνουμε ότι αυτά τα καιρικά δεδομένα αντιστοιχούν στα στοιχεία της βιβλιογραφίας για το κλίμα της Αθήνας και αντιπροσωπεύουν τυπικές ημέρες για όλους τους μήνες. Έτσι, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η μηνιαία απόδοση του συλλέκτη εξετάζοντας μόνο μία ημέρα κάθε μήνα.

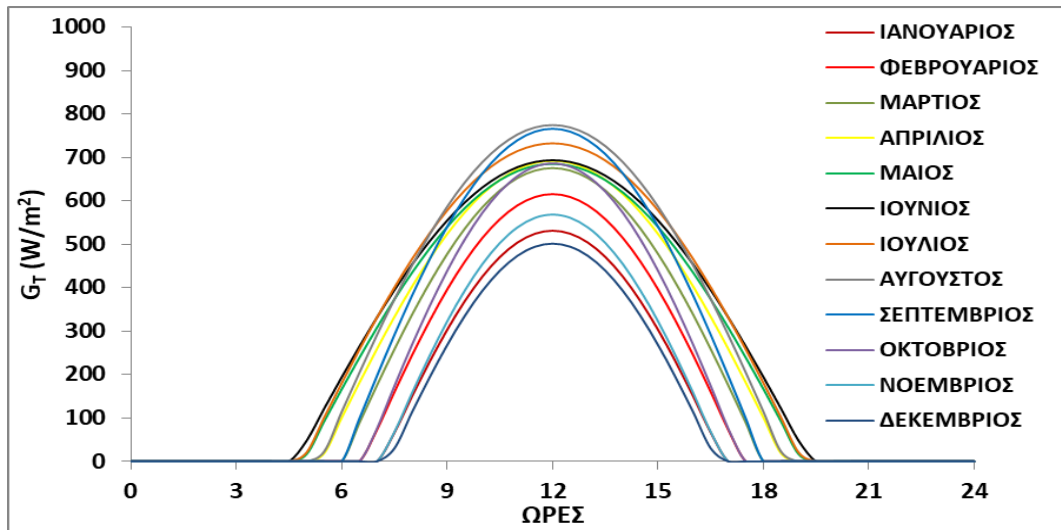
4.2.3 Ακολουθούμενη μεθοδολογία

Σε αυτή την υποενότητα δίδονται οι βασικές πληροφορίες σχετικά με την ακολουθούμενη μεθοδολογία. Οι εξισώσεις του εδαφίου 4.2.2 χρησιμοποιούνται στο αναπτυγμένο θερμικό μοντέλο το οποίο είναι γραμμένο σε EES (Μηχανικός Εξισωτής Εξισώσεων) [4.51]. Οι ιδιότητες του νερού έχουν ληφθεί από τις βιβλιοθήκες EES [4.52], ενώ οι ιδιότητες ναουλικού έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.24) - (4.27) και όλες οι ιδιότητες περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.2. Η συγκέντρωση ναουλικού εξετάζεται έως 4%, εύλογο εύρος το οποίο επιλέγεται συνήθως σε παρόμοιες μελέτες. Σημαντικές παράμετροι προσομοίωσης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.4. Ο ρυθμός ογκομετρικής ροής (V_c) επιλέγεται να είναι 3 L / min για την πλειονότητα των εξεταζόμενων περιπτώσεων και η εξίσωση (4.54) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο αυτή η παράμετρος συνδέεται με την ταχύτητα ροής μάζας (m_c) στην αναπτυγμένη μοντελοποίηση:

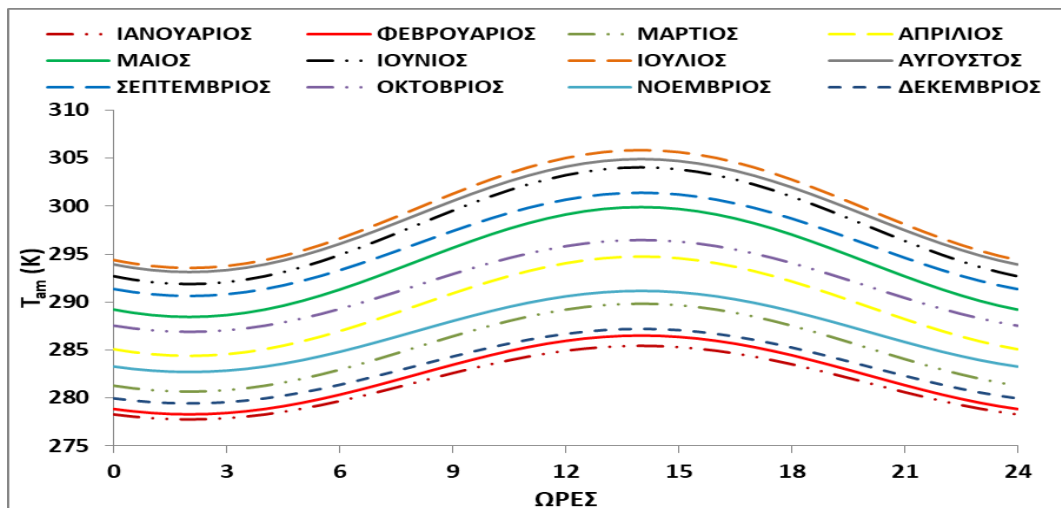
$$V_c[\text{L/min}] = \frac{m_c}{\rho_f} \cdot (1000\text{L/m}^3) \cdot (60\text{s/min}) \quad (4.55)$$

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να αναφέρουμε το φάσμα των παραμέτρων που εξετάστηκαν. Η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου ρευστού και η θερμοκρασία περιβάλλοντος εξετάζονται σε κάθε περίπτωση μέχρι 360 K. Ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης κυμαίνεται από 50 λίτρα έως 250 λίτρα με ένα βήμα ίσο με 50 λίτρα. Ο ρυθμός ροής εξετάζεται από 0.01 kg/s·m² έως 0.04 kg/s·m² με ένα βήμα ίσο με 0.1 kg/s·m². Ο συντελεστής εκπομπής της πλάκας με τιμές από 0.1 έως 0.9. Η ταχύτητα

του ανέμου με τιμές από 1 έως 5m/s με βήμα 1 m/s και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με τιμές από 200 έως 1000W/m² με βήμα 200 W/m².



Εικόνα 4.3: Καθημερινή ηλιακή ακτινοβολία για όλους τους εξεταζόμενους μήνες.



Εικόνα 4.4: Ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος για όλους τους εξεταζόμενους μήνες

| Παράμετρος | Τιμή |
|---|------------------------|
| Συντελεστής θερμικών απωλειών της δεξαμενής αποθήκευσης (U_T) | 0.5 W/m ² K |
| Θερμοκρασία του Ήλιου (T_{sun}) | 5770 K |
| Γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας (ϕ_0) | 37.97° |
| Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_T) | 800 W/m ² |
| Ταχύτητα του ανέμου (U_{wind}) | 1.3 m/s |
| Θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) | 300 K |

Πίνακας 4.4: Τιμές αναφοράς διαφόρων παραμέτρων.

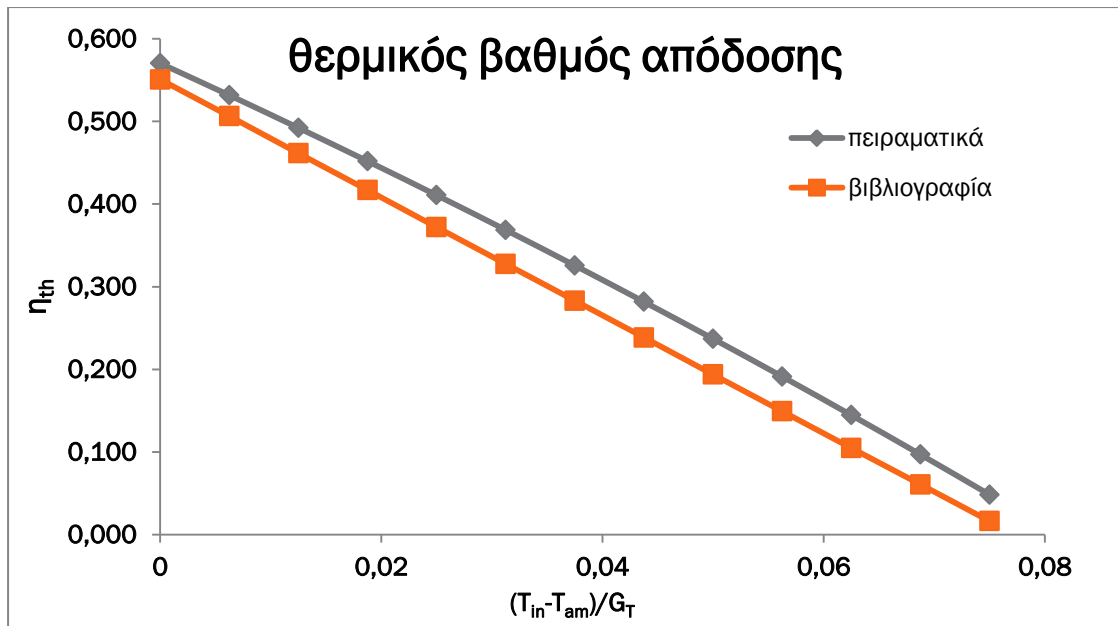
Στην προσομοίωση του χρονικά εξαρτώμενου προβλήματος, το ολοκληρωμένο σύστημα (συλλέκτης και δεξαμενή αποθήκευσης) εξετάζεται κατά τις ώρες της ημέρας, με την παράμετρο t_h να κυμαίνεται από 0 έως N_D . Κατά τη διάρκεια της ημέρας, δεν υπάρχει θερμικό φορτίο και όλη η παραγωγή χρήσιμης θερμότητας αποθηκεύεται στη δεξαμενή. Στο τέλος της ημέρας, υπολογίζεται όλη η αποθηκευμένη χρήσιμη ενέργεια, όπως υποδεικνύεται στο ISO 9459-2. Συγκεκριμένα, η εξίσωση (4.46) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της χρήσιμης θερμικής απόδοσης. Στην προσομοίωση της ημερήσιας απόδοσης, οι διαφορικές εξισώσεις που σχετίζονται με τη στρωματοποίηση της δεξαμενής αποθήκευσης επιλύονται με τη χρήση μιας συνήθους μεθόδου ανάλυσης, όπως προκύπτει από την εξίσωση (4.56):

$$\frac{\theta T}{\theta t} = \frac{T^{NEW} - T^{OLD}}{\Delta t} \quad (4.56)$$

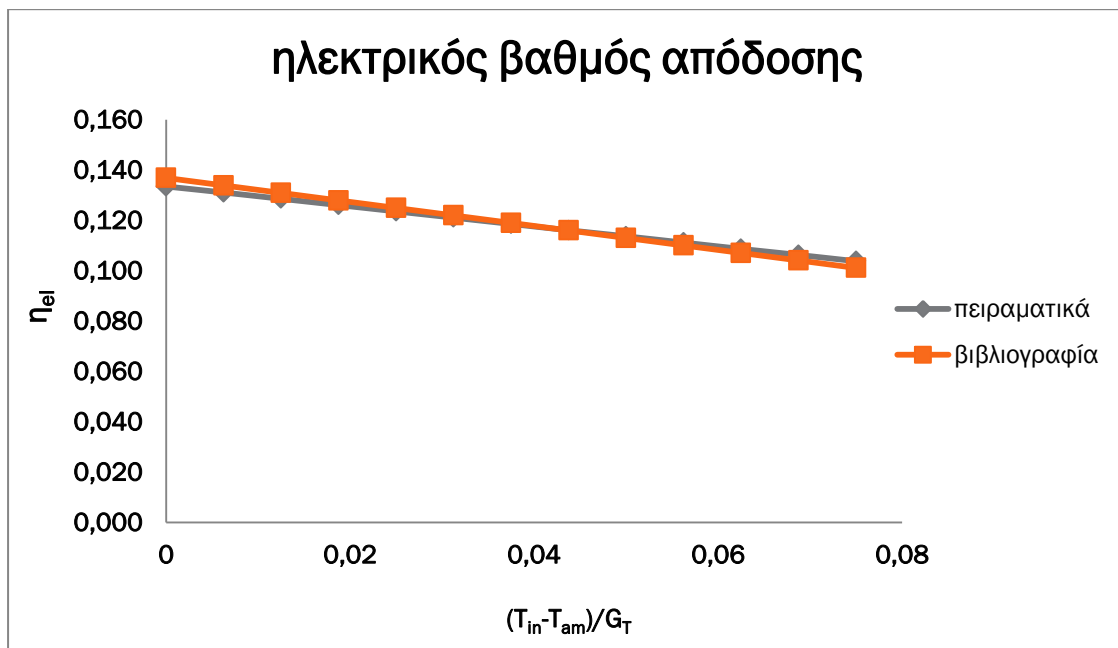
Σε αυτή τη μελέτη, το βήμα χρόνου (Dt) της διαδικασίας διαλύματος επιλέγεται να είναι 30 δευτερόλεπτα, μετά από μια απλή ανάλυση ευαισθησίας. Στην αρχή της ημέρας, το ρευστό μέσα στο δοχείο αποθήκευσης θεωρείται ότι έχει θερμοκρασία ίση με το περιβάλλον, κάτι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9459-2.

4.2.4 Επικύρωση του αναπτυγμένου μοντέλου

Το αναπτυγμένο θερμικό μοντέλο επικυρώνεται με τη βιβλιογραφική μελέτη [4.30]. Σε αυτή τη μελέτη, οι συγγραφείς εξέτασαν πειραματικά και αριθμητικά ένα υβριδικό Φ/Β με τα ίδια χαρακτηριστικά με τον Πίνακα 4.1. Σε αυτή την υποενότητα, γίνεται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας [4.30] και των αποτελεσμάτων ενός ανεπτυγμένου θερμικού μοντέλου αυτού. Η Εικόνα 4.5 δείχνει την απόκλιση της θερμικής απόδοσης μεταξύ της μελέτης αυτής και της βιβλιογραφίας [4.30]. Η Εικόνα 4.6 δείχνει την απόκλιση της ηλεκτρικής απόδοσης μεταξύ της μελέτης αυτής και της βιβλιογραφίας [4.30]. Είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα της θερμικής απόδοσης και της ηλεκτρικής απόδοσης επικυρώνουν την ακρίβεια του ανεπτυγμένου θερμικού μοντέλου. Ειδικότερα, η μέση απόκλιση της θερμικής απόδοσης είναι περίπου 2,3% και της ηλεκτρικής απόδοσης 1,3%. Χαμηλές τιμές που δείχνουν σαφώς ότι η υιοθέτηση του αναπτυγμένου θερμικού μοντέλου είναι αξιόπιστη.



Εικόνα 4.5: Απόκλιση της θερμικής αποτελεσματικότητας μεταξύ των παρόντων αποτελεσμάτων και των πειραματικών αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας των Bhattarai et al. [4.30].



Εικόνα 4.6: Απόκλιση της ηλεκτρικής αποτελεσματικότητας μεταξύ των παρόντων αποτελεσμάτων και των πειραματικών αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας των Bhattarai et al. [4.30]

Οι εξισώσεις (4.57) - (4.60) δίνουν τη θερμική και ηλεκτρική απόδοση για τα δύο εξεταζόμενα ρευστά. Αυτές οι εξισώσεις έχουν δημιουργηθεί με την προσέγγιση των καμπυλών που προέκυψαν από την μελέτη με πολυώνυμα. Το R^2 σε αυτές τις προσεγγίσεις είναι κοντά στην τιμή 1 γεγονός που αποδεικνύει το κατάλληλο αποτέλεσμα.

$$\eta_{th}[\text{water}] = 0.5708 - 6.1017 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{am}}{G_T}\right) - 0.01417 \cdot \frac{(T_{in} - T_{am})^2}{G_T} \quad (4.57)$$

$$\eta_{th}[\text{nanofluid}] = 0.6056 - 6.4112 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{am}}{G_T}\right) - 0.01610 \cdot \frac{(T_{in} - T_{am})^2}{G_T} \quad (4.58)$$

$$\eta_{el}[\text{water}] = 0.1336 - 0.3974 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{am}}{G_T}\right) \quad (4.59)$$

$$\eta_{el}[\text{nanofluid}] = 0.1358 - 0.4251 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{am}}{G_T}\right) \quad (4.60)$$

Βιβλιογραφία 4^ο κεφαλαίου

- [4.1] S. Hassani, R.A. Taylor, S. Mekhilef, R. Saidur, A cascade nanofluid-based PV/T system with optimized optical and thermal properties, *Energy* 112 (2016) 963-975.
- [4.2] W. An, J. Zhang, T. Zhu, N. Gao, Investigation on a spectral splitting photovoltaic/thermal hybrid system based on polypyrrole nanofluid: preliminary test, *Renew. Energy* 86 (2016) 633-642.
- [4.3] C. Kandilli, G. Kùlahlı, Performance analysis of a concentrated solar energy for lighting-power generation combined system based on spectral beam splitting, *Renew. Energy* 101 (2017) 713-727.
- [4.4] J. Noailly, R. Smeets, Directing technical change from fossil-fuel to renewable energy innovation: an application using firm-level patent data, *J. Environ. Econ. Manag.* 72 (2015) 15-37.
- [4.5] N. Kittner, S.H. Gheewala, D.M. Kammen, Energy return on investment (EROI) of mini-hydro and solar PV systems designed for a mini-grid, *Renew. Energy* 99 (2016) 410-419.
- [4.6] C. Lamnatou, D. Chemisana, Photovoltaic/thermal (PVT) systems: a review with emphasis on environmental issues, *Renew. Energy* 105 (2017) 270-287.
- [4.7] S. Hassani, R. Saidur, S. Mekhilef, R.A. Taylor, Environmental and exergy benefit of nanofluid-based hybrid PV/T systems, *Energy Convers. Manag.* 123 (2016) 431-444.

- [4.8] F. Crisostomo, N. Hjerrild, S. Mesgari, Q. Li, R.A. Taylor, A hybrid PV/T collector using spectrally selective absorbing nanofluids, *Appl. Energy* 193 (2017) 1-14.
- [4.9] M.F.I. Al Imam, R.A. Beg, M.S. Rahman, M.Z.H. Khan, Performance of PVT solar collector with compound parabolic concentrator and phase change materials, *Energy Build.* 113 (2016) 139-144.
- [4.10] M. Fiorentini, P. Cooper, Z. Ma, Development and optimization of an innovative HVAC system with integrated PVT and PCM thermal storage for a net-zero energy retrofitted house, *Energy Build.* 94 (2015) 21-32.
- [4.11] D. Atheaya, A. Tiwari, G.N. Tiwari, Exergy analysis of photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) for constant collection temperature mode, *Sol. Energy* 135 (2016) 222-231.
- [4.12] R. Tripathi, G.N. Tiwari, I.M. Al-Helal, Thermal modelling of N partially covered photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) collectors connected in series, *Sol. Energy* 123 (2016) 174-184.
- [4.13] R. Tripathi, G.N. Tiwari, Energetic and exergetic analysis of N partially covered photovoltaic thermal-compound parabolic concentrator (PVT-CPC) collectors connected in series, *Sol. Energy* 137 (2016) 441-451.
- [4.14] D. Atheaya, A. Tiwari, G.N. Tiwari, I.M. Al-Helal, Analytical characteristic equation for partially covered photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC), *Sol. Energy* 111 (2015) 176-185.
- [4.15] A. Shukla, K. Kant, A. Sharma, P. Henry Biwole, Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: a review, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 160 (2017) 275-286.
- [4.16] A.A. Hussien, M.Z. Abdullah, M.A. Al-Nimr, Single-phase heat transfer enhancement in micro/minichannels using nanofluids: theory and applications, *Appl. Energy* 164 (2016) 733-755.
- [4.17] A.M. Elbreki, M.A. Alghoul, A.N. Al-Shamani, A.A. Ammar, Bitu Yegani, Alsanossi M. Aboghrara, M.H. Rusaln, K. Sopian, The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: a critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 602-647.
- [4.18] O. Mahian, A. Kianifar, S.A. Kalogirou, I. Pop, S. Wongwises, A review of the applications of nanofluids in solar energy, *Int. J. Heat Mass Transf.* 57 (2) (2013) 582-594.
- [4.19] Y. Khanjari, F. Pourfayaz, A.B. Kasaeian, Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system, *Energy Convers. Manag.* 122 (2016) 263-278.

[4.20] M. Ghadiri, M. Sardarabadi, M. Pasandideh-fard, A.J. Moghadam, Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids, *Energy Convers. Manag.* 103 (2015) 468-476.

[4.21] Z. Xu, C. Kleinstreuer, Concentration photovoltaic/thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating, *Energy Convers. Manag.* 87 (2014) 504-512.

[4.22] Z. Xu, C. Kleinstreuer, Computational analysis of nanofluid cooling of high concentration photovoltaic cells, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 6 (2014) 031009.

[4.23] A.N. Al-Shamani, K. Sopian, S. Mat, H.A. Hasan, A.M. Abed, M.H. Ruslan, Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions, *Energy Convers. Manag.* 124 (2016) 528-542.

[4.24] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C.E. Me'ne'zo, M. Passandideh-Fard, M.H. Dhaou,

A.Jemni, Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system, *Energy Convers. Manag.* 110 (2016) 367-377.

[4.25] T. Mittal, S. Saroha, V. Bhalla, V. Khullar, H. Tyagi, R.A. Taylor, et al., Numerical study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector using nanofluids, in: *ASME 2013 4th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*, American Society of Mechanical Engineers, 2013. P. V001T02A7-VT02A7.

[4.26] S. Saroha, T. Mittal, P.J. Modi, V. Bhalla, V. Khullar, H. Tyagi, et al., Theoretical analysis and testing of nanofluids-based solar photovoltaic/thermal hybrid collector, *J. Heat. Transf.* 137 (2015) 091015.

[4.27] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, S.Z. Heris, Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units), *Energy* 66 (2014) 264-272.

[4.28] Y. Khanjari, A.B. Kasaeian, F. Pourfayaz, Evaluating the environmental parameters affecting the performance of photovoltaic thermal system using nanofluid, *Appl. Therm. Eng.* 115 (2017) 178-187.

[4.29] ISO 9459-2, *Solar Heating. Domestic Water Heating Systems e Part 2: Outdoor Test Methods for System Performance Prediction of SolarOnly Systems*, 1995.

[4.30] S. Bhattarai, J.-H. Oh, S.-H. Euh, G.K. Kافلة, D.H. Kim, Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 103 (2012) 184-193.

- [4.31] T.T. Chow, G. Pei, K.F. Fong, Z. Lin, A.L.S. Chan, J. Ji, Energy and exergy analysis of photovoltaic thermal collector with and without glass cover, *Appl. Energy* 86 (3) (2009) 310-316.
- [4.32] F. Yazdanifard, M. Ameri, E. Ebrahimnia-Bajestan, Performance of nanofluid-based photovoltaic/thermal systems: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (2017) 323-352.
- [4.33] R. Petela, Exergy of undiluted thermal radiation, *Sol. Energy* 74 (6) (2003) 469-488.
- [4.34] S. Pavlovic, A.M. Daabo, E. Bellos, V. Stefanovic, S. Mahmoud, R.K. Al-Dadah, Experimental and numerical investigation on the optical and thermal performance of solar parabolic dish and corrugated spiral cavity receiver, *J. Clean. Prod.* 150 (2017) 75-92.
- [4.35] W. Fan, G. Kokogiannakis, Z. Ma, P. Cooper, Development of a dynamic model for a hybrid photovoltaic thermal collector e solar air heater with fins, *Renew. Energy* 101 (2017) 816-834.
- [4.36] W.C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, *QJR Meteorol. Soc.* 89 (1963) 339-340.
- [4.37] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, second ed., Wiley J. & Sons, Inc, New York, 1991.
- [4.38] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT), *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 157 (2016) 533-542.
- [4.39] C. Tzivanidis, E. Bellos, D. Korres, K.A. Antonopoulos, G. Mitsopoulos, Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector, *Case Stud. Therm. Eng.* 6 (2015) 226-237.
- [4.40] M. Ayatollahi, S.H. Nasiri, A.B. Kasaeian, Convection heat transfer modeling of Ag nanofluid using different viscosity theories, *IIUMEngJ* 13 (1) (2012).
- [4.41] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *Int. J. Heat. Mass Transf.* 54 (2011) 4410-4428.
- [4.42] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Hamilton-Crosser model, *J. Nanoparticle Res.* 6 (4) (2004) 355-361.
- [4.43] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, second ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.

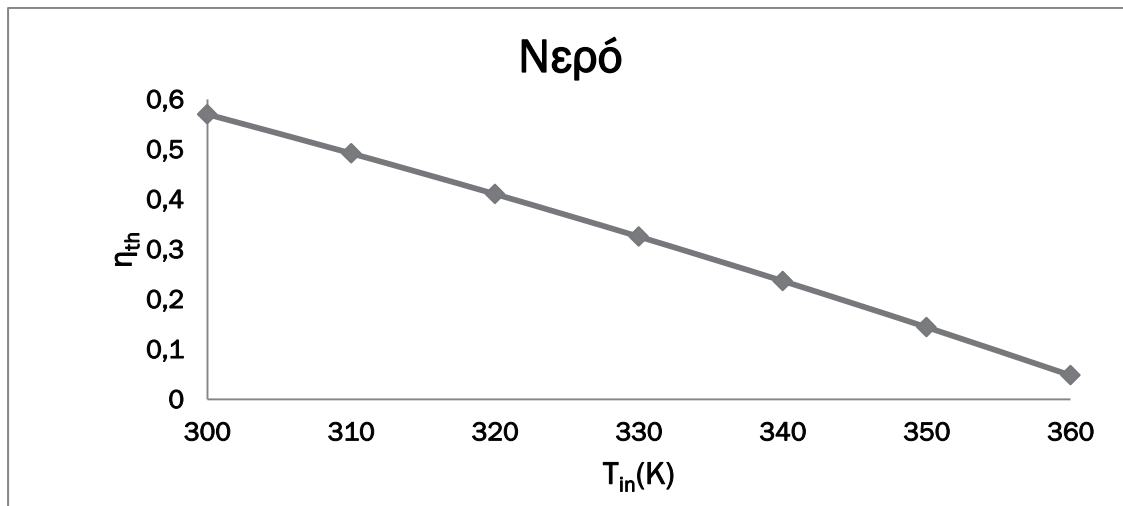
- [4.44] G.K. Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, *J. Fluid Mech.* 83 (1977) 97-117.
- [4.45] Q. Li, Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Sci. China (Series E)* 45 (4) (2002) 409-416.
- [4.46] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, K.A. Antonopoulos, Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems, *Energy Convers. Manag.* 120 (2016) 306-319.
- [4.47] V. Belessiotis, E. Mathioulakis, E. Papanicolaou, Theoretical formulation and experimental validation of the input-output modeling approach for large solar thermal systems, *Sol. Energy* 84 (2010) 245-255.
- [4.48] E. Bellos, C. Tzivanidis, C. Symeou, K.A. Antonopoulos, Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller e a dynamic approach, *Energy Convers. Manag.* 137 (2017) 34-48.
- [4.49] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos, E.S. Domazakis, Solar radiation correlations for the Athens, Greece, area, *Sol. Energy* 35 (1985) 259-269.
- [4.50] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos, S. Doulgerakis, Direct and diffuse solar radiation correlations for tilted surfaces in Athens, Greece, *Sol. Energy* 38 (3) (1987) 203-217.
- [4.51] F-Chart Software, Engineering Equation Solver (EES), 2015. Available at: <http://www.fchart.com/ees>.
- [4.52] Electrical Research Association, 1967 Steam Tables, Thermodynamic Properties of Water and Steam; Viscosity of Water and Steam, Thermal Conductivity of Water and Steam, Edward Arnold Publishers, London, 1967.

5

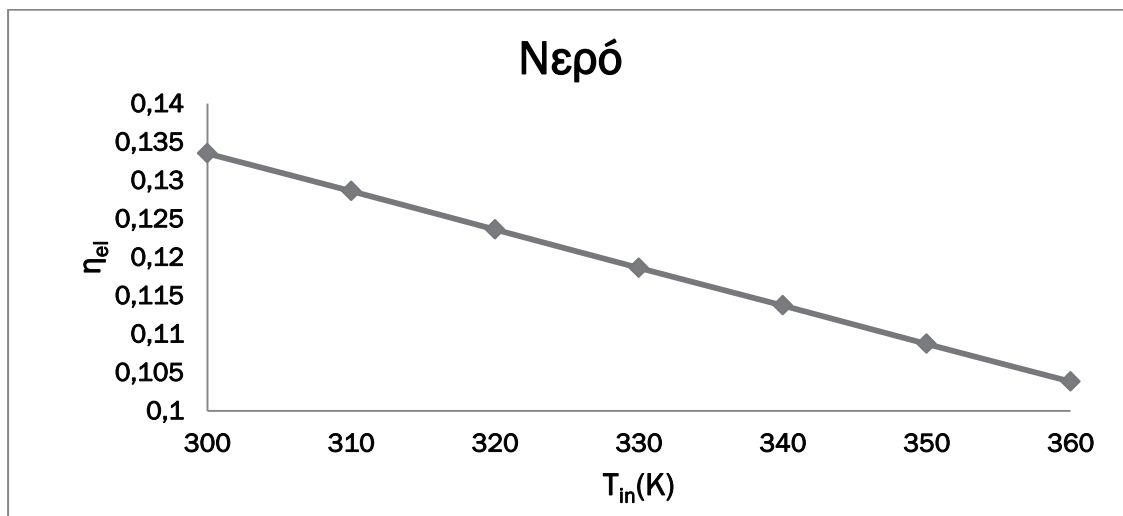
Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

5.1 Αποτελέσματα για φωτοβολταϊκό με νερό ως εργαζόμενο μέσο

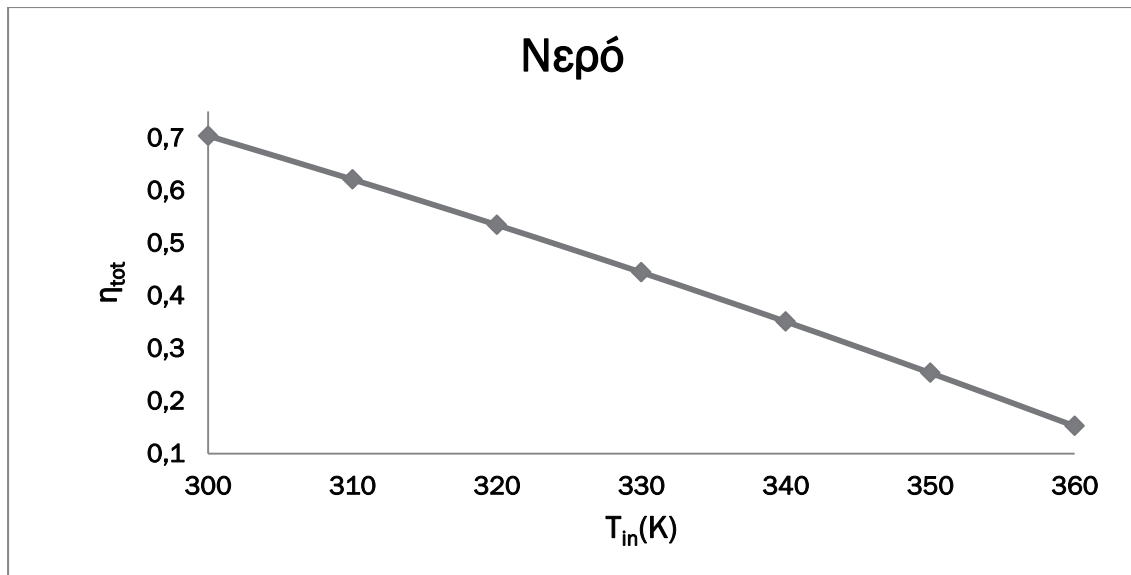
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η μεταβολή του θερμικού, του ηλεκτρικού, του συνολικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού (νερό).



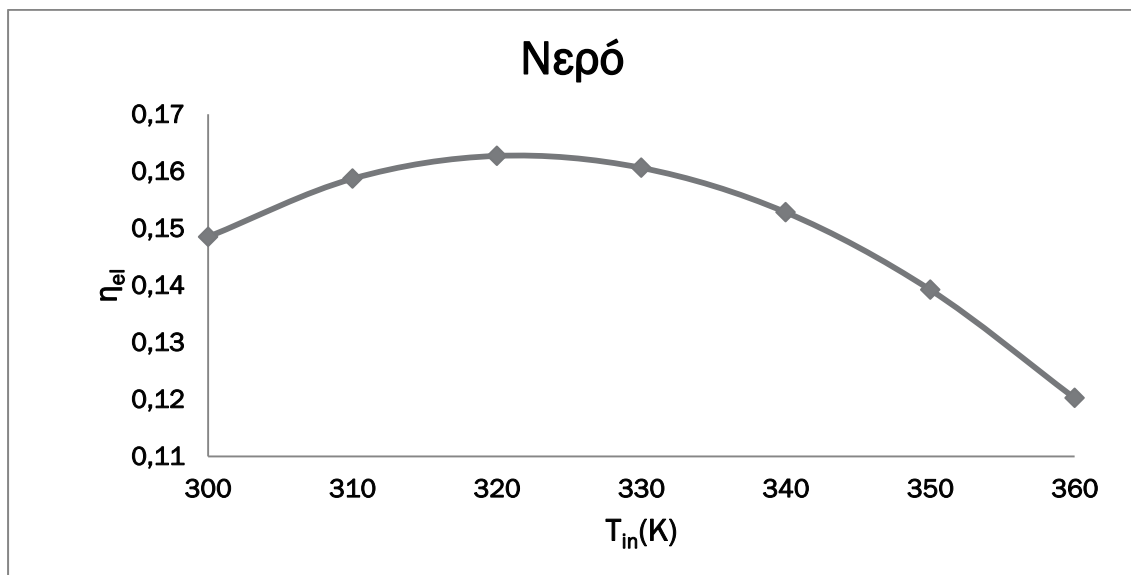
Διάγραμμα 5.1: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νερού



Διάγραμμα 5.2: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νερού.

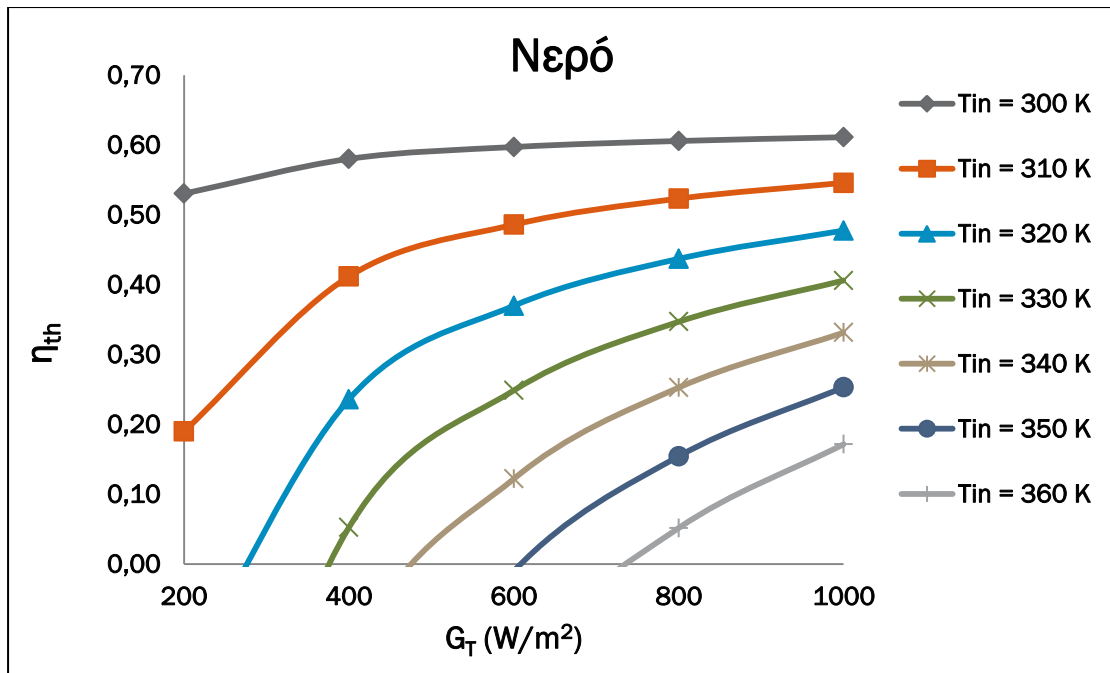


Διάγραμμα 5.3: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νερού.

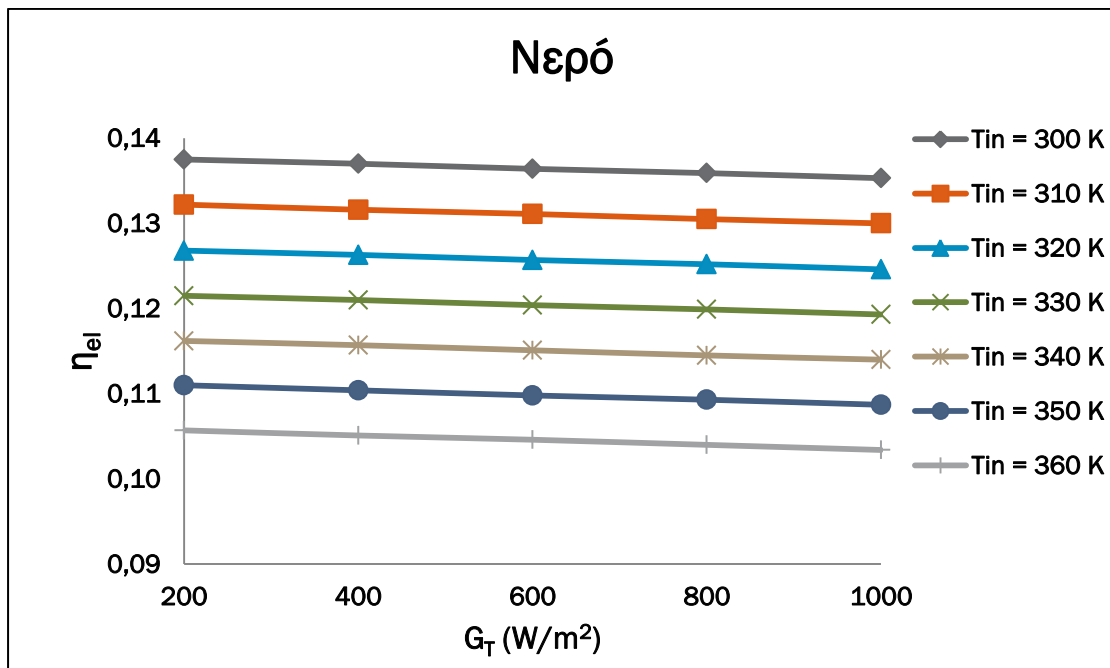


Διάγραμμα 5.4: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νερού.

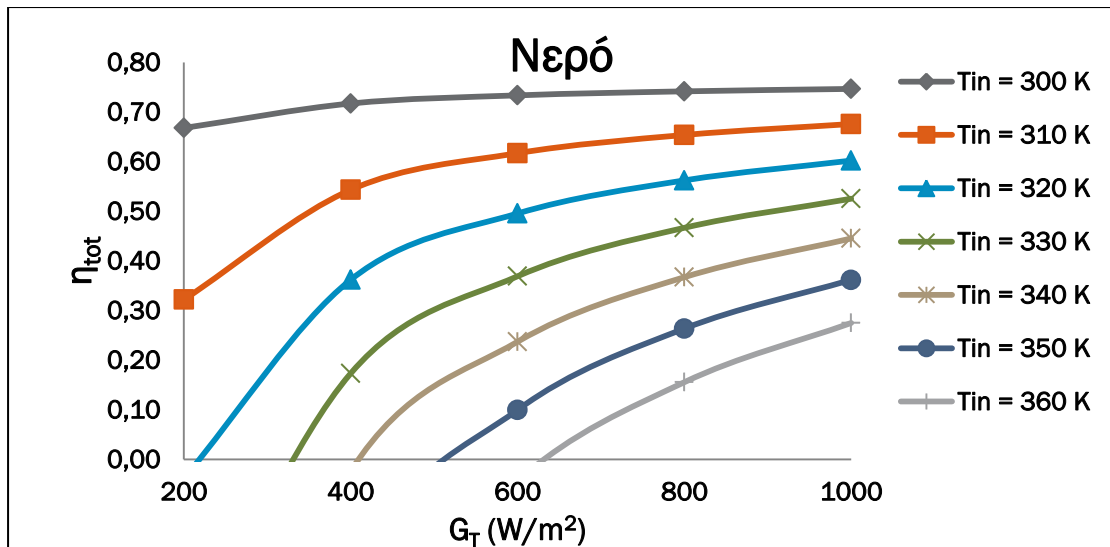
Από τα παραπάνω διαγράμματα 5.1, 5.2 και 5.3 φαίνεται ότι ο θερμικός, ο ηλεκτρικός καθώς και ο συνολικός βαθμός απόδοσης μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού, με τον θερμικό να παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 57.03%, τον ηλεκτρικό να παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 13.35% και τον συνολικό ίση με 70.38% ενώ από το διάγραμμα 5.4 παρατηρούμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης λαμβάνει την μέγιστη τιμή του (16.27%) όταν η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού είναι περίπου ίση με 320 K.



Διάγραμμα 5.5: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

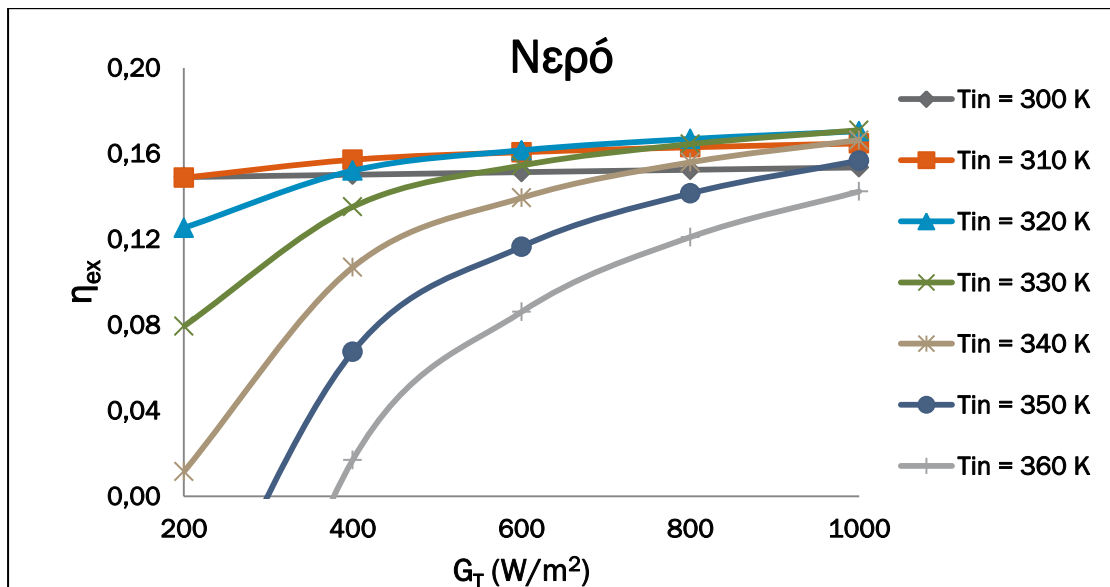


Διάγραμμα 5.6: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



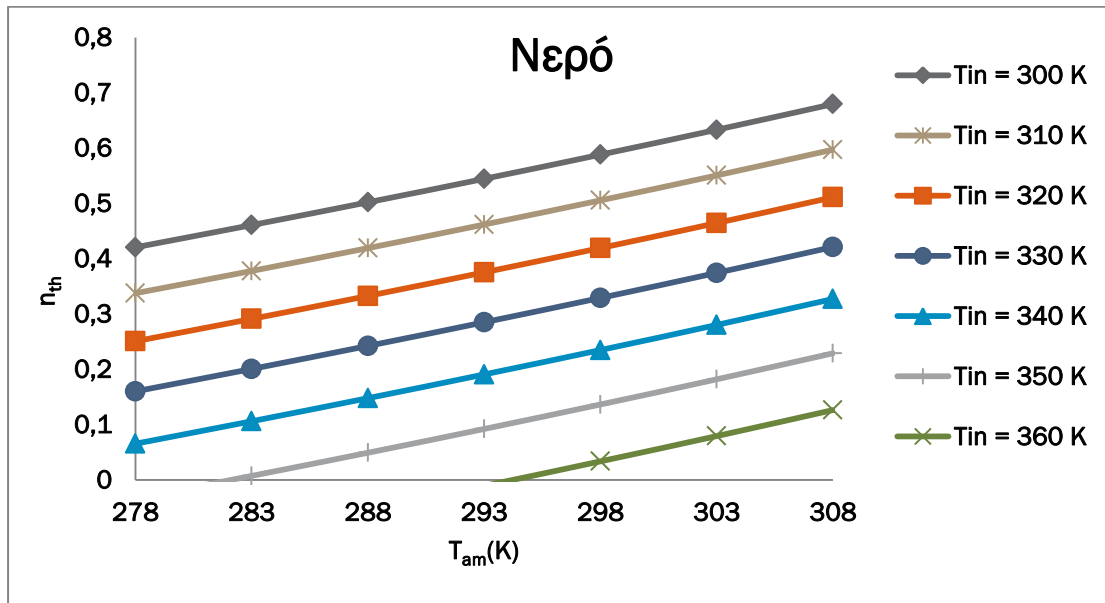
Διάγραμμα 5.7: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

Από το διάγραμμα 5.5 φαίνεται ότι η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας έχει θετική επίδραση στον θερμικό βαθμό απόδοσης. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.6) παρουσιάζει μείωση με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας η οποία είναι ίδια ανεξαρτήτως θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.7) ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτήν του θερμικού.

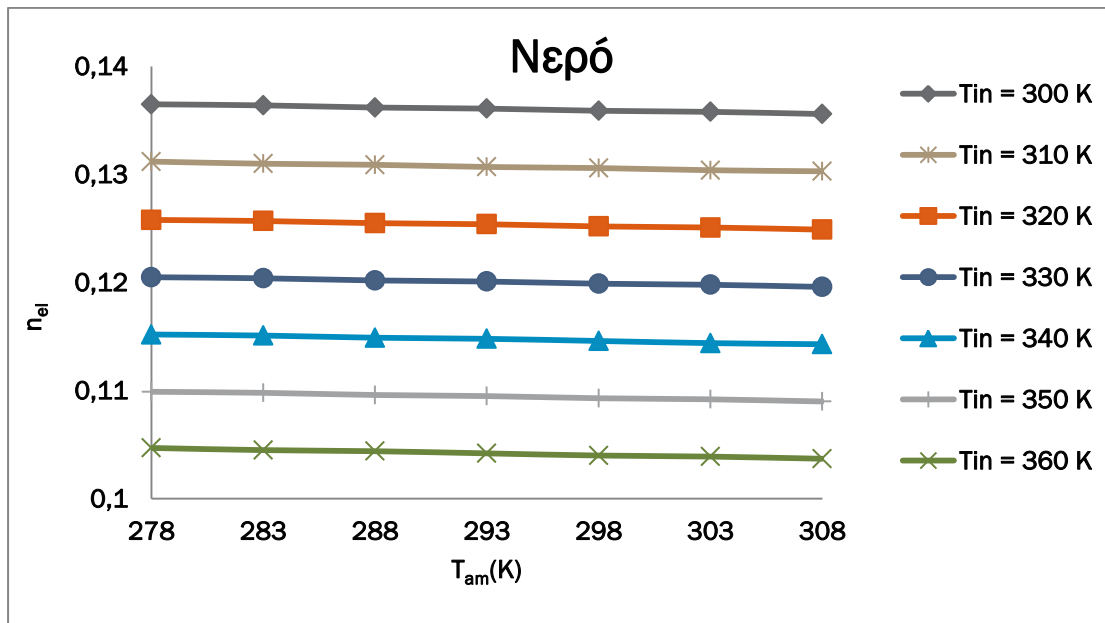


Διάγραμμα 5.8: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

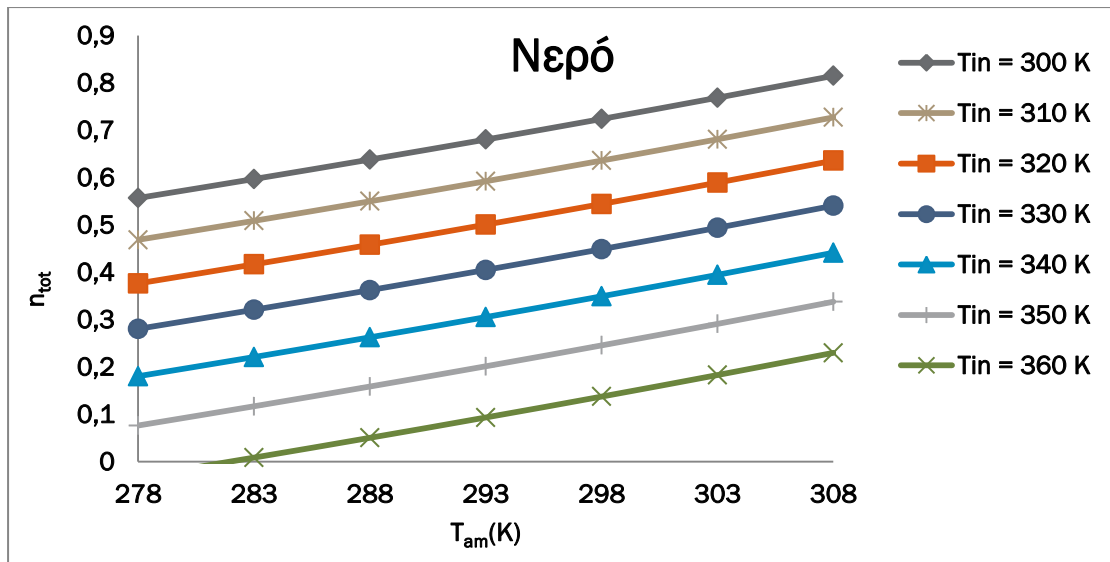
Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.8) για τιμές της έντασης της ακτινοβολίας έως 600 W/m^2 διαφοροποιείται ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού (μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού οδηγεί σε μικρότερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης) από εκεί και έπειτα όμως οι διαφορά αυτή παύει να είναι ιδιαίτερα αισθητή και για μεγάλες τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συγκλίνει σε μια τιμή μεταξύ 13-16%.



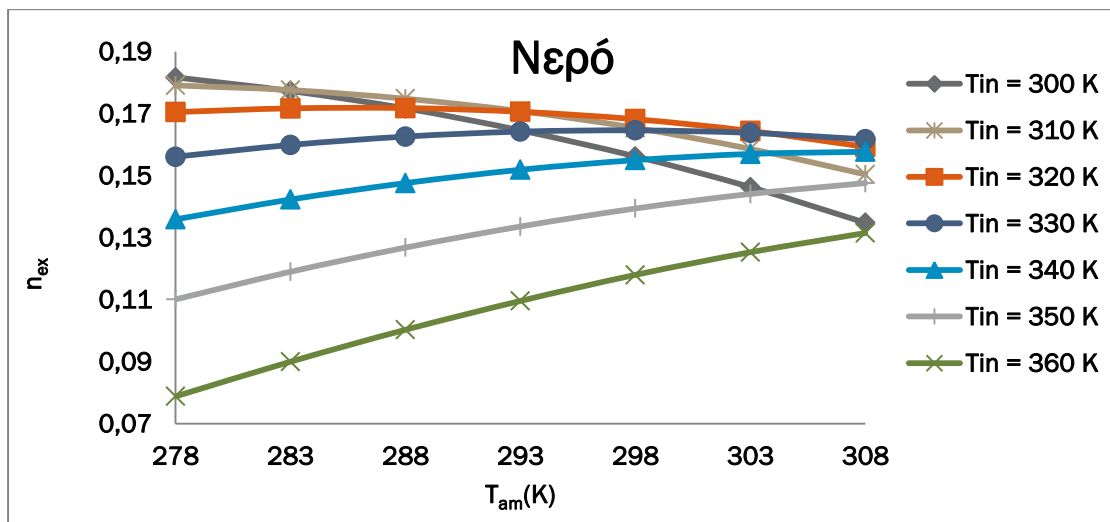
Διάγραμμα 5.9: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



Διάγραμμα 5.10: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

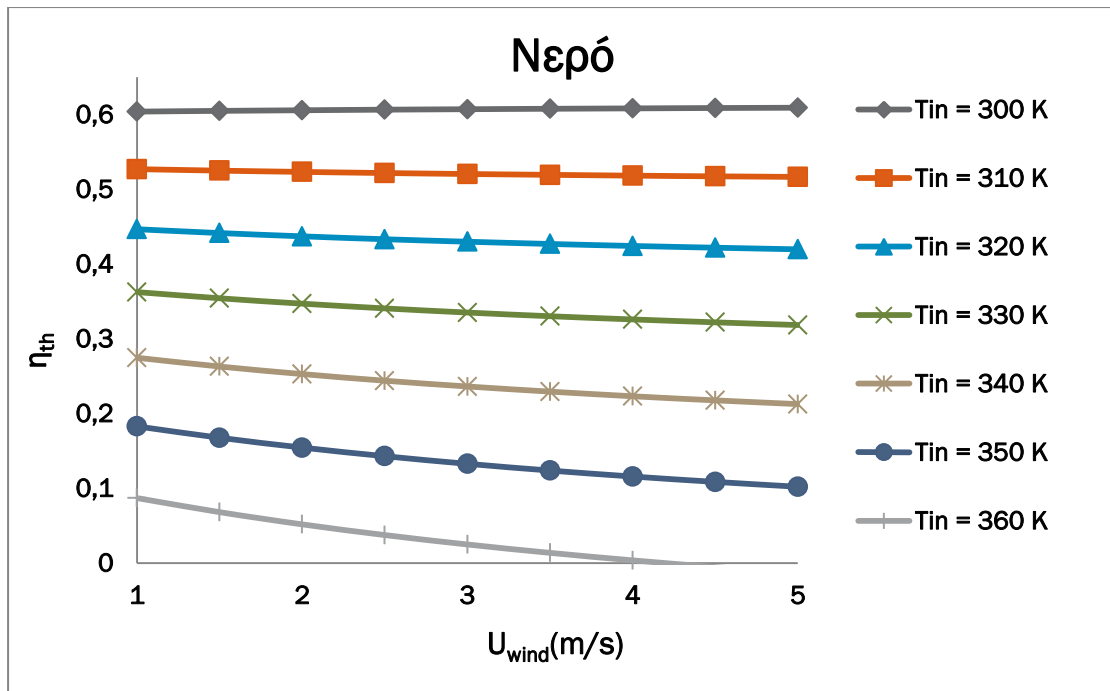


Διάγραμμα 5.11: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

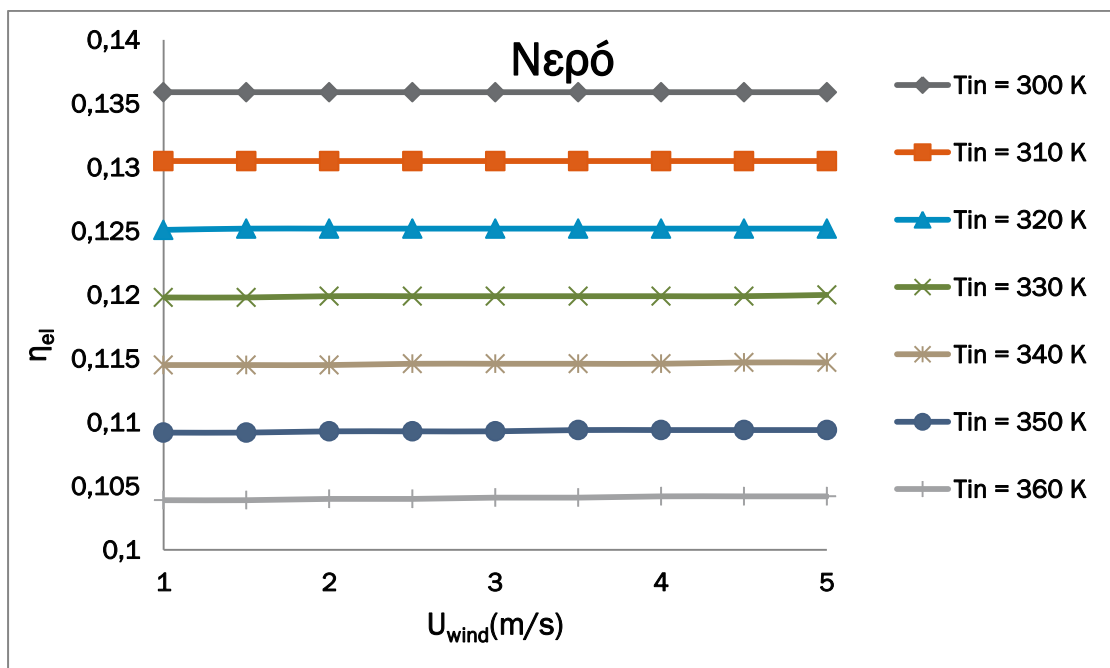


Διάγραμμα 5.12: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

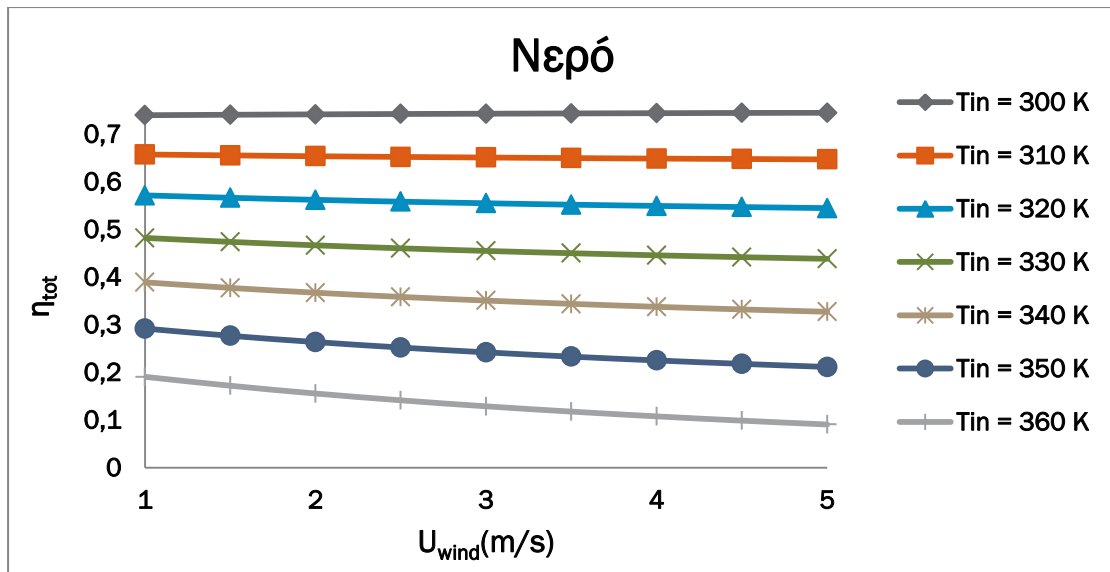
Παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.9) αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ενώ αντίθετα ο ηλεκτρικός (διάγραμμα 5.10) μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.11) επηρεάζεται κυρίως από τον θερμικό και ακολουθεί παρόμοια πορεία όμως με μικρότερη κλίση λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού. Για μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος οδηγεί σε αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Αντίθετα αποτελέσματα παρατηρούνται για μικρές θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού. (διάγραμμα 5.12)



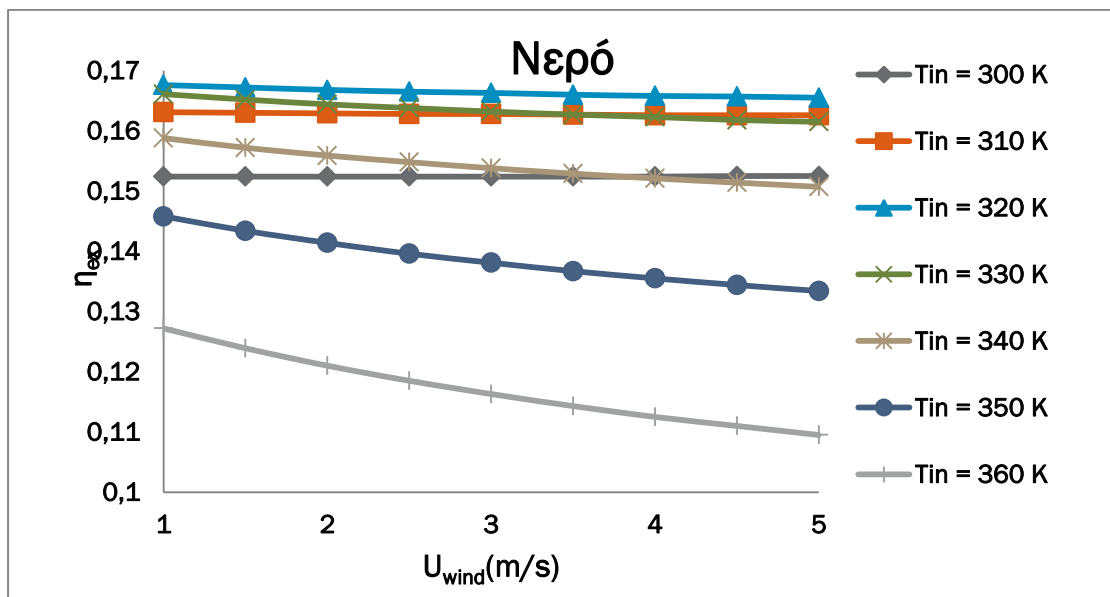
Διάγραμμα 5.13: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



Διάγραμμα 5.14: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

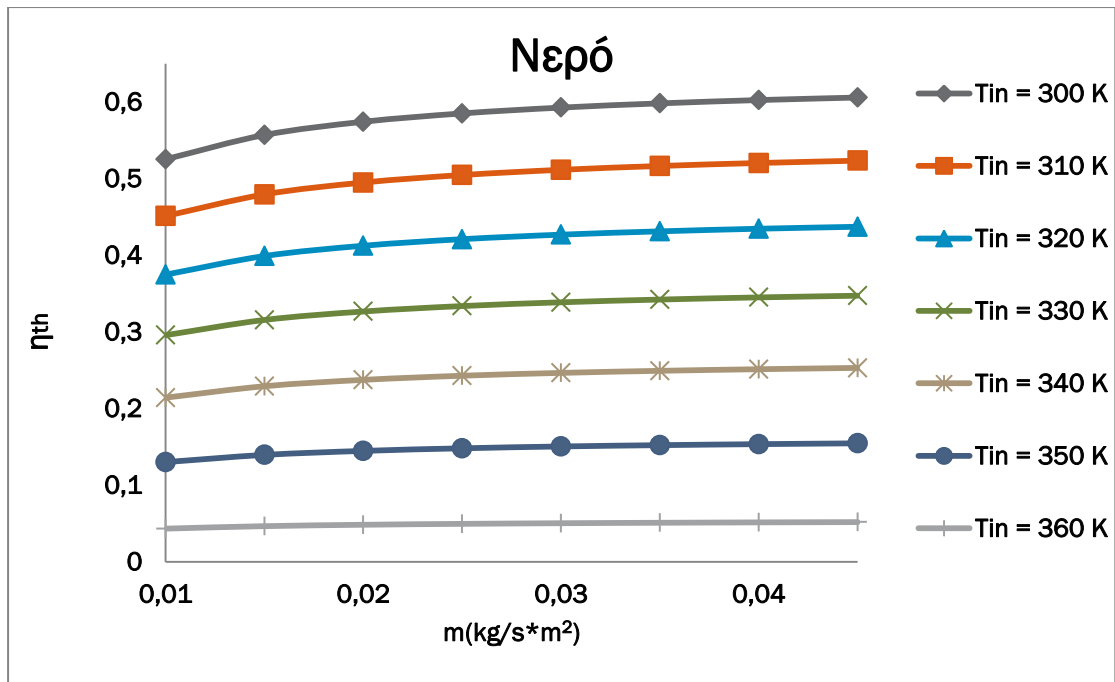


Διάγραμμα 5.15: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

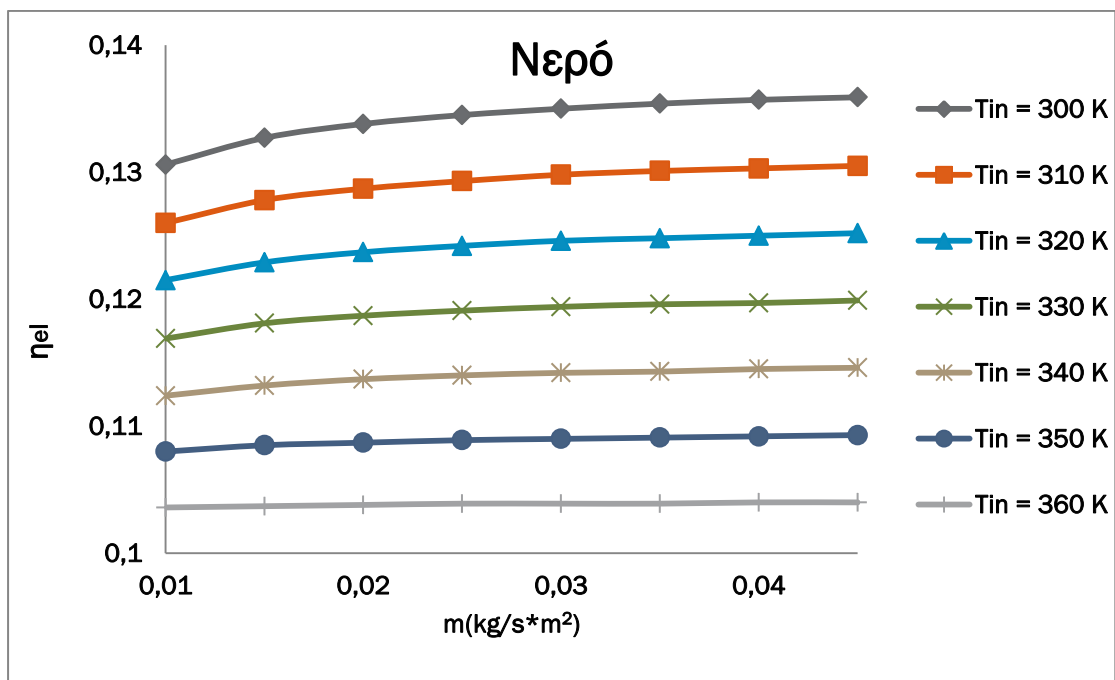


Διάγραμμα 5.16: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

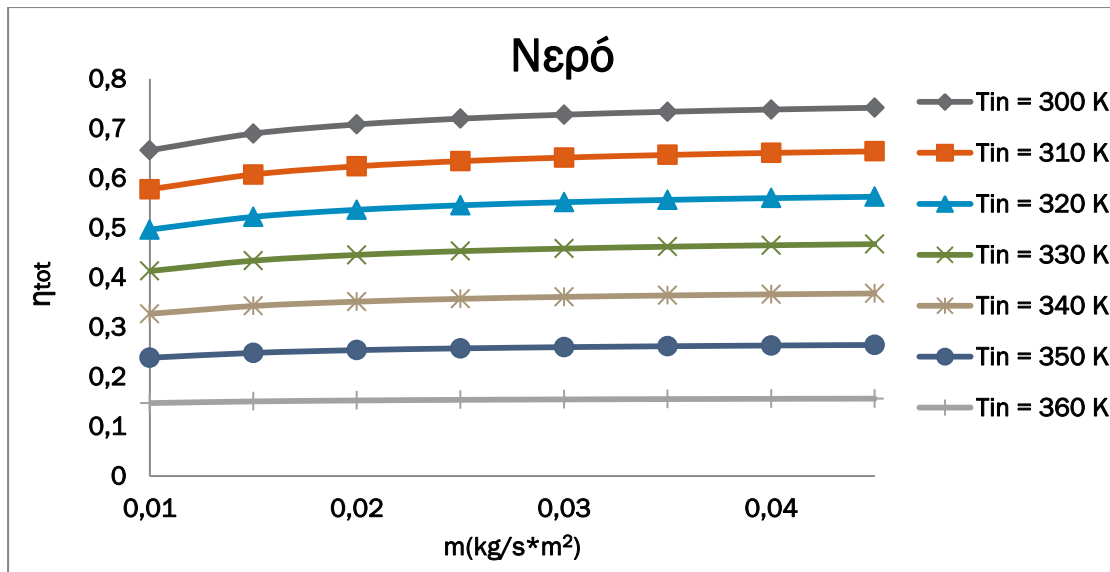
Από τα διαγράμματα 5.13 και 5.15 φαίνεται πως ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου δεν επηρεάζει πολύ την θερμική και συνολική απόδοση, για μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση θερμικού και συνολικού βαθμού απόδοσης. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.14) φαίνεται ανεπηρέαστος από την ταχύτητα του ανέμου. Μέχρι την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού 330 K ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζεται από την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Από την θερμοκρασία αυτή κι έπειτα αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης (διάγραμμα 5.16).



Διάγραμμα 5.17: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την παροχή του ρευστού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

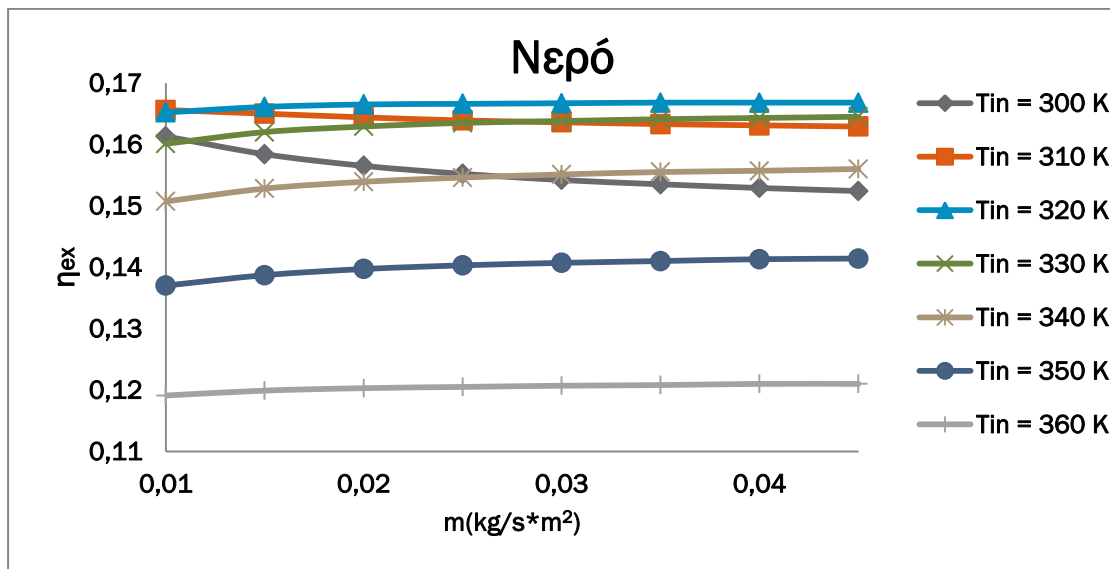


Διάγραμμα 5.18: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την παροχή του ρευστού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.



Διάγραμμα 5.19: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την παροχή του ρευστού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

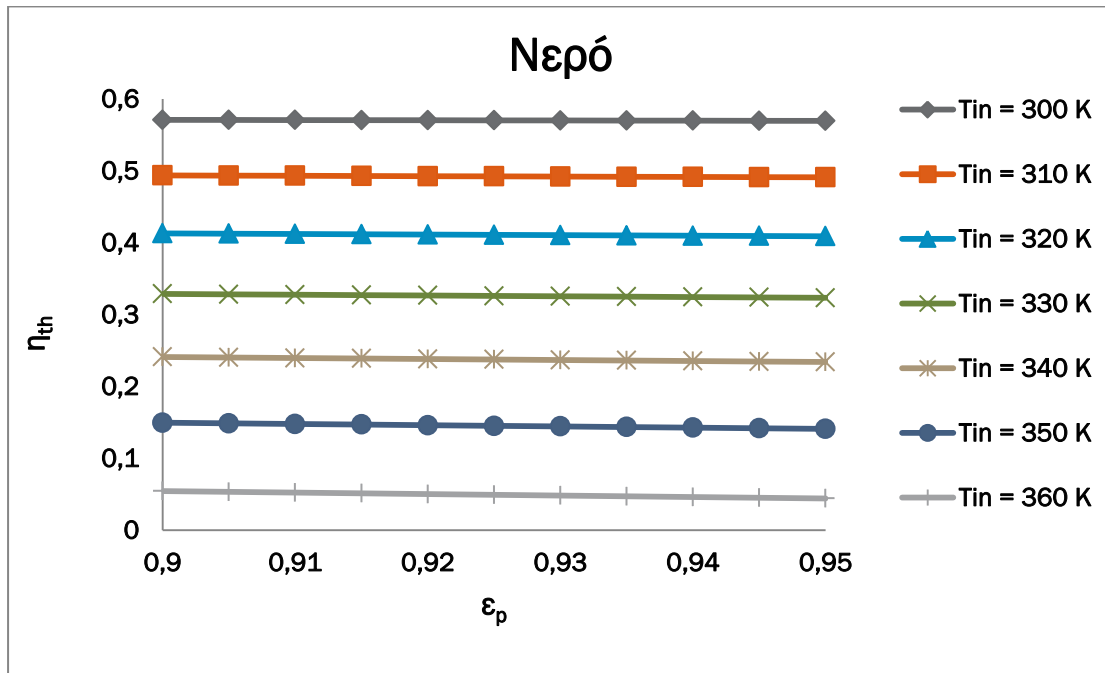
Από τα 5.17 έως 5.19 παρατηρούμε ότι αύξηση της παροχής του ρευστού οδηγεί σε αύξηση του θερμικού, του ηλεκτρικού και συνεπώς του συνολικού βαθμού απόδοσης η οποία είναι περισσότερο αισθητή σε παροχές έως 0.03 kg/s·m² και για μικρές θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού.



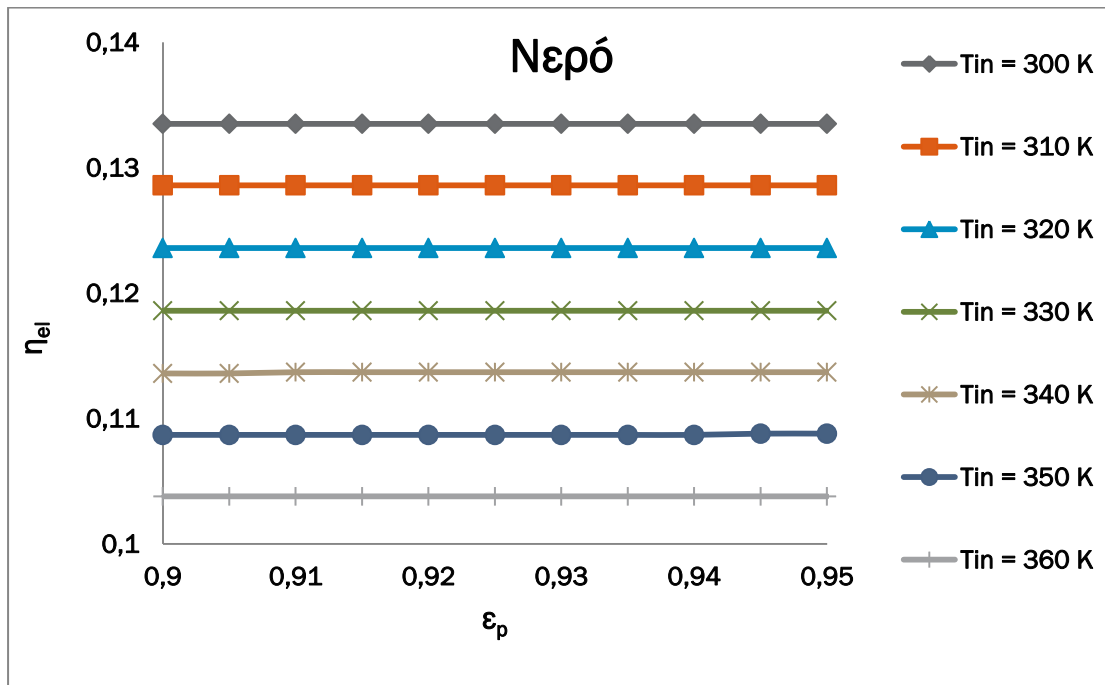
Διάγραμμα 5.20: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την παροχή του ρευστού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την παροχή του ρευστού. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασία εισόδου του ρευστού μέχρι 315 K αύξηση της παροχής οδηγεί σε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, μετά τα 315 K και έως 330 K η αύξηση της παροχής δεν μεταβάλλει τον

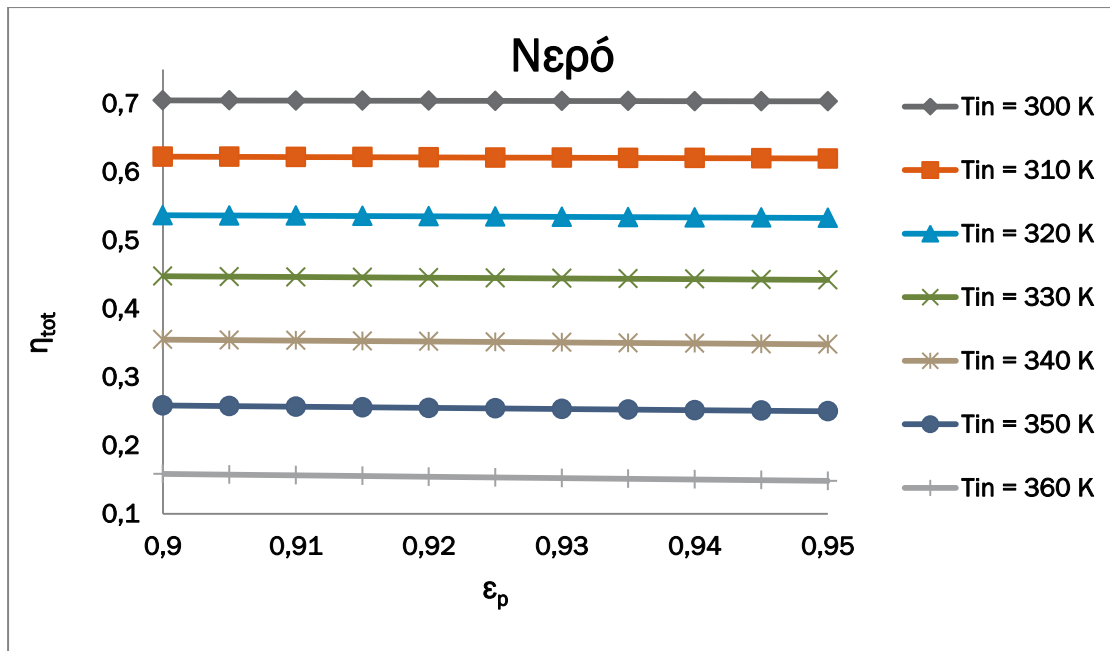
εξεργειακό βαθμό απόδοσης ενώ από 330 K και περισσότερο αύξηση της παροχής συνεπάγεται και αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης.



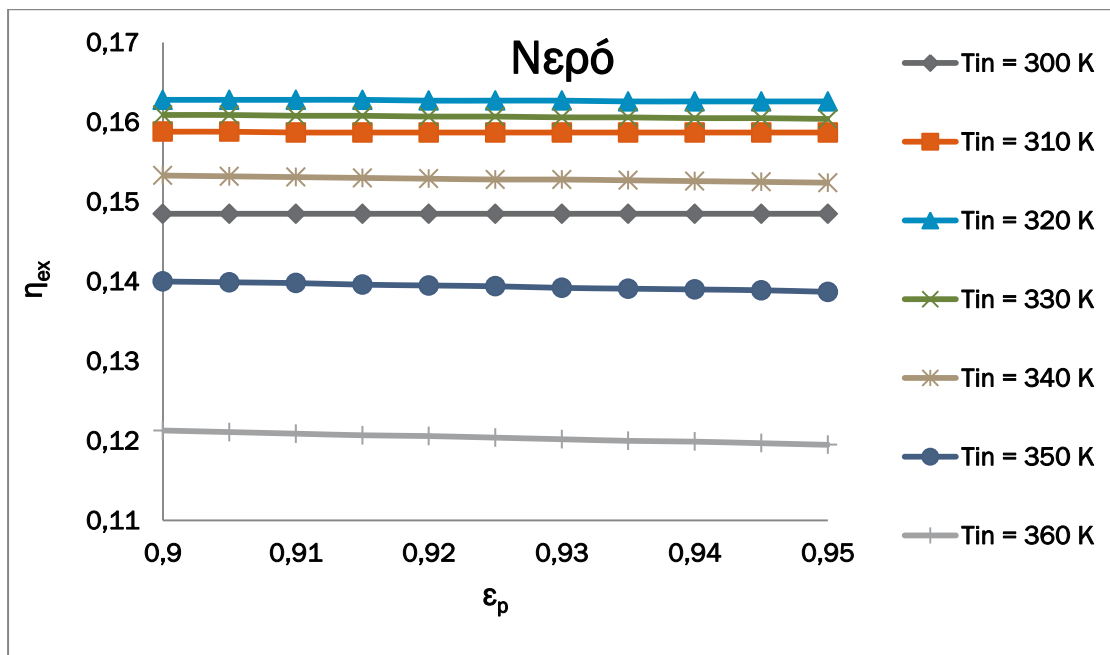
Διάγραμμα 5.21: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.



Διάγραμμα 5.22: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.



Διάγραμμα 5.23: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

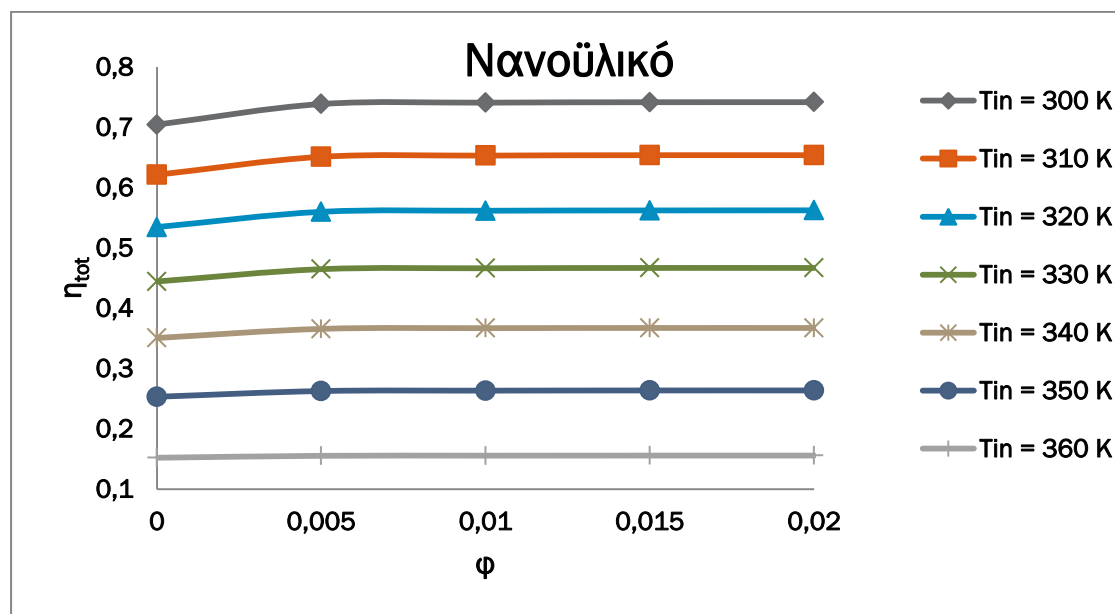


Διάγραμμα 5.24: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

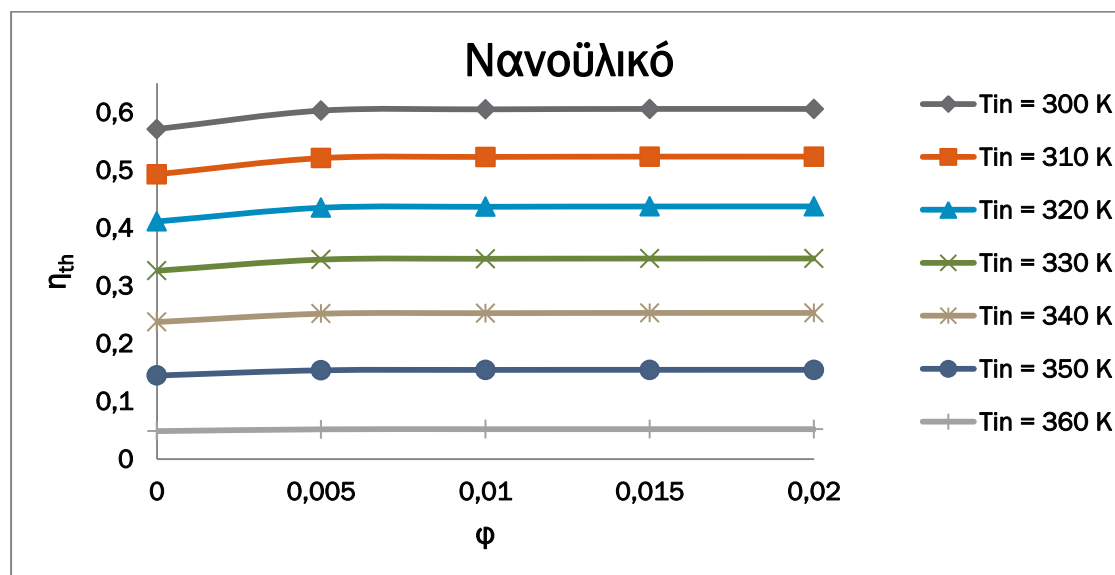
Από τα διαγράμματα 5.21 έως 5.24 παρατηρούμε ότι η αύξηση του συντελεστή εκπομπής της πλάκας δεν προκαλεί καμία μεταβολή στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ενώ οδηγεί σε μείωση του θερμικού, του συνολικού και του εξεργειακού κυρίως σε μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού ($T_{in} > 340\text{ K}$).

5.2 Αποτελέσματα για φωτοβολταϊκό με χρήση νανοϋλικού (98%νερό+2%Cu)

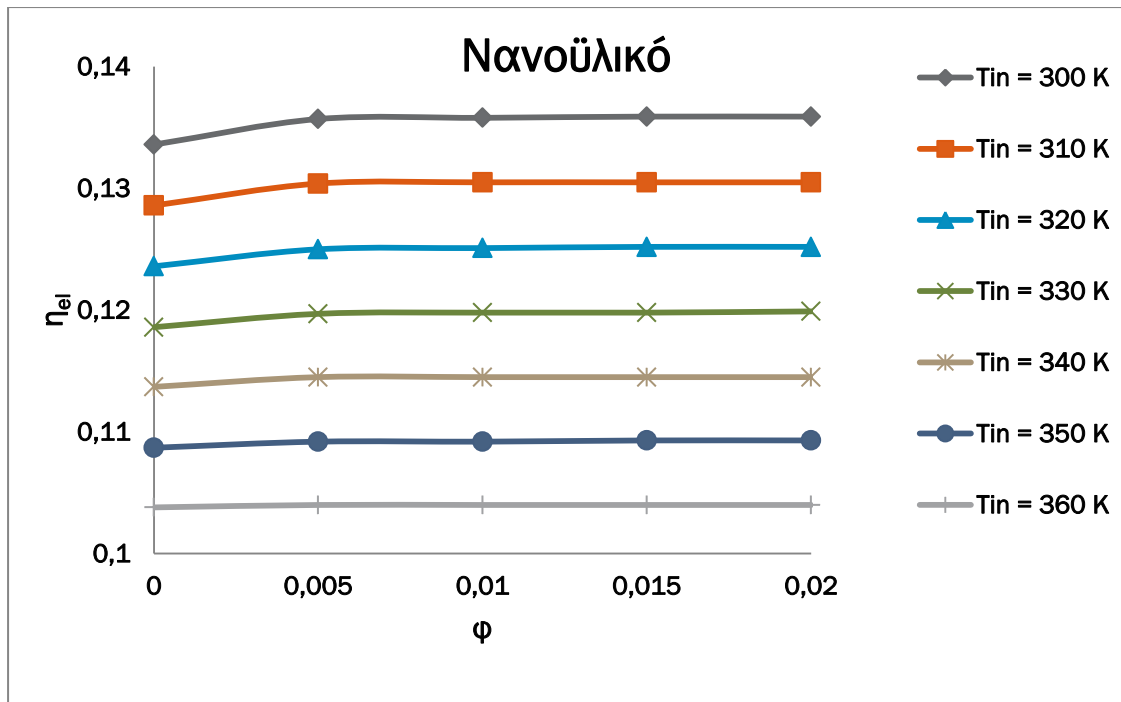
Στα διαγράμματα 5.25-5.28 παρατηρούμε ότι αύξηση της περιεκτικότητας του ρευστού σε νανოსωματίδια προκαλεί αύξηση όλων των βαθμών απόδοσης η οποία είναι πιο αισθητή μέχρι την περιεκτικότητα $\phi=1\%$. Ωστόσο συνεχίζει να είναι συμφέρουσα μέχρι τουλάχιστον για $\phi=2\%$ για αυτό και επιλέχθηκε για την μελέτη.



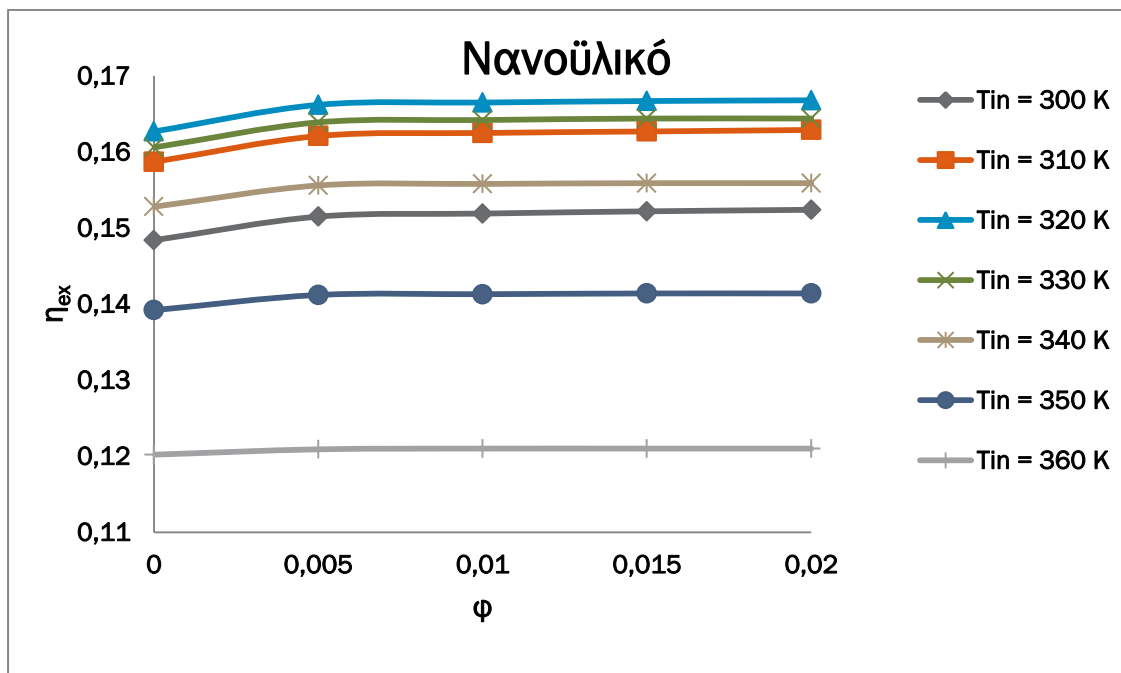
Εικόνα 5.25: Συνολική αποτελεσματικότητα του συλλέκτη για τις συγκεντρώσεις νανοςωματιδίων για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.



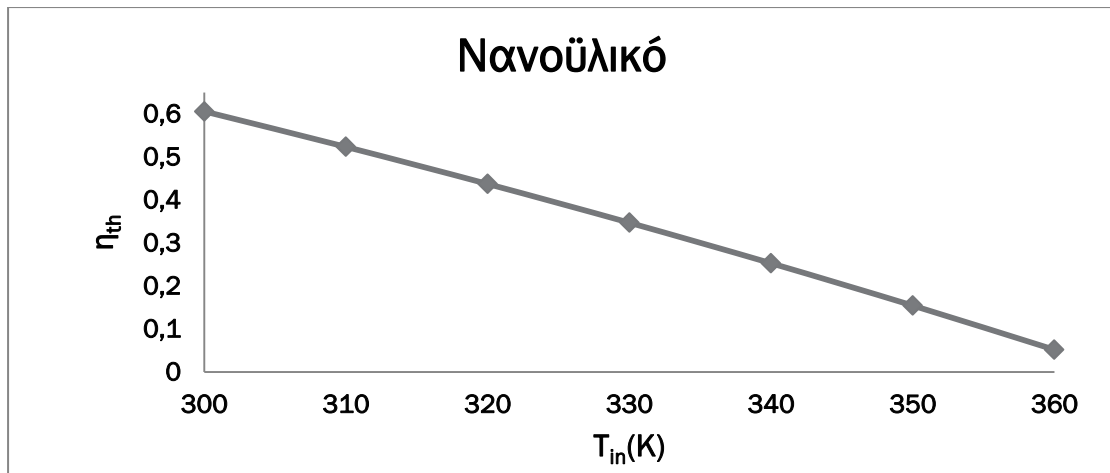
Εικόνα 5.26: Η θερμική αποτελεσματικότητα του συλλέκτη με τις συγκεντρώσεις νανοςωματιδίων για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.



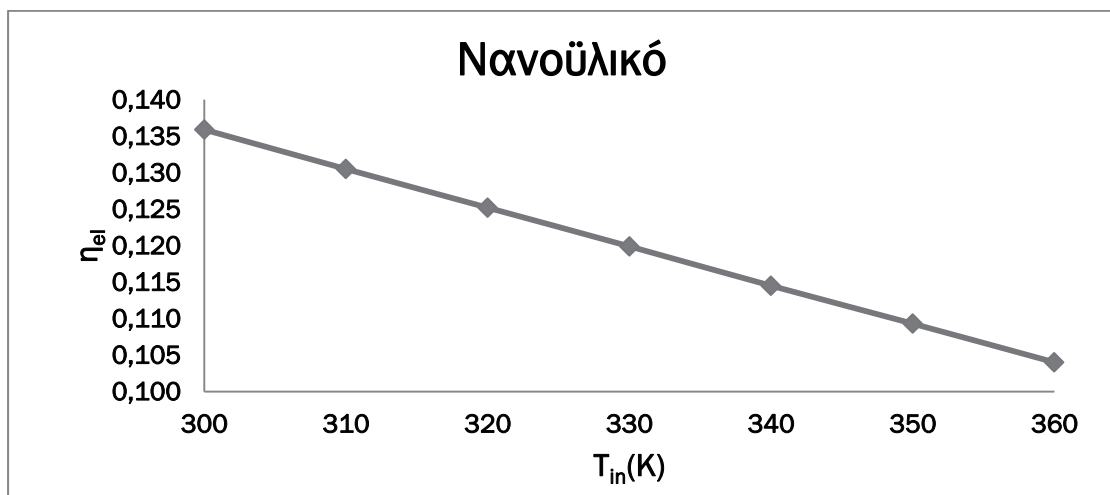
Εικόνα 5.27: Ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη με τις συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου



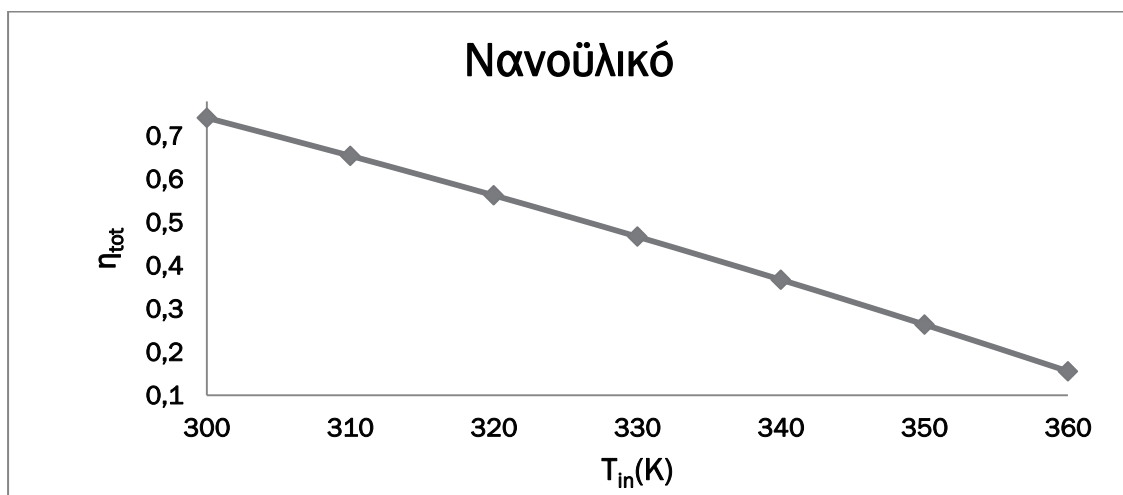
Εικόνα 5.28: Η εξεργειακή αποτελεσματικότητα του συλλέκτη με τις συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.



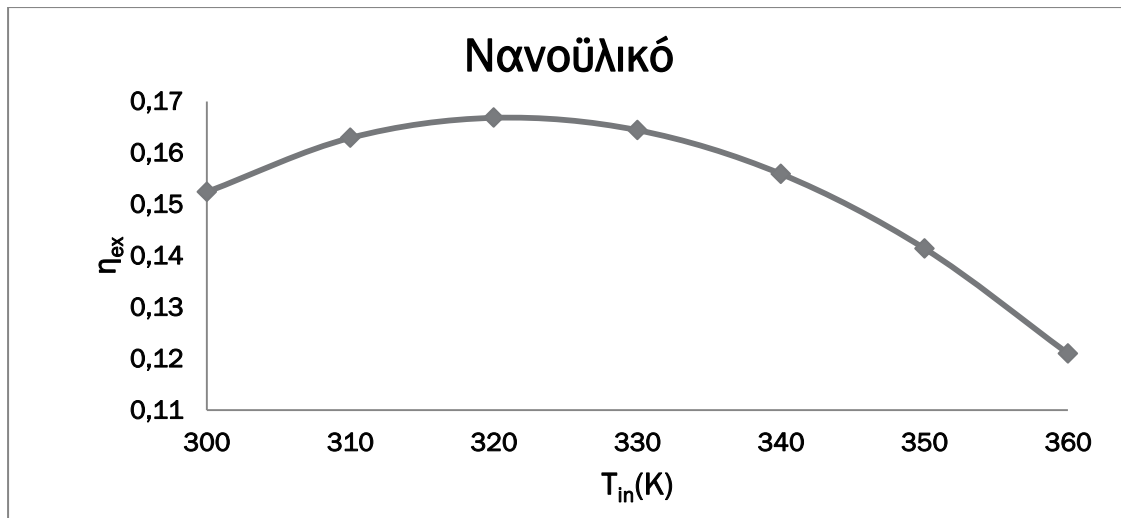
Διάγραμμα 5.29: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νανοϋλικού.



Διάγραμμα 5.30: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νανοϋλικού.

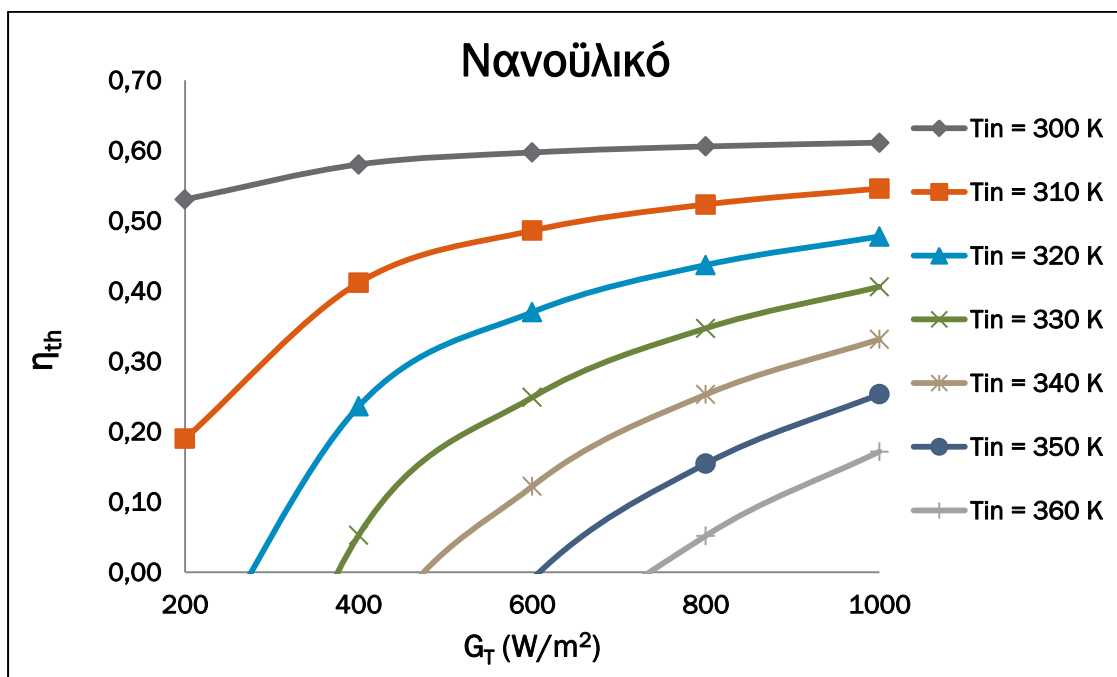


Διάγραμμα 5.31: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νανοϋλικού.

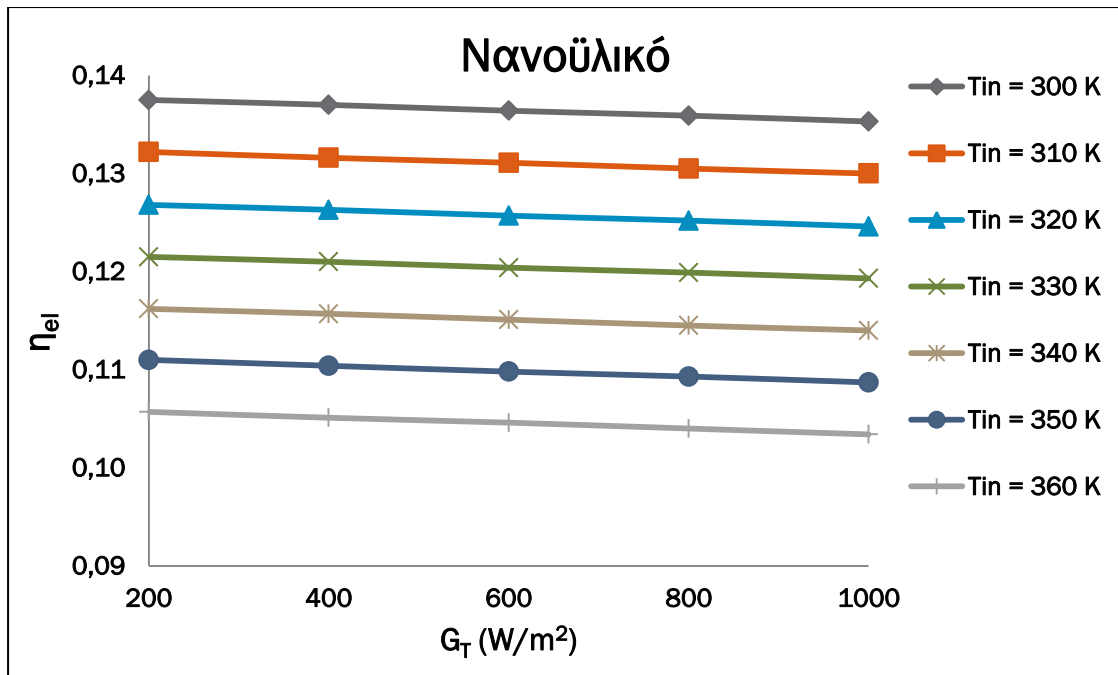


Διάγραμμα 5.32: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του νανοϋλικού.

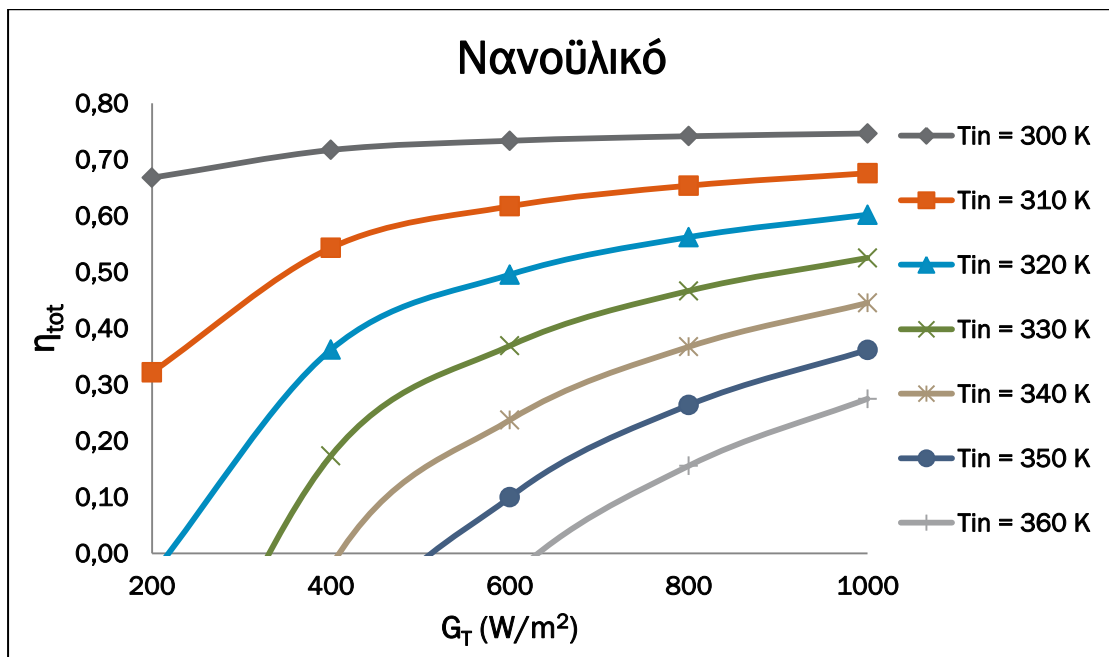
Από τα παραπάνω διαγράμματα 5.29, 5.30 και 5.31 φαίνεται ότι ο θερμικός, ο ηλεκτρικός καθώς και ο συνολικός βαθμός απόδοσης μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού, με τον θερμικό να παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 60.58%, τον ηλεκτρικό να παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 13.59% και τον συνολικό ίση με 74.17% ενώ από το διάγραμμα 5.32 παρατηρούμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης λαμβάνει την μέγιστη τιμή του (16.68%) όταν η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού είναι περίπου ίση με 320 K.



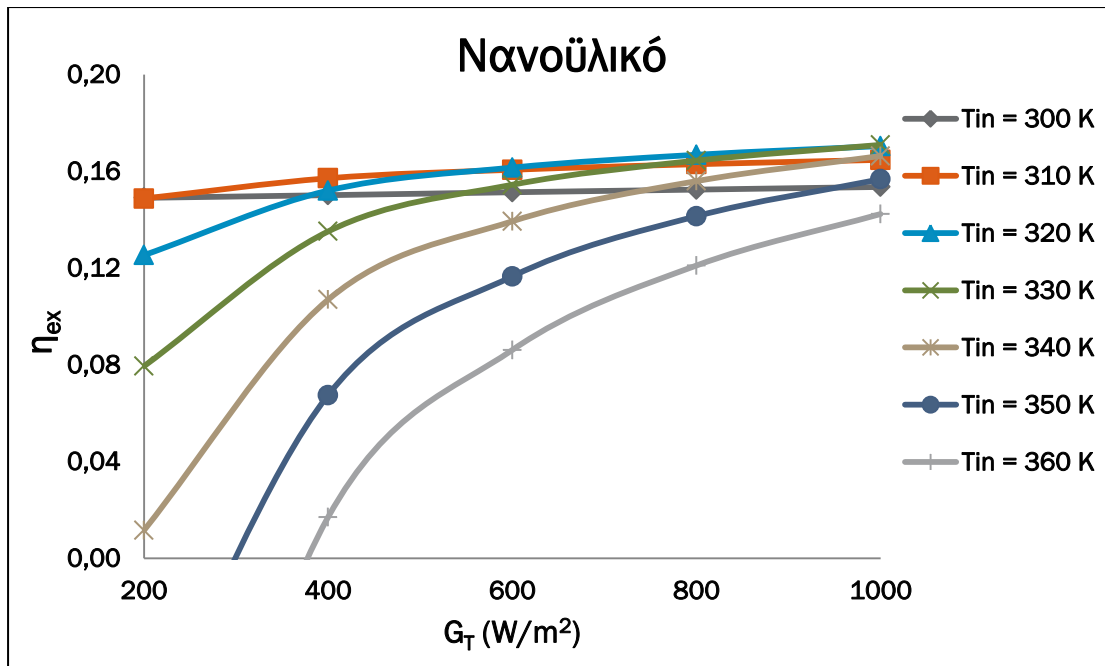
Διάγραμμα 5.33: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



Διάγραμμα 5.34: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



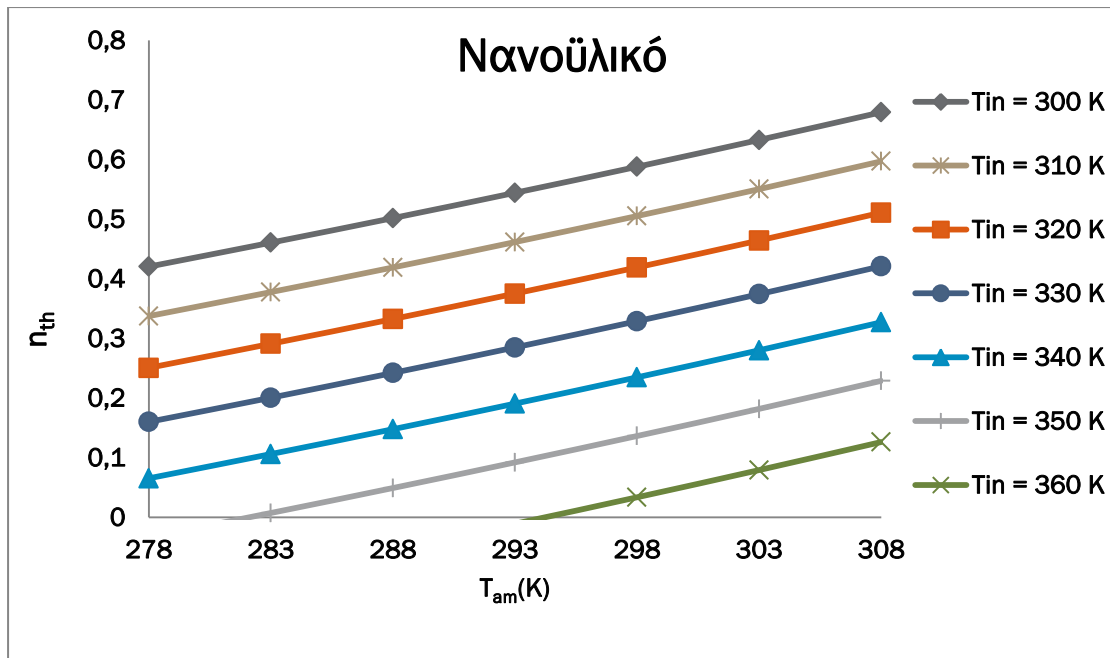
Διάγραμμα 5.35: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



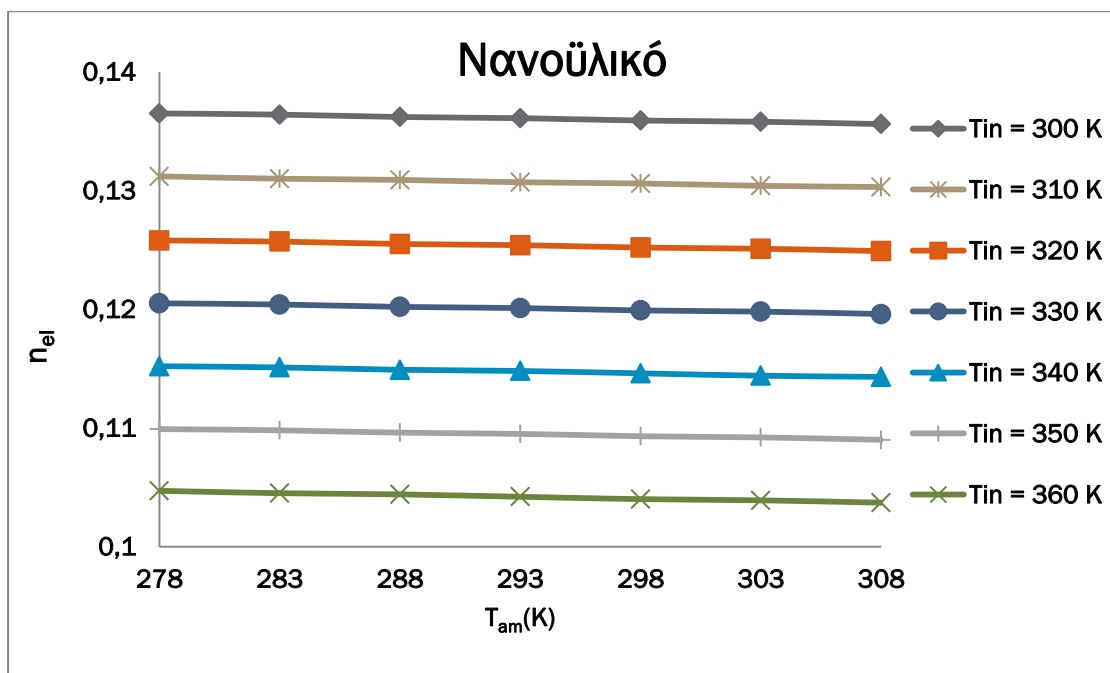
Διάγραμμα 5.36: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

Από το διάγραμμα 5.33 φαίνεται ότι η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας έχει θετική επίδραση στον θερμικό βαθμό απόδοσης. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.34) παρουσιάζει μείωση με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας η οποία είναι ίδια ανεξαρτήτως θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.35) ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτήν του θερμικού.

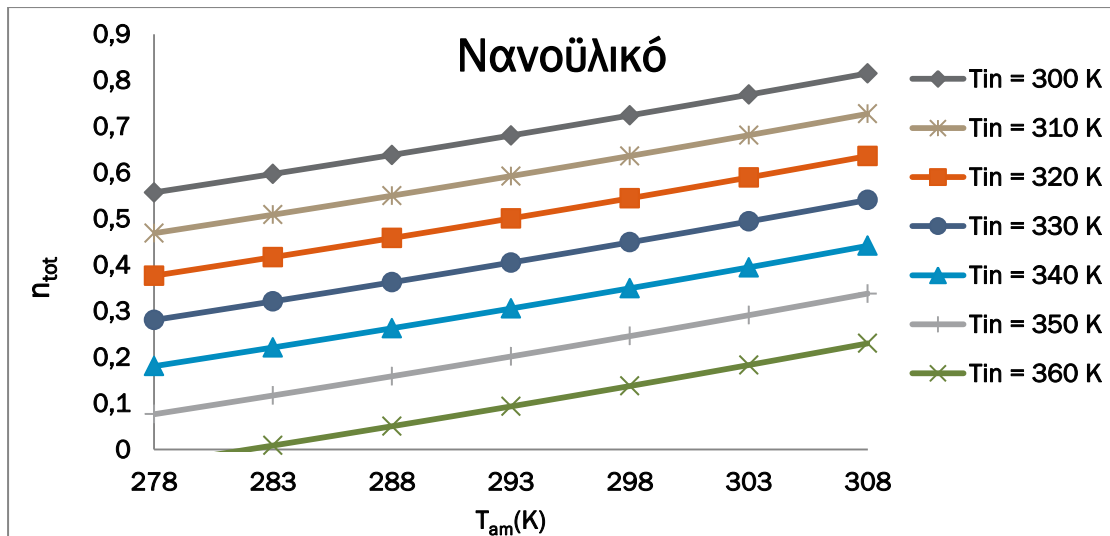
Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.36) για τιμές της έντασης της ακτινοβολίας έως 600 W/m² διαφοροποιείται ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού (μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού οδηγεί σε μικρότερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης) από εκεί και έπειτα όμως οι διαφορές αυτή παύει να είναι ιδιαίτερα αισθητή και για μεγάλες τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συγκλίνει σε μια τιμή μεταξύ 14-17%.



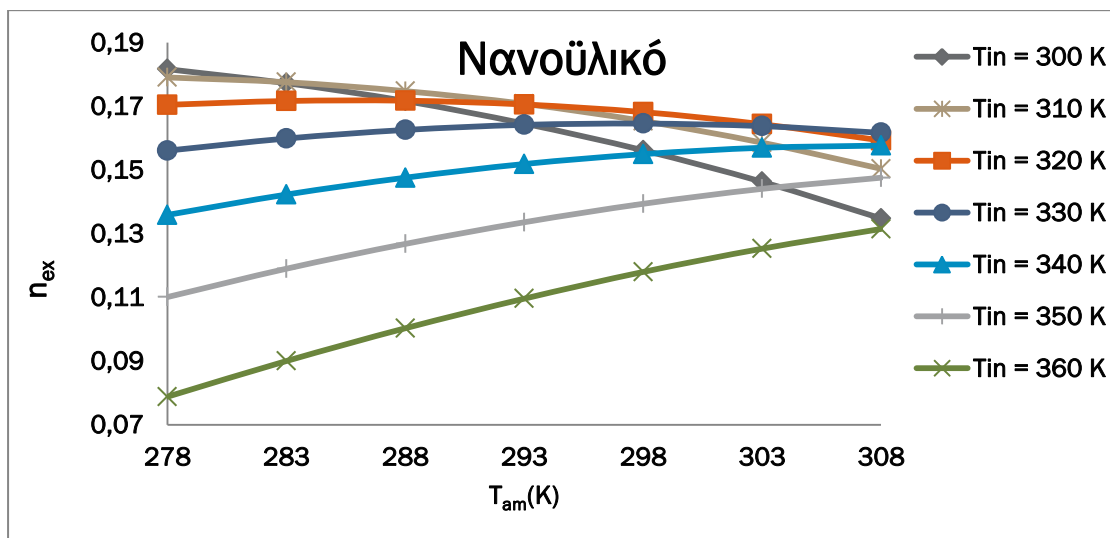
Διάγραμμα 5.37: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



Διάγραμμα 5.38: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

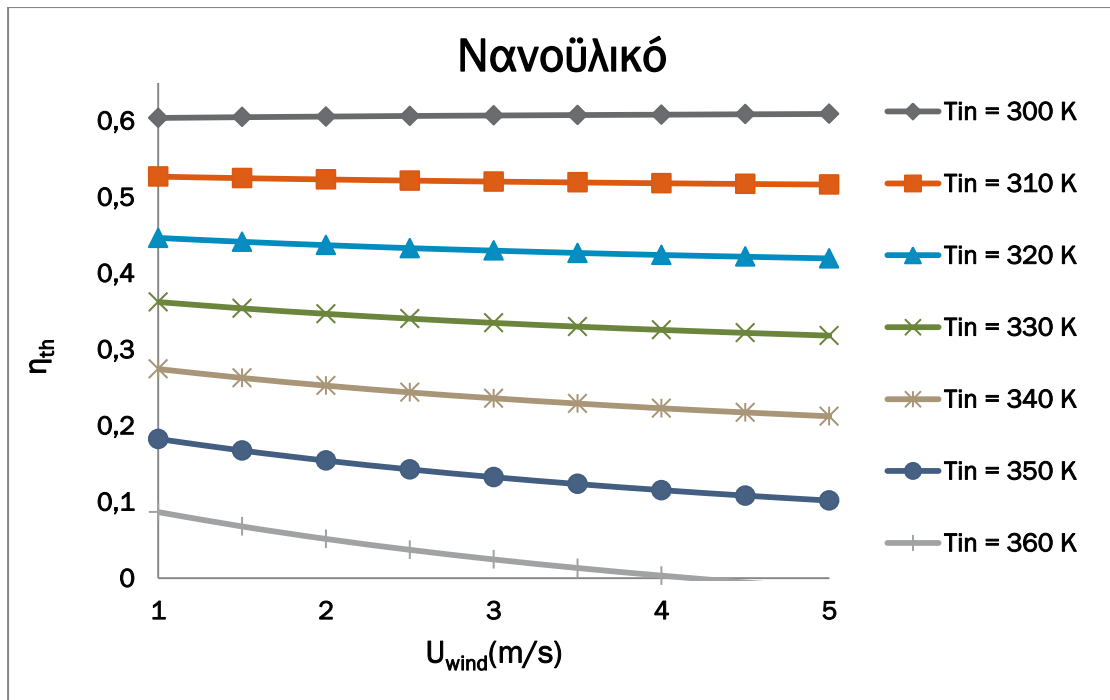


Διάγραμμα 5.39: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

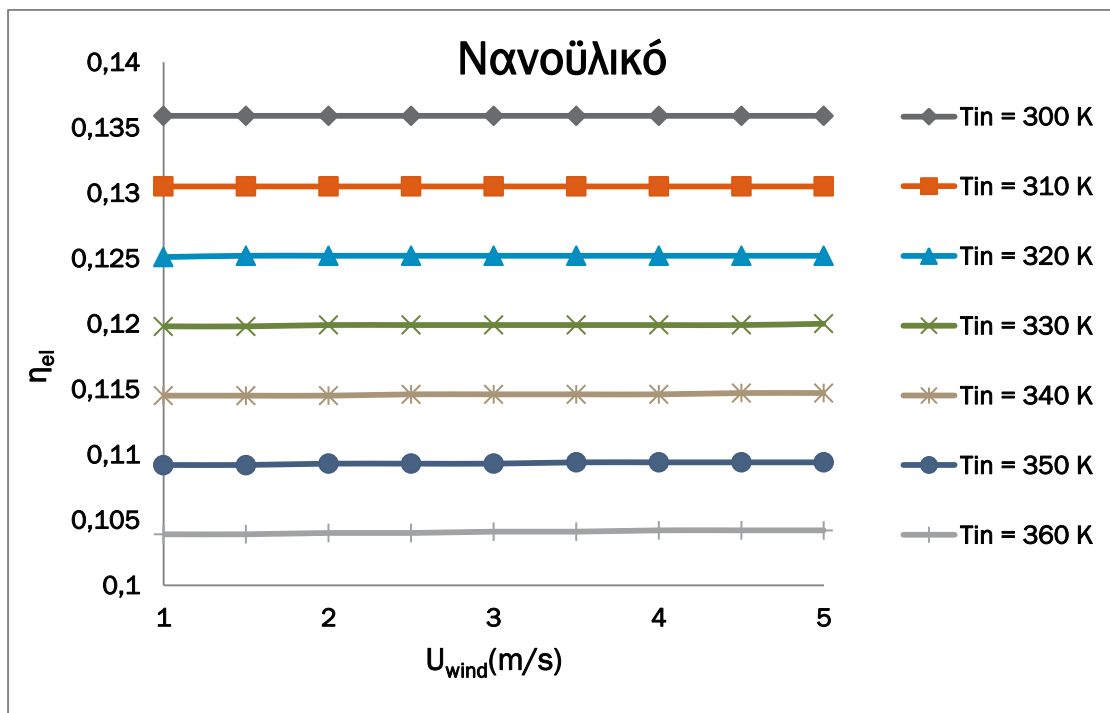


Διάγραμμα 5.40: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

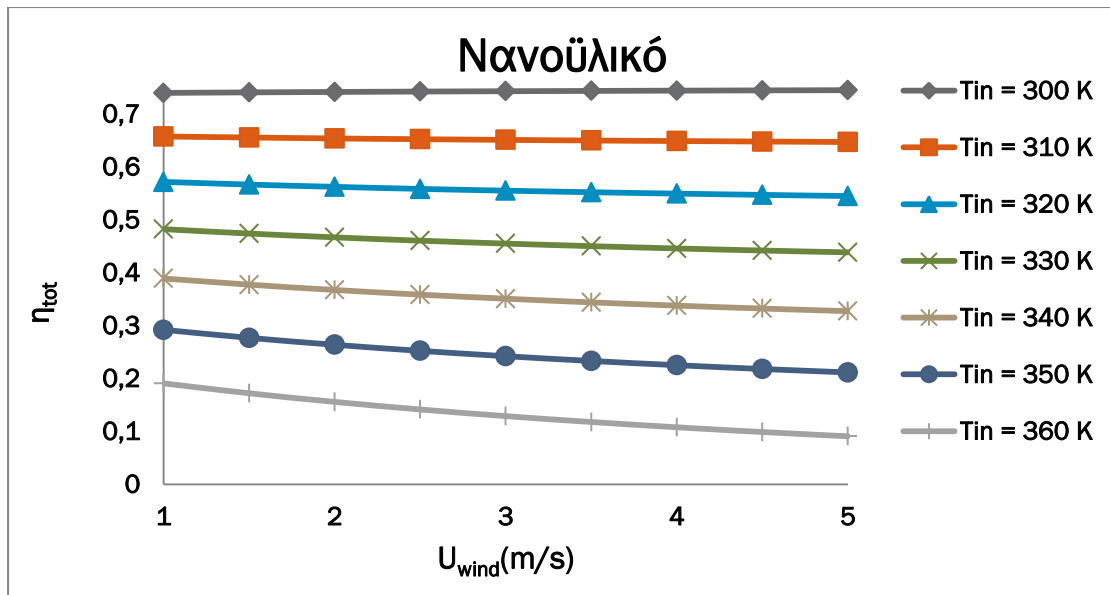
Παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.37) αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ενώ αντίθετα ο ηλεκτρικός (διάγραμμα 5.38) μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.39) επηρεάζεται κυρίως από τον θερμικό και ακολουθεί παρόμοια πορεία όμως με μικρότερη κλίση λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού. Για μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος οδηγεί σε αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Αντίθετα αποτελέσματα παρατηρούνται για μικρές θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού. (διάγραμμα 5.40)



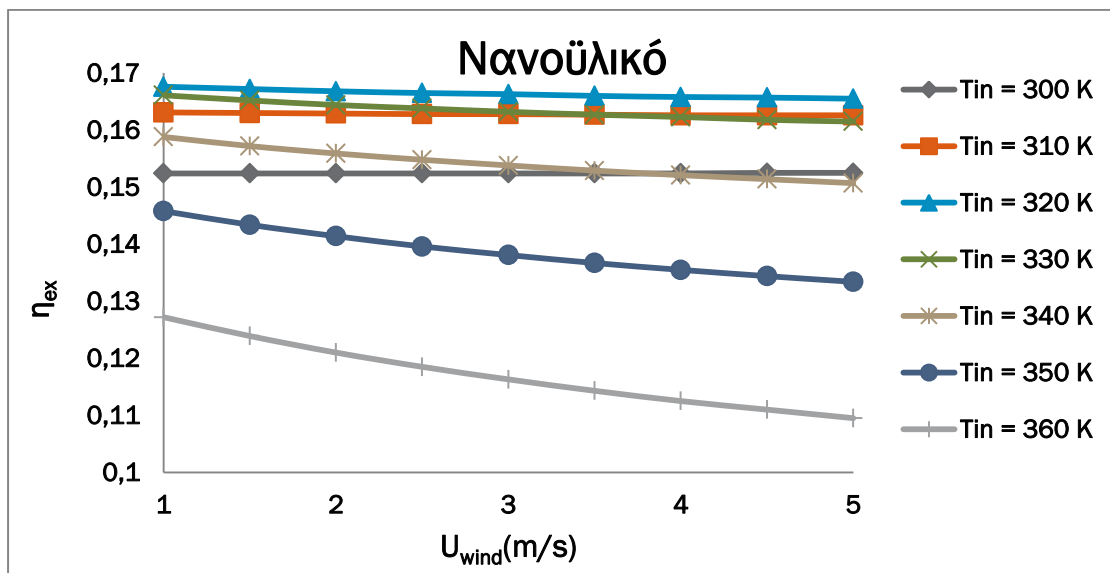
Διάγραμμα 5.41: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



Διάγραμμα 5.42: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

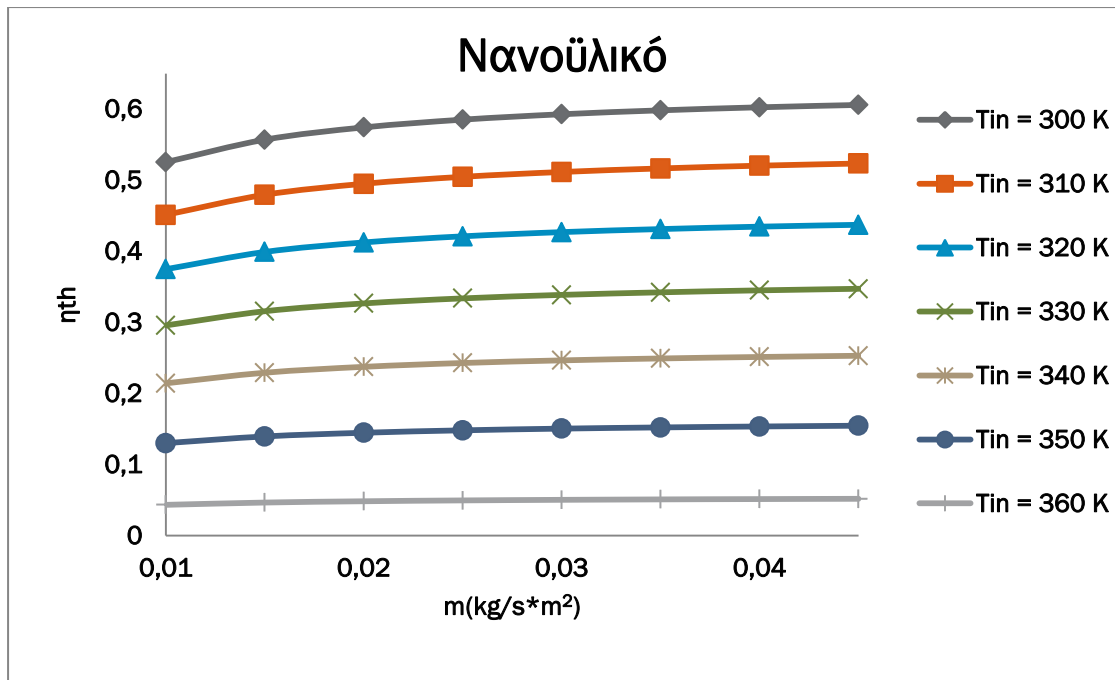


Διάγραμμα 5.43: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

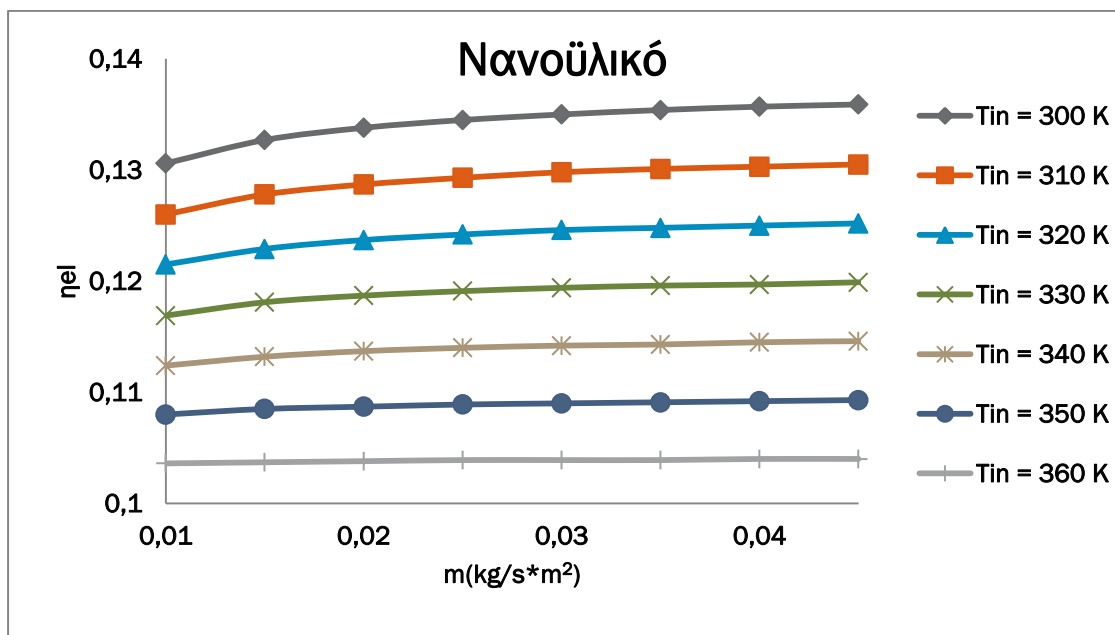


Διάγραμμα 5.44: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

Από τα διαγράμματα 5.41 και 5.43 φαίνεται πως ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου δεν επηρεάζει πολύ την θερμική και συνολική απόδοση, για μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση θερμικού και συνολικού βαθμού απόδοσης. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (διάγραμμα 5.42) φαίνεται ανεπηρέαστος από την ταχύτητα του ανέμου. Μέχρι την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού 330 K ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζεται από την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Από την θερμοκρασία αυτή κι έπειτα αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης (διάγραμμα 5.44).



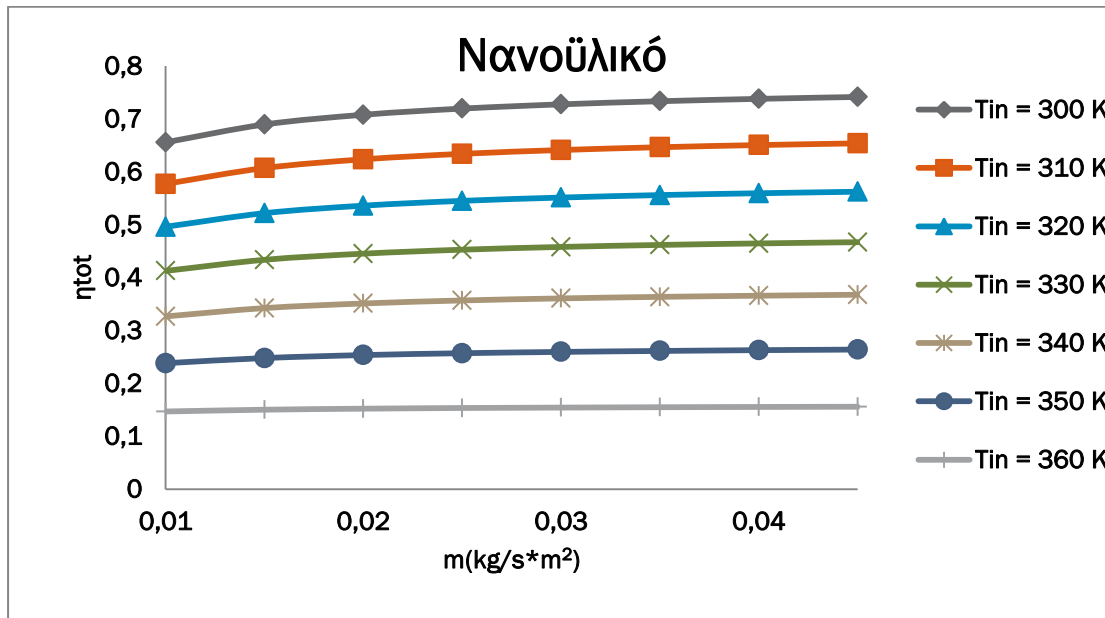
Εικόνα 5.45: Θερμική απόδοση συλλέκτη που λειτουργεί με νανοϋλικό ($\varphi = 2\%$) για διαφορετικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες



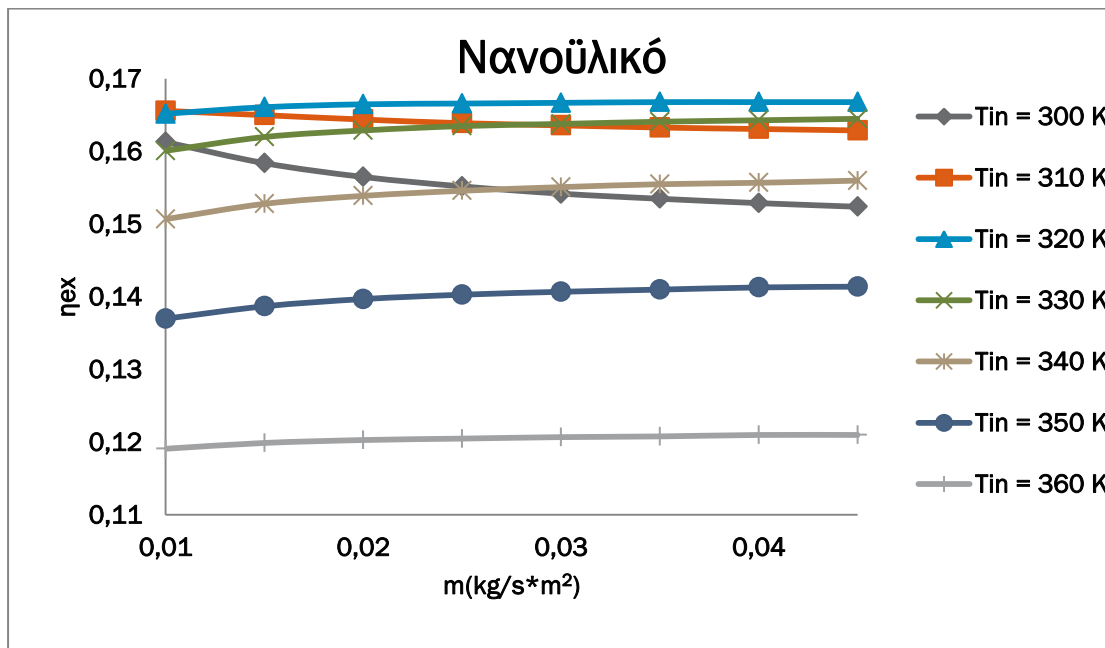
Εικόνα 5.46: Ηλεκτρική απόδοση συλλέκτη που λειτουργεί με νανοϋλικό ($\varphi = 2\%$) για διαφορετικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες

Από τα 5.45 έως 5.47 παρατηρούμε ότι αύξηση της παροχής του ρευστού οδηγεί σε αύξηση του θερμικού, του ηλεκτρικού και συνεπώς του συνολικού βαθμού απόδοσης η οποία είναι περισσότερο αισθητή σε παροχές έως $0,03 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ και για μικρές θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού.

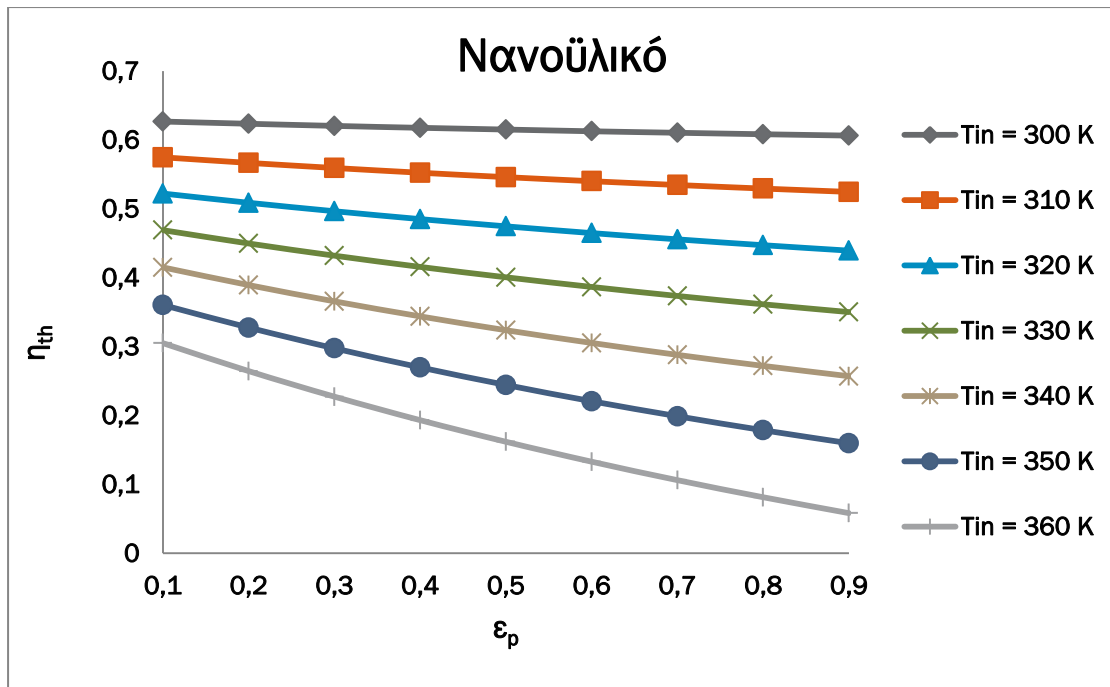
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την παροχή του ρευστού. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασία εισόδου του ρευστού μέχρι 315 K αύξηση της παροχής οδηγεί σε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, μετα τα 315 K και έως 325 K η αύξηση της παροχής δεν μεταβάλλει τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης ενώ από 325 K και περισσότερο αύξηση της παροχής συνεπάγεται και αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης



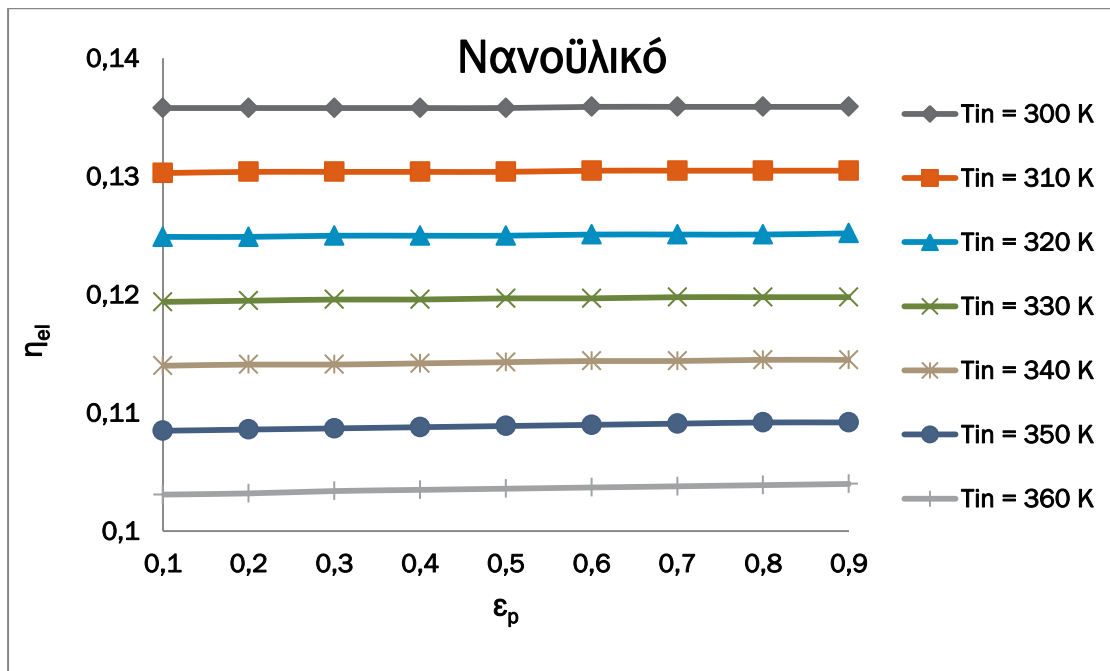
Εικόνα 5.47: Συνολική απόδοση συλλέκτη που λειτουργεί με νανοϋλικό ($\phi = 2\%$) για διαφορετικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες εισόδου



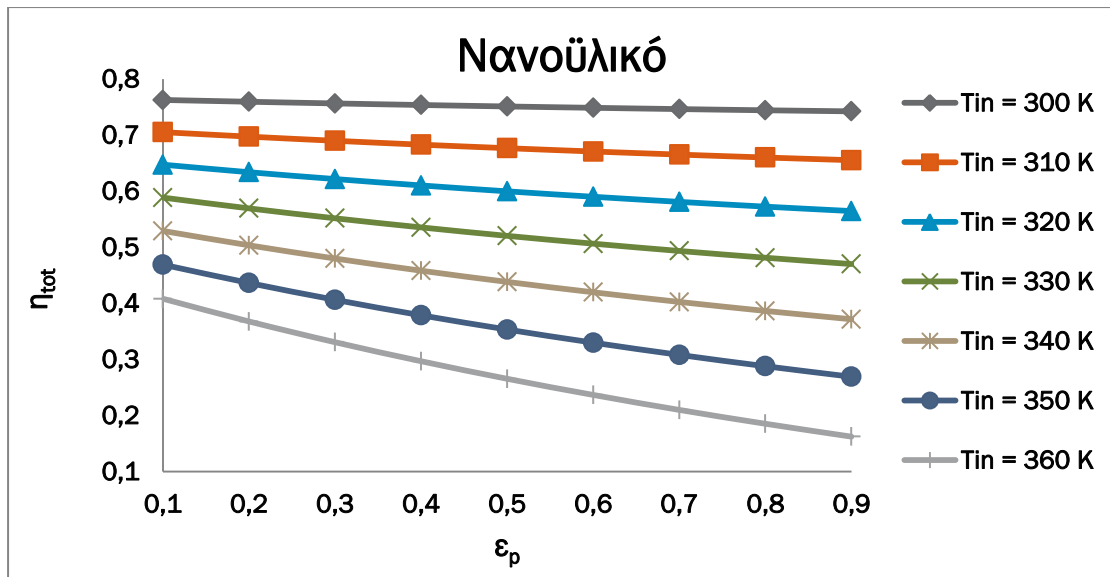
Εικόνα 5.48: Εξεργειακή απόδοση συλλέκτη που λειτουργεί με νανοϋλικό ($\phi = 2\%$) για διαφορετικούς ρυθμούς ροής και θερμοκρασίες εισόδου



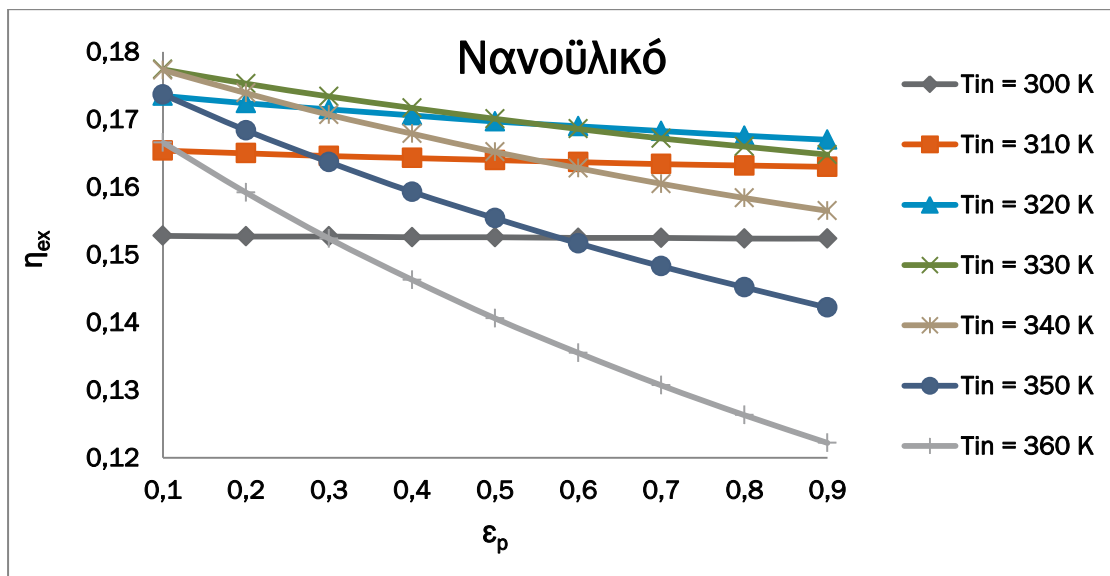
Διάγραμμα 5.49: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.



Διάγραμμα 5.50: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.



Διάγραμμα 5.51: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

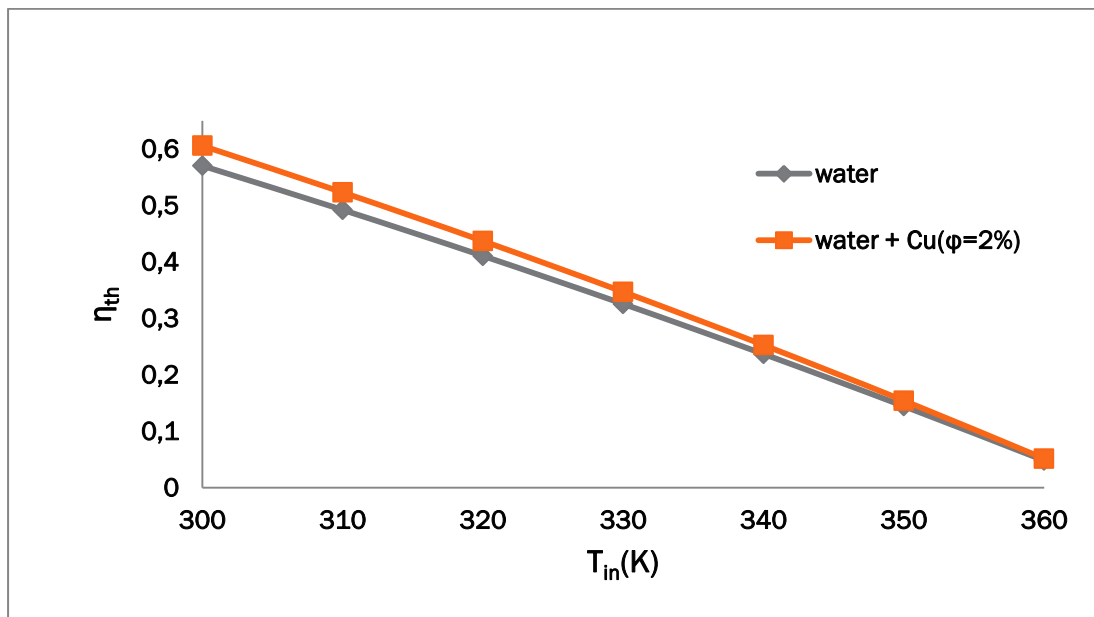


Διάγραμμα 5.52: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του.

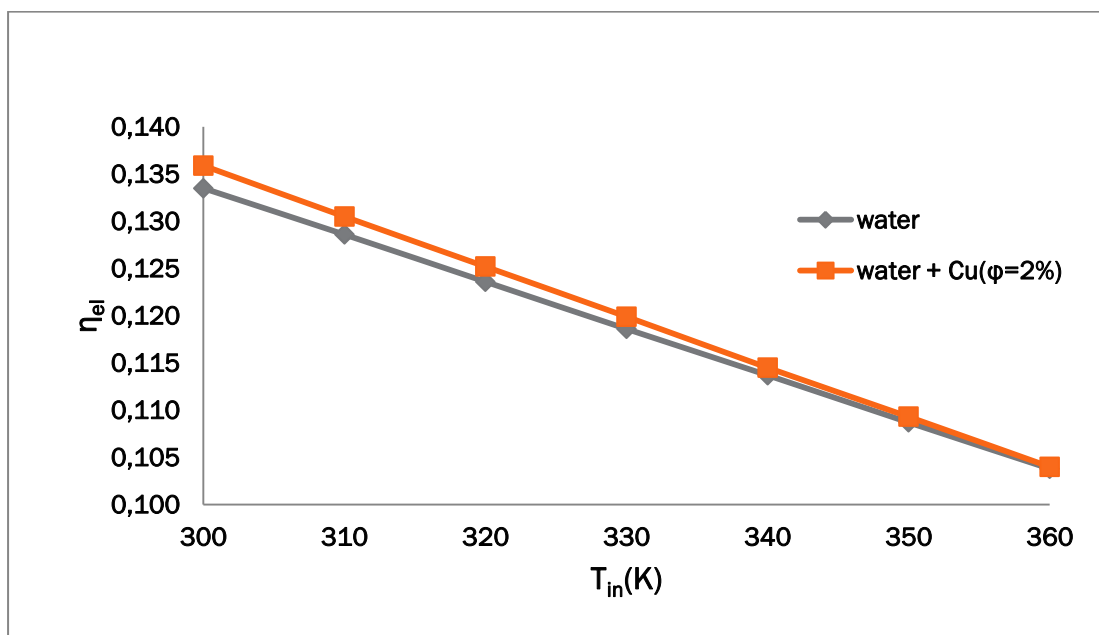
Από τα διαγράμματα 5.49 έως 5.51 παρατηρούμε ότι η αύξηση του συντελεστή εκπομπής της πλάκας προκαλεί μία μικρή αύξηση στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ενώ οδηγεί σε μείωση του θερμικού και του συνολικού κυρίως σε μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού ($T_{in} > 340\text{ K}$). Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζεται από τον συντελεστή εκπομπής της πλάκας για θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού έως 315 K . Μετά τα 315 K αύξηση του συντελεστή εκπομπής της πλάκας οδηγεί σε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης με την μείωση αυτή να είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

5.3 Σύγκριση βαθμών απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού

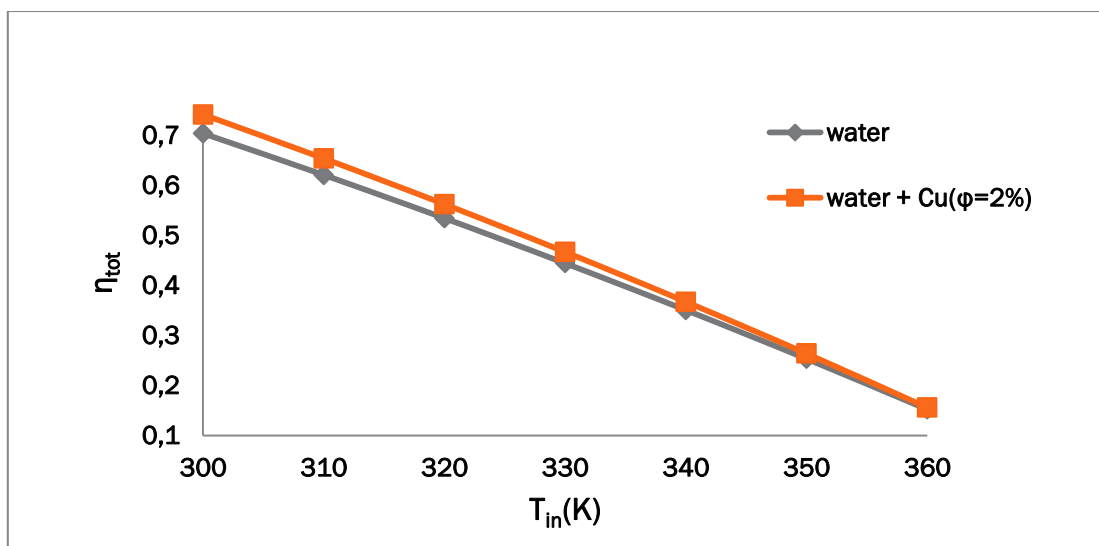
Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται άμεση σύγκριση μεταξύ των διαφόρων βαθμών απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.



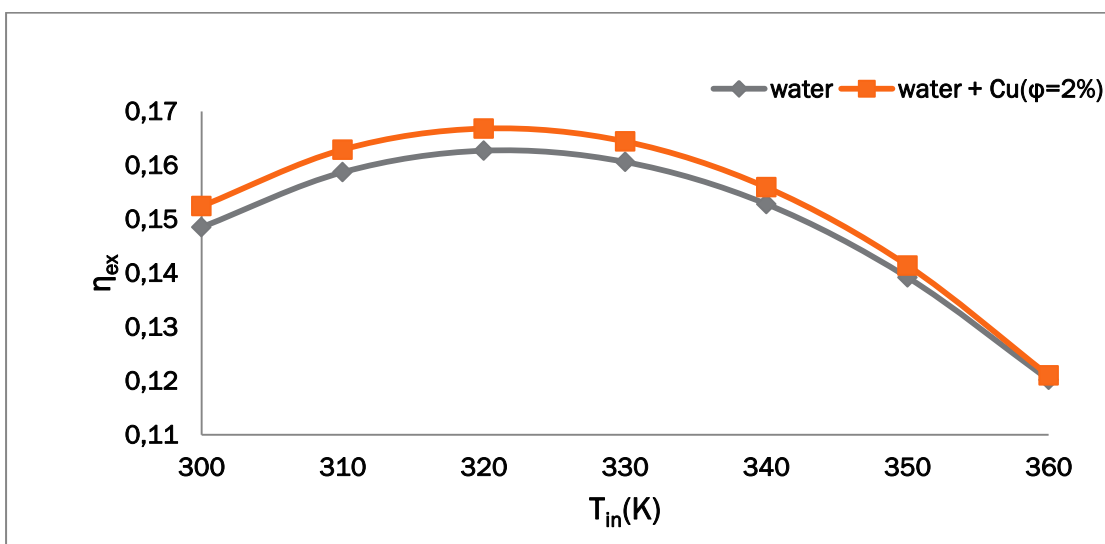
Διάγραμμα 5.53: Σύγκριση θερμικού βαθμού απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού



Διάγραμμα 5.54: Σύγκριση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού



Διάγραμμα 5.55: Σύγκριση συνολικού βαθμού απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού



Διάγραμμα 5.56: Σύγκριση εξεργειακού βαθμού απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού

Στις περιπτώσεις του θερμικού, του ηλεκτρικού και του συνολικού βαθμού απόδοσης παρατηρούμε ότι με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού οι καμπύλες πλησιάζουν και άρα η διαφορά μεταξύ τους μειώνεται μέχρι που μηδενίζεται σε θερμοκρασία $T_{in}=360$ K. Η αρχική διαφορά για τον θερμικό είναι 3.55% και για τον ηλεκτρικό 0.94%. Η διαφορά μεταξύ των εξεργειακών βαθμών απόδοσης ξεκινά στην θερμοκρασία 300 K με την τιμή 0.38% παίρνει την μέγιστη τιμή της όταν η θερμοκρασία γίνεται 320 K και μηδενίζεται όταν γίνει 360 K.

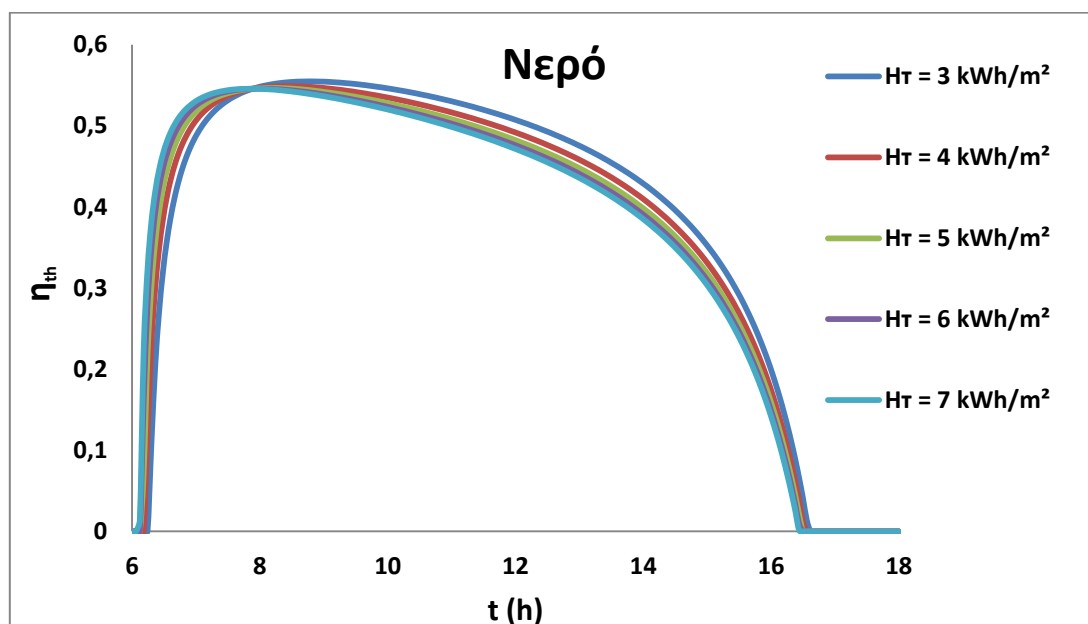
Στον παρακάτω πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η απόκλιση μεταξύ των τιμών που λαμβάνει ο κάθε βαθμός απόδοσης για νανοϋλικό και νερό. Στην τελευταία γραμμή παρουσιάζεται η μέση τιμή όλων των παραπάνω αποκλίσεων.

| T _{in} | βαθμός απόδοσης | | | |
|-----------------|-----------------|----------|-----------|-------------|
| | ηλεκτρικός | θερμικός | συνολικός | εξεργειακός |
| 300 | 1,80% | 6,22% | 5,39% | 2,63% |
| 310 | 1,48% | 6,32% | 5,32% | 2,65% |
| 320 | 1,29% | 6,43% | 5,24% | 2,52% |
| 330 | 1,10% | 6,57% | 5,09% | 2,37% |
| 340 | 0,70% | 6,71% | 4,76% | 2,03% |
| 350 | 0,55% | 6,85% | 4,15% | 1,58% |
| 360 | 0,19% | 7,04% | 2,37% | 0,67% |
| | 1,02% | 6,59% | 4,62% | 2,06% |

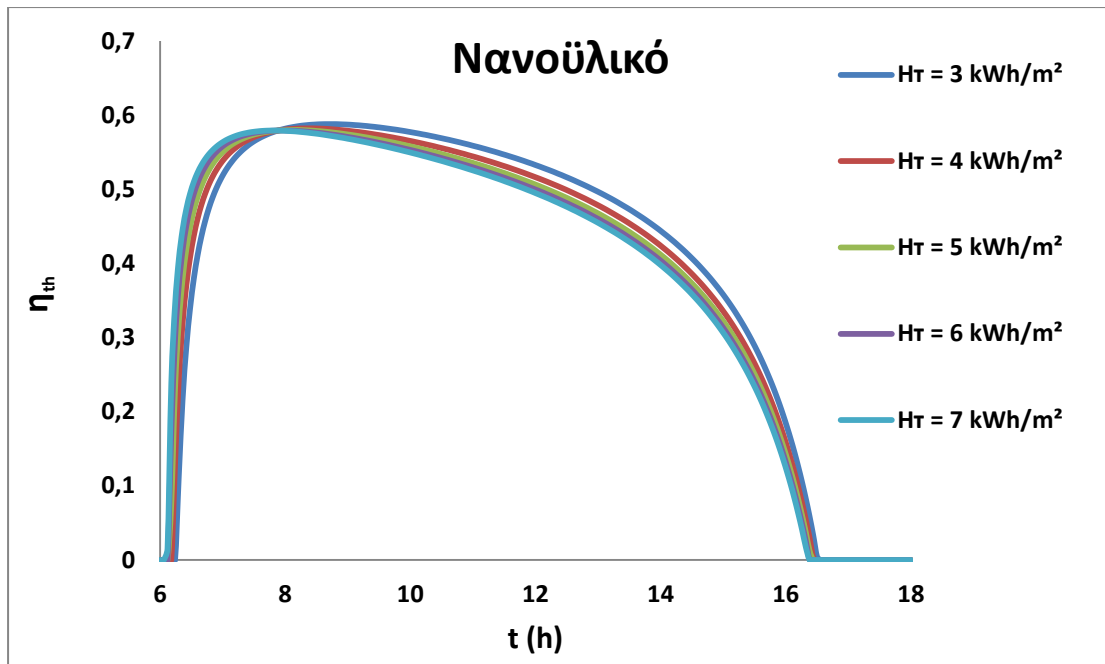
Πίνακας 5.1: Απόκλιση βαθμού απόδοσης μεταξύ νανοϋλικού και νερού για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού.

5.4 Σύγκριση νερού με νανοϋλικό για την δεξαμενή αποθήκευσης των 150 L κατά τη διάρκεια της μέρας

Για την δεξαμενή αποθήκευσης των 150 L μελετήθηκε και παρουσιάζεται η ημερήσια μεταβολή θερμικού, ηλεκτρικού και συνολικού βαθμού απόδοσης καθώς επίσης και της θερμικής και ηλεκτρικής παραγωγής και της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής.

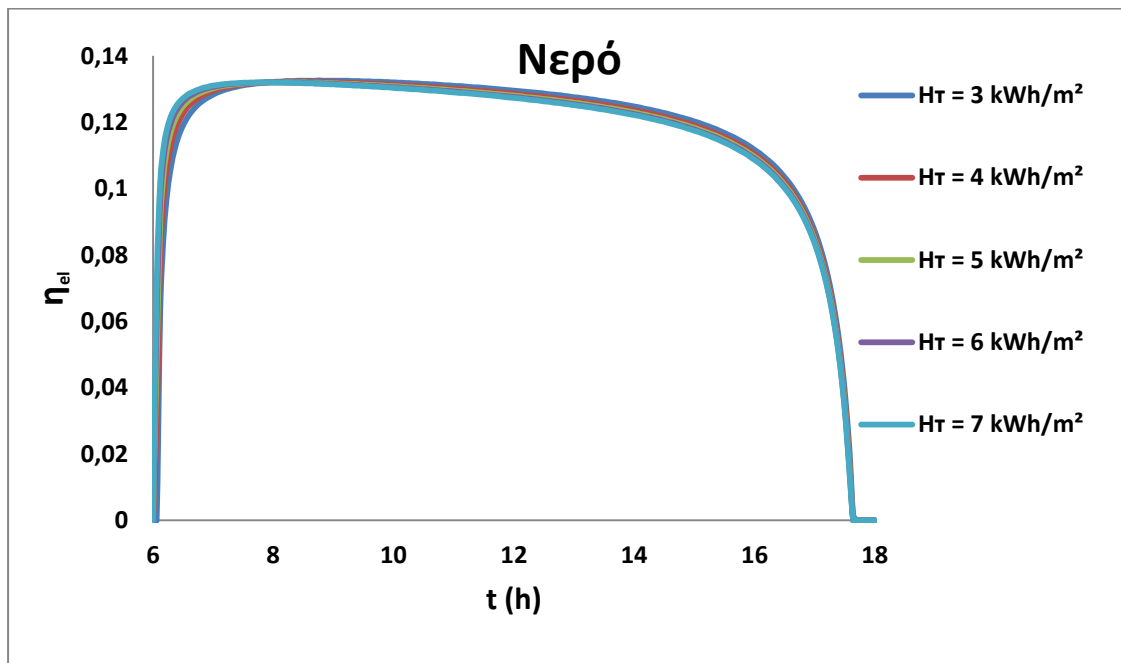


Διάγραμμα 5.57: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο: νερό)

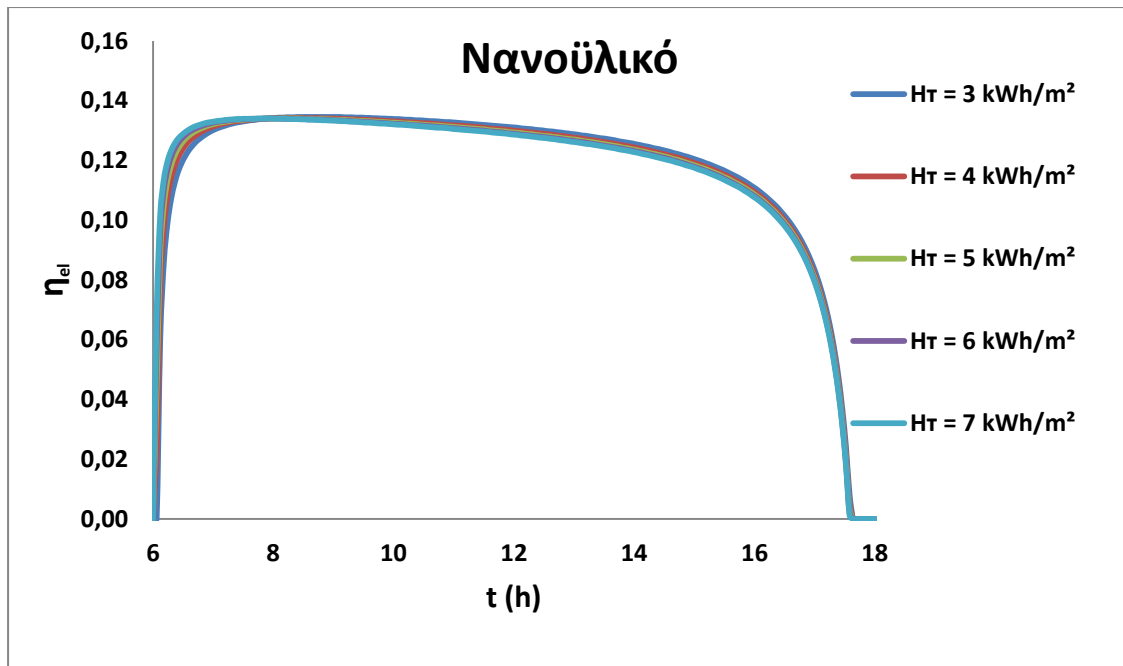


Διάγραμμα 5.58: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νανοϋλικό)

Παρατηρούμε ότι οι τιμές που λαμβάνει ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση του νανοϋλικού. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει στην περίπτωση του νανοϋλικού είναι 57.71% ενώ στην περίπτωση του νερού 54.51%.

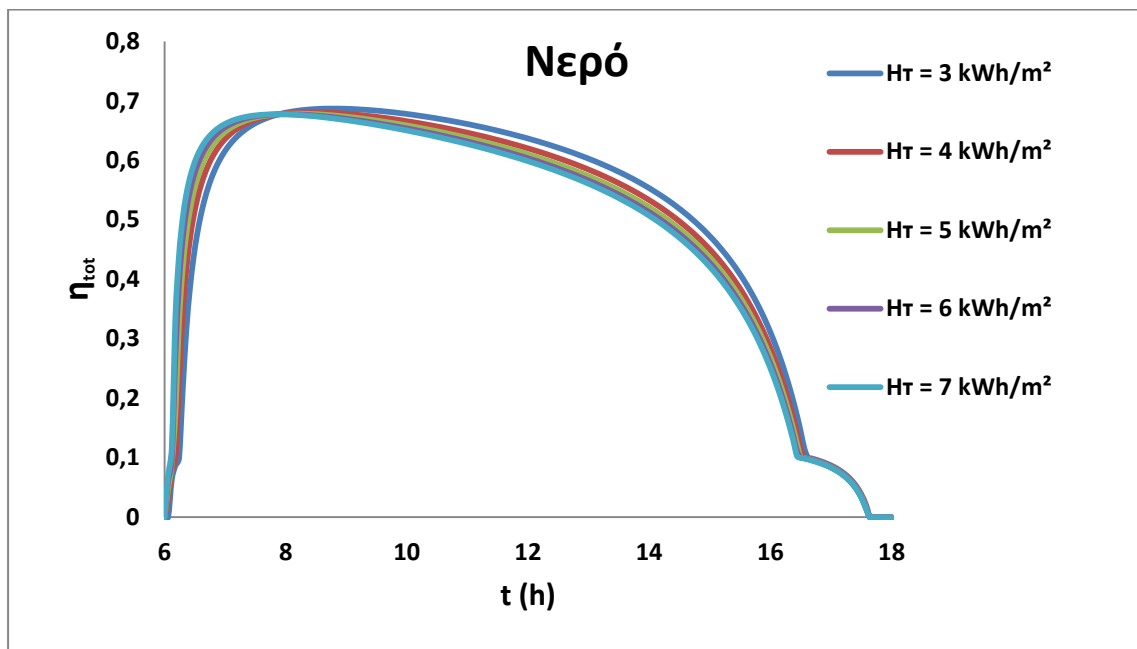


Διάγραμμα 5.59: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νερό)

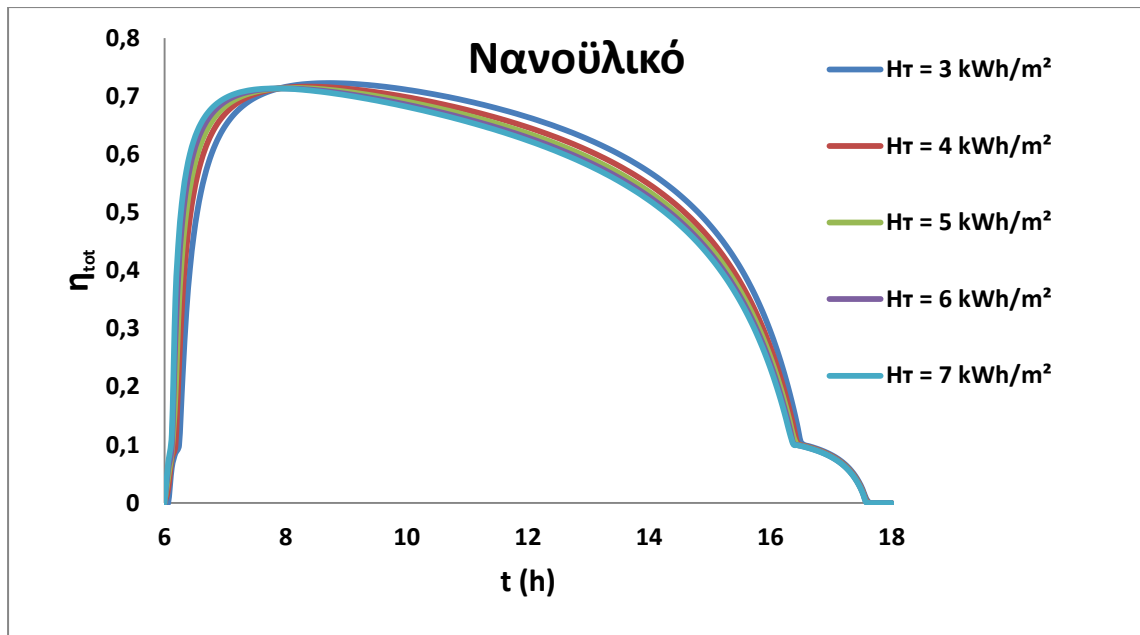


Διάγραμμα 5.60: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νανοϋλικό)

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζεται σημαντικά από την χρήση νανοϋλικού με την διαφορά που παρατηρείται να είναι περίπου 0.2%. Άλλωστε το νανοϋλικό χρησιμοποιείται κυρίως για την βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

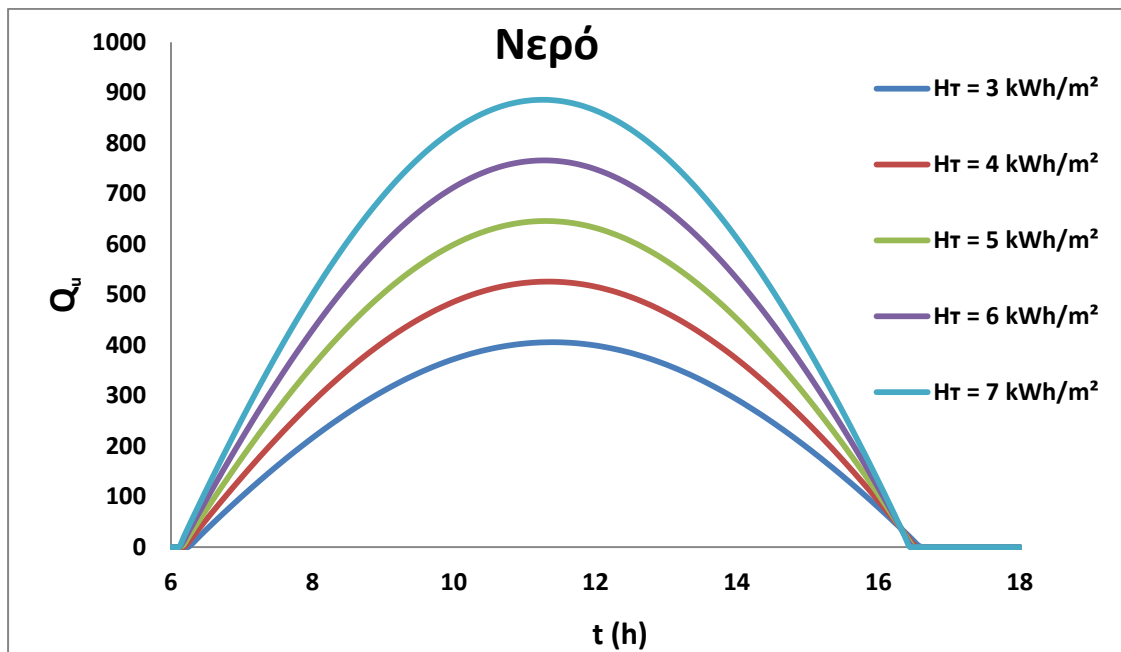


Διάγραμμα 5.61: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νερό)

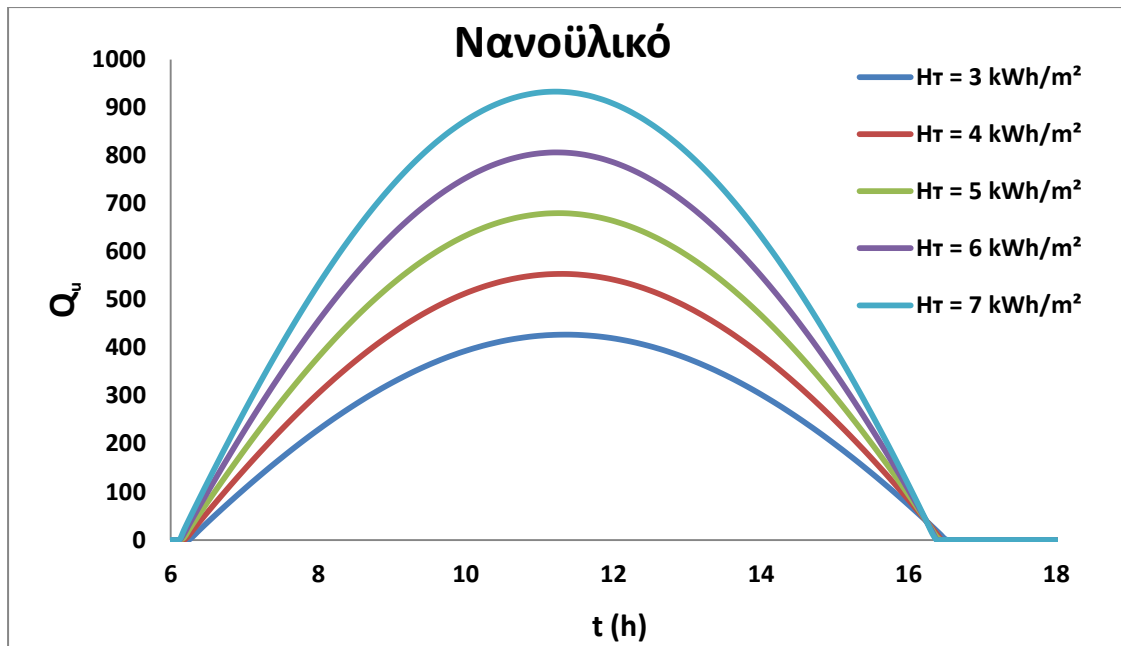


Διάγραμμα 5.62: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νανοϋλικό)

Το διάγραμμα του συνολικού βαθμού απόδοσης ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτή του θερμικού. Το ‘σκαλοπάτι’ που παρατηρείται μετά τις 16:30 συμβαίνει γιατί εκείνη την ώρα ο θερμικός βαθμός απόδοσης μηδενίζεται ενώ ο ηλεκτρικός μηδενίζεται περίπου στις 18:00 (δύση του ηλίου).

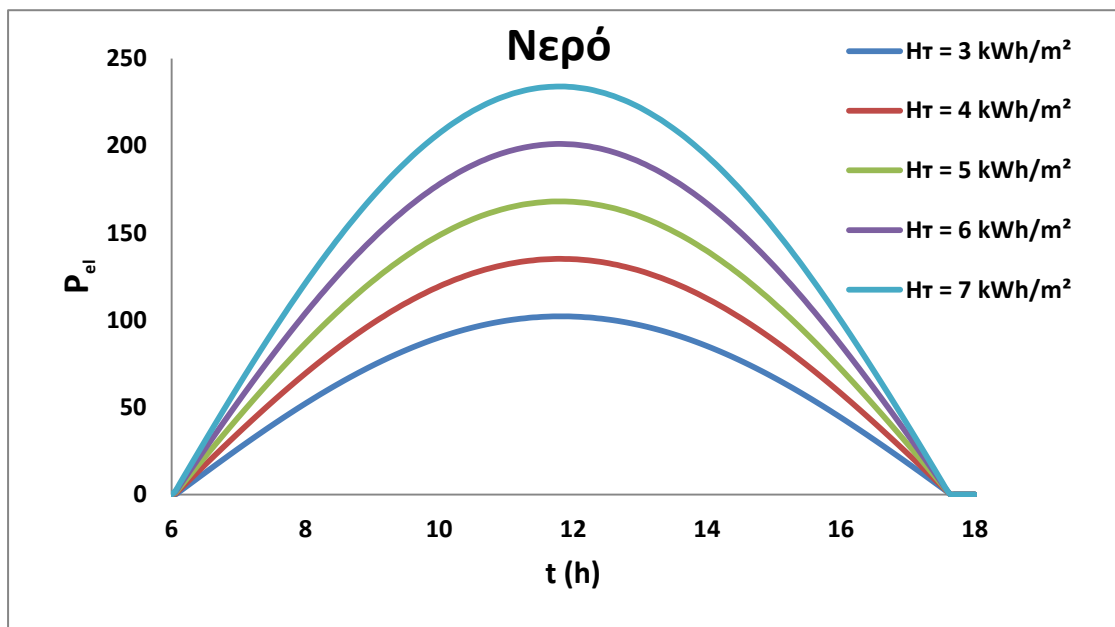


Διάγραμμα 5.63: Μεταβολή της ωφέλιμης θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νερό)

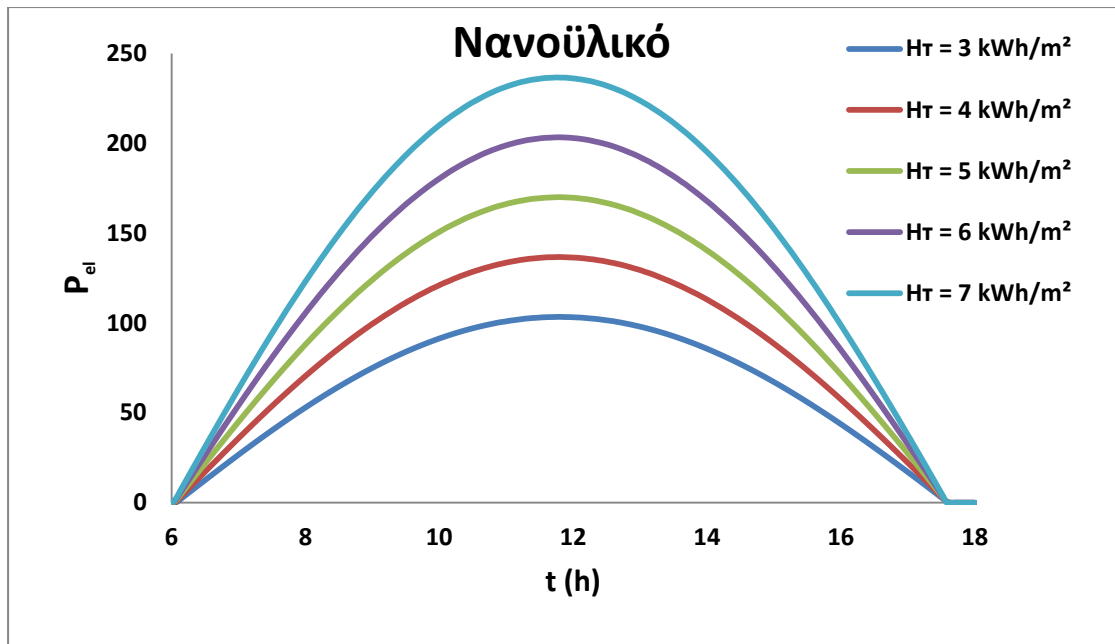


Διάγραμμα 5.64: Μεταβολή της ωφέλιμης θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νανοϋλικό).

Όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της συμπεριφοράς του θερμικού βαθμού απόδοσης, στην περίπτωση του νανοϋλικού λαμβάνουμε περισσότερη ωφέλιμη θερμότητα. Η διαφορά στο ποσό της ωφέλιμης θερμότητας που παίρνουμε είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας.

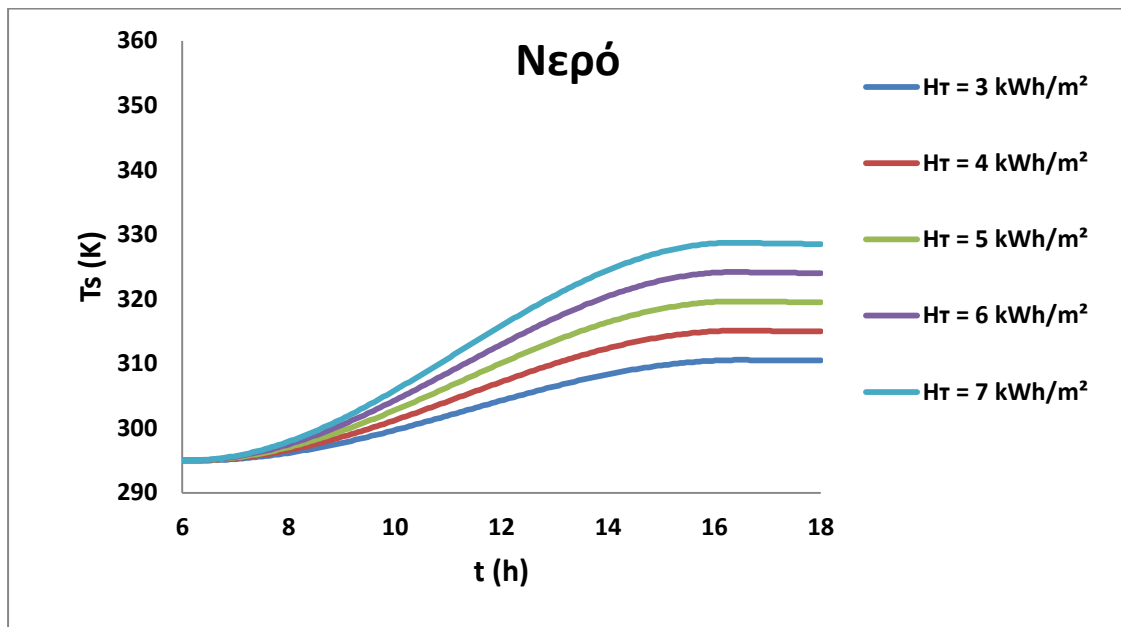


Διάγραμμα 5.65: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νερό).

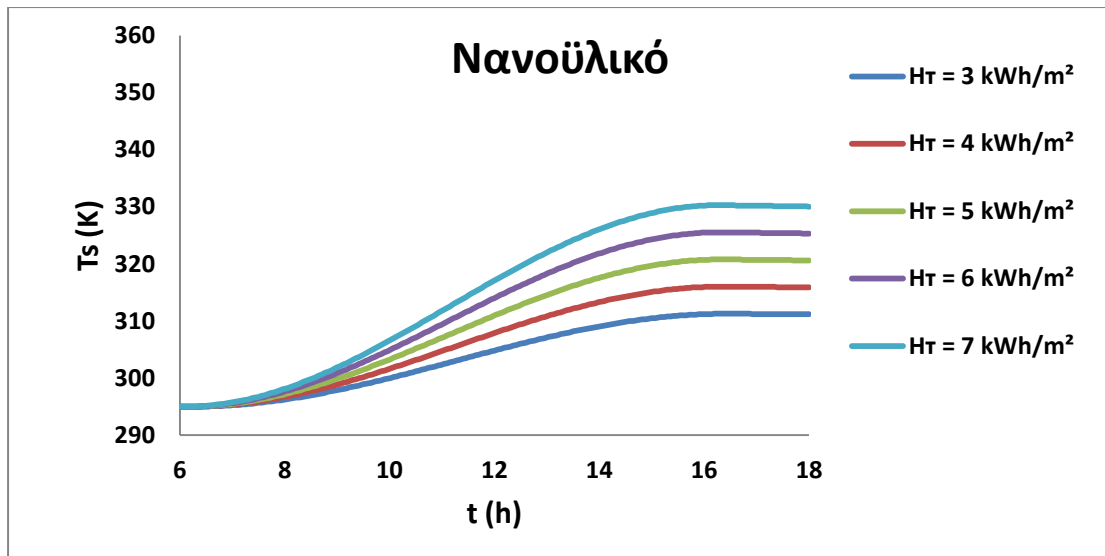


Διάγραμμα 5.66: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νανοϋλικό).

Όπως συνέβη και με τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης οι διαφορές που παρατηρείται μεταξύ των δύο περιπτώσεων (νερό-νανοϋλικό) για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι ελάχιστη.



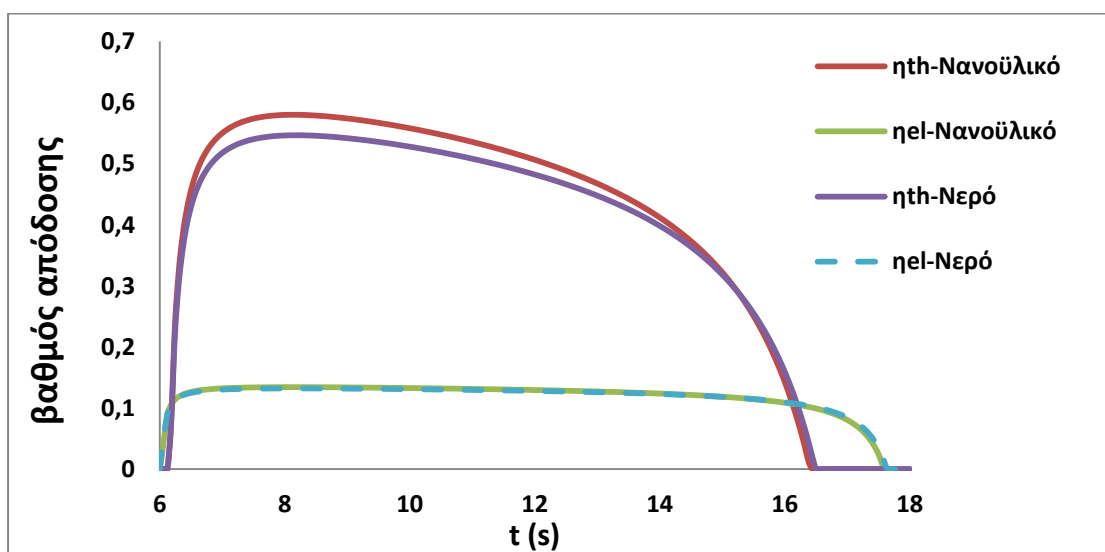
Διάγραμμα 5.67: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νερό).



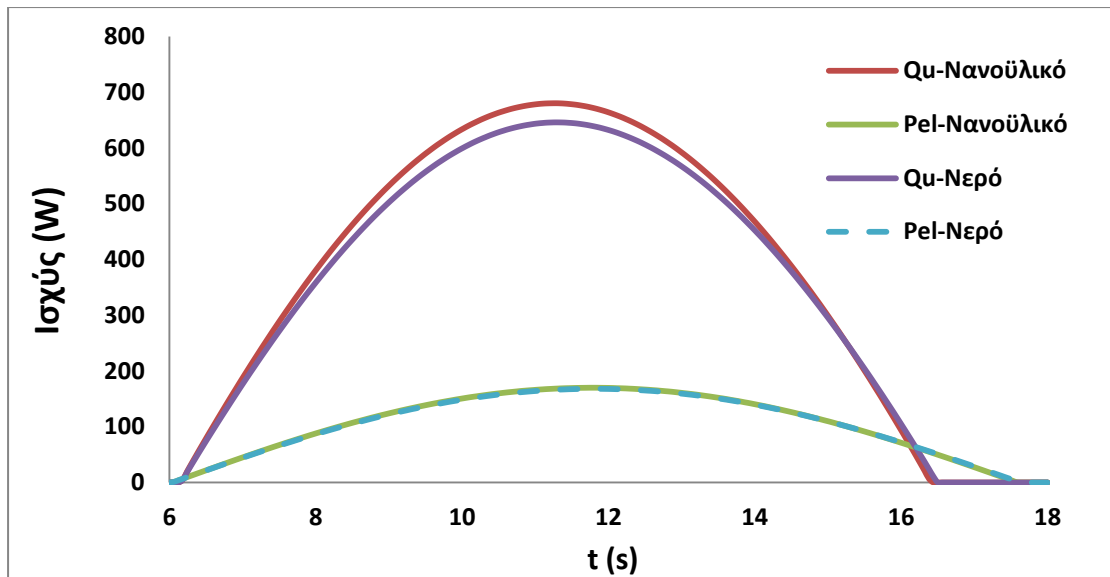
Διάγραμμα 5.68: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (εργαζόμενο μέσο:νανοϋλικό).

Στην περίπτωση της χρήσης νανοϋλικού η θερμοκρασία του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης είναι υψηλότερη.

Τα παραπάνω συμπεράσματα γίνονται επίσης εύκολα αντιληπτά με τα παρακάτω διαγράμματα (διάγραμμα 5.69 και 5.70) όπου σε κοινό διάγραμμα παρουσιάζονται α) ο θερμικός και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης για τις δύο περιπτώσεις, νερό και νανοϋλικό, (διάγραμμα 5.69) και β) η ωφέλιμη θερμότητα και ηλεκτρική ισχύς επίσης για τις δύο περιπτώσεις (διάγραμμα 5.70). Τα διαγράμματα αυτά αναφέρονται σε ένταση ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας $H_T=5 \text{ kWh/m}^2$ και όγκο δεξαμενής αποθήκευσης $V=150 \text{ L}$.



Διάγραμμα 5.69: Σύγκριση θερμικού και ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης για χρήση νερού και νανοϋλικού.

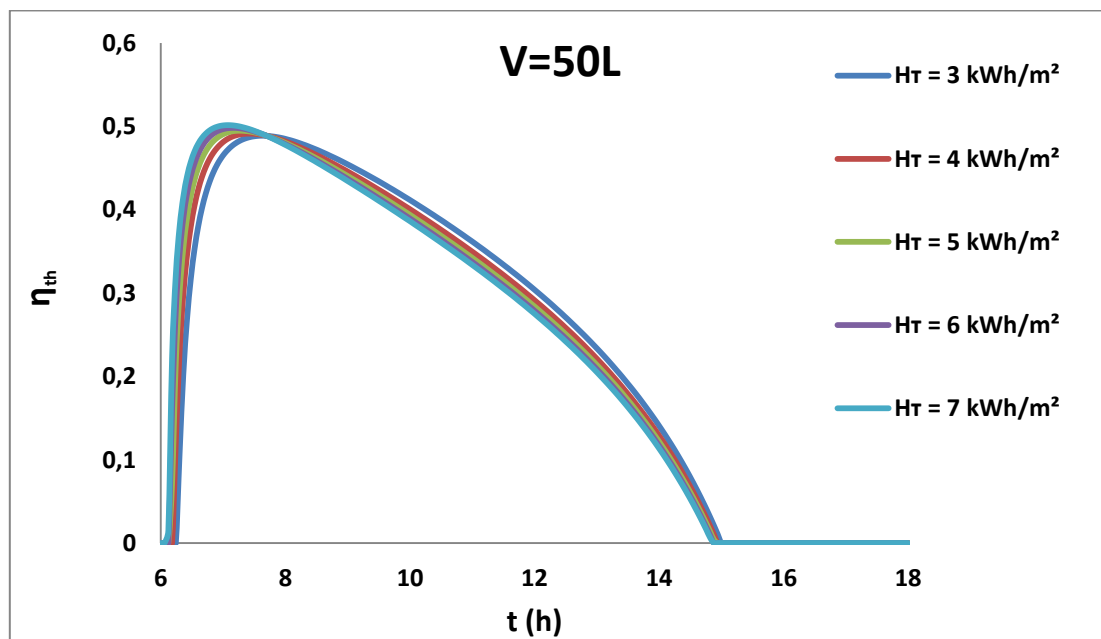


Διάγραμμα 5.70: Σύγκριση ωφέλιμης θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος για χρήση νερού και νανοϋλικού.

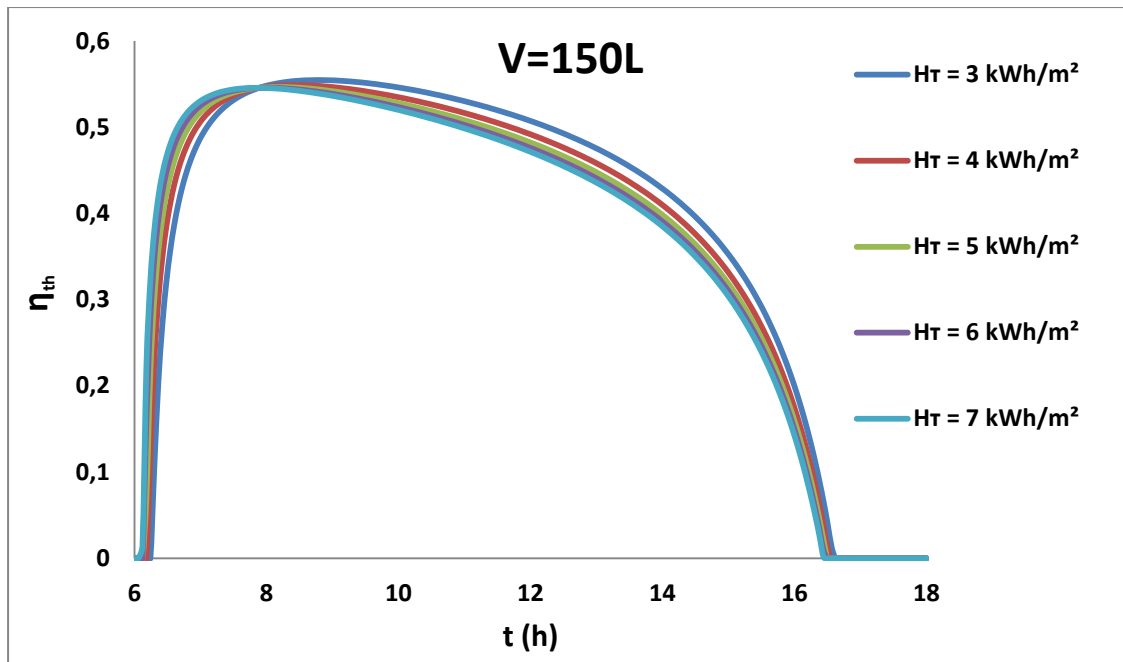
5.5 Η επίδραση του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης

Σημαντικό είναι να είναι γνωστή η επίδραση που έχει ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης του εργαζόμενου μέσου. Έτσι διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και μεταβάλλοντας μόνο τον όγκο της δεξαμενής προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα για διάφορες τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας.

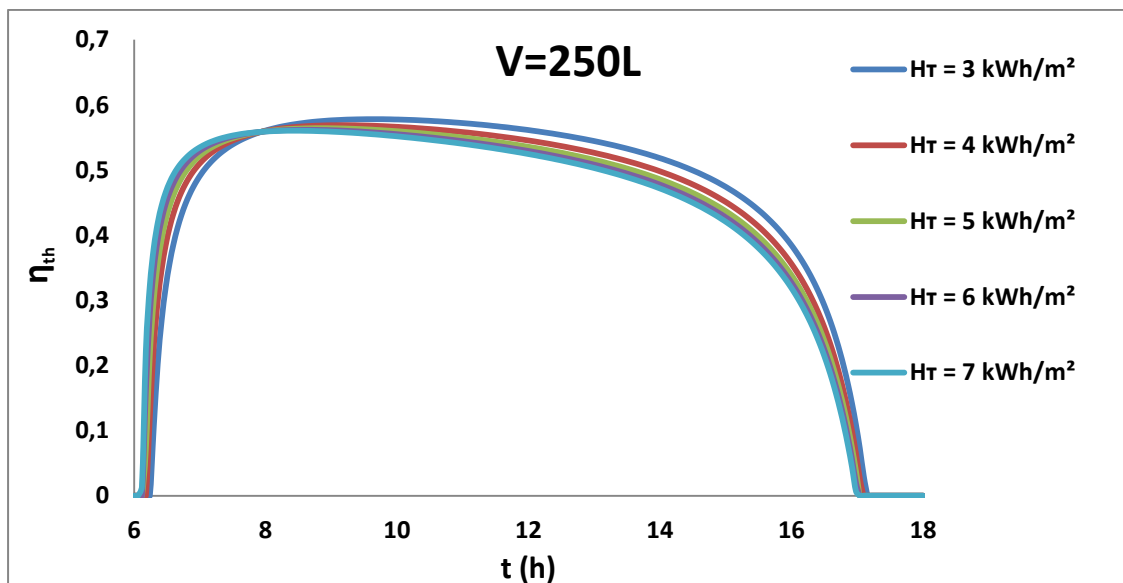
Για την περίπτωση της χρήσης νερού



Διάγραμμα 5.71: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=50\text{ L}$)



Διάγραμμα 5.72: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=150 L)

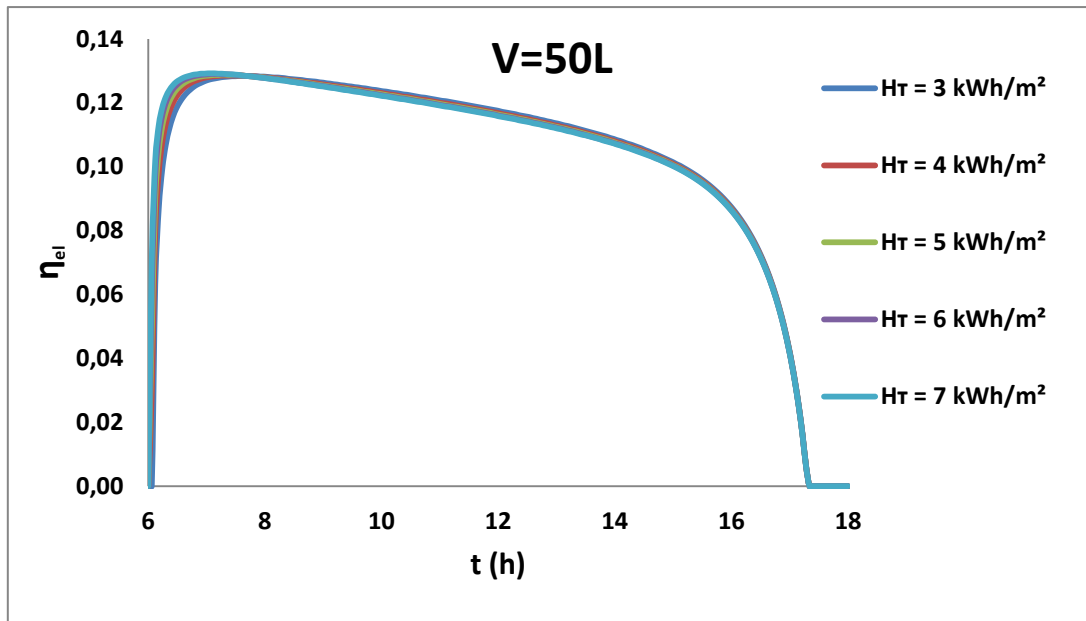


Διάγραμμα 5.73: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=250 L)

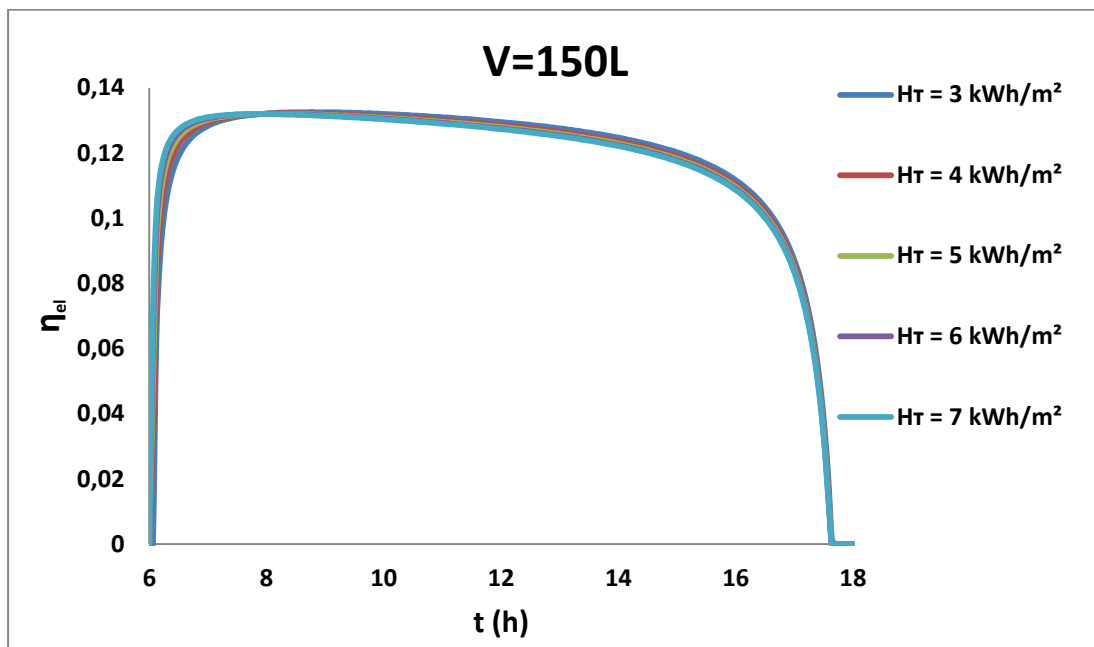
Οι τρεις βασικές διαφορές που παρατηρούνται στα διαγράμματα 5.71 έως 5.73 είναι:

1. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή.
2. Η διατήρηση υψηλού θερμικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι πιο εύκολα επιτεύξιμη όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή.

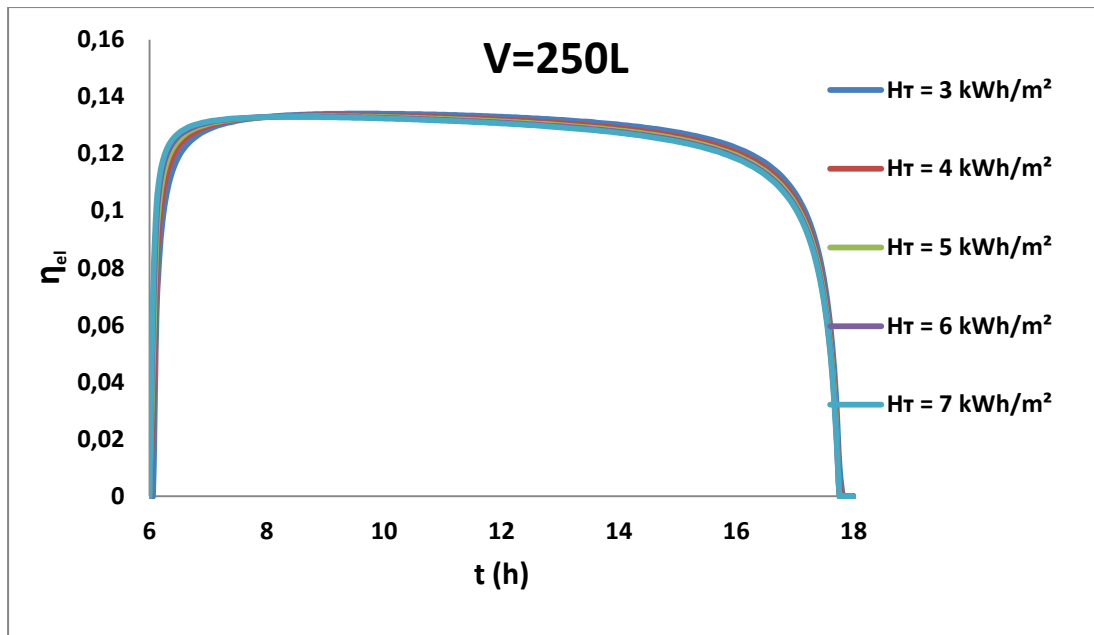
3. Ο μηδενισμός του θερμικού βαθμού απόδοσης παρατείνεται έως και δύο ώρες(στην περίπτωση $V=50\text{ L}$ μηδενίζεται περίπου στις 15:00 ενώ στην περίπτωση του $V=250\text{ L}$ μηδενίζεται στις 17:00)



Διάγραμμα 5.74: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=50\text{ L}$)

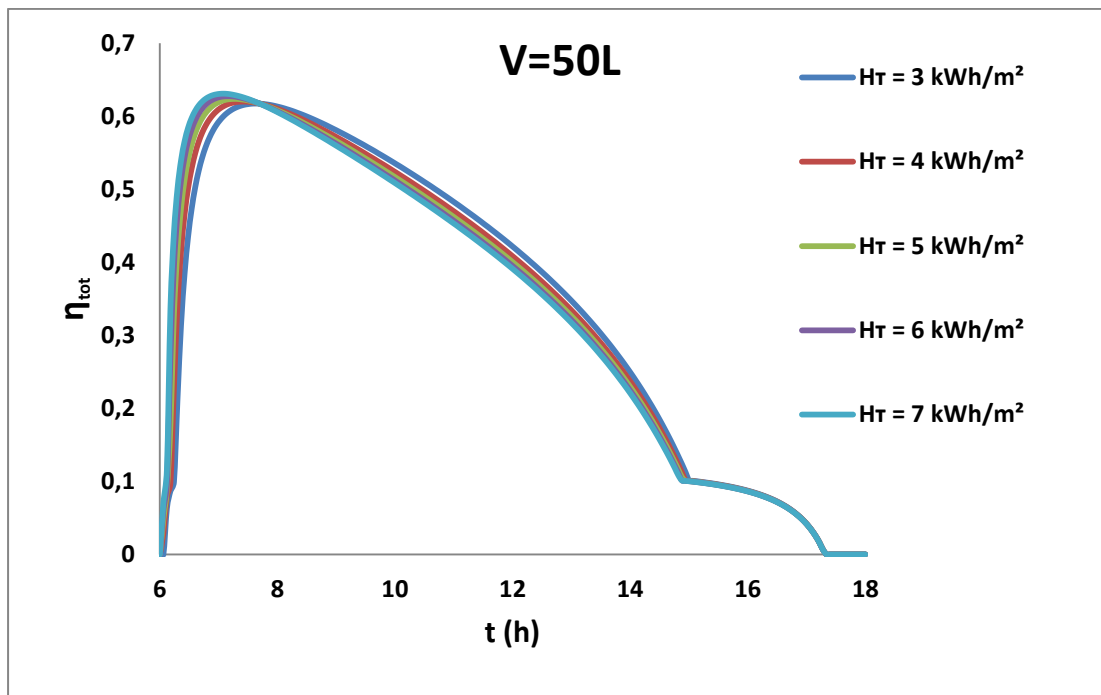


Διάγραμμα 5.75: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=150\text{ L}$)

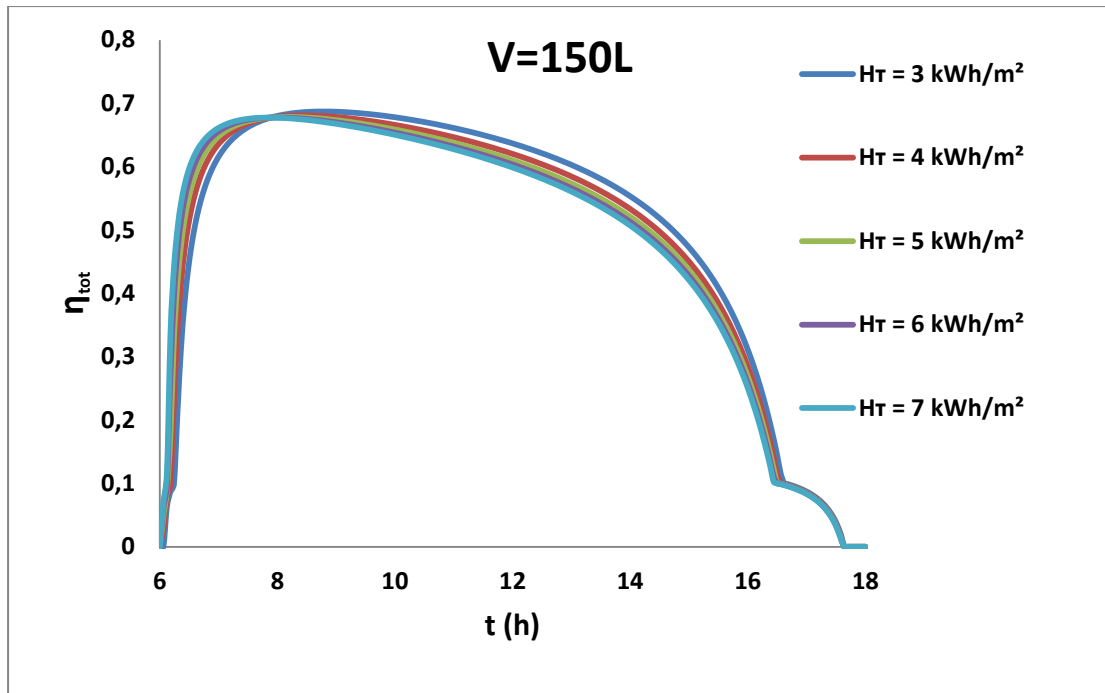


Διάγραμμα 5.76: Μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=250 L)

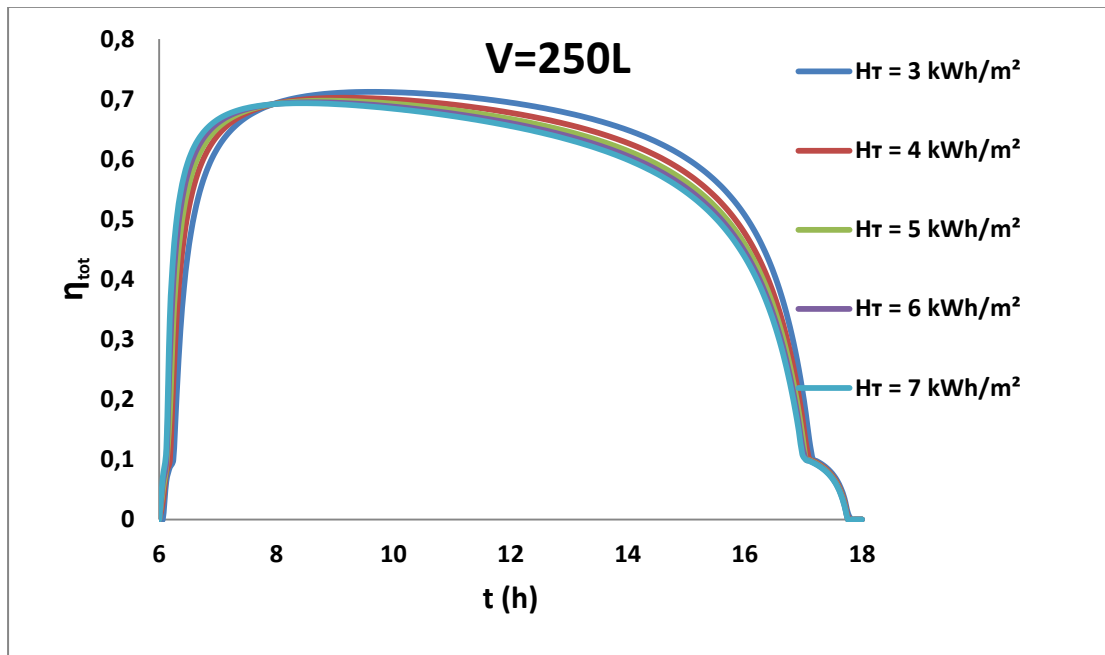
Ο βέλτιστος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης διαφοροποιείται κατά 0.2% από περίπτωση σε περίπτωση στα διαγράμματα 5.74 έως 5.76. Επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή τόσο περισσότερο χρόνο διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και άρα επιβραδύνεται και ο μηδενισμός του.



Διάγραμμα 5.77: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=50 L)

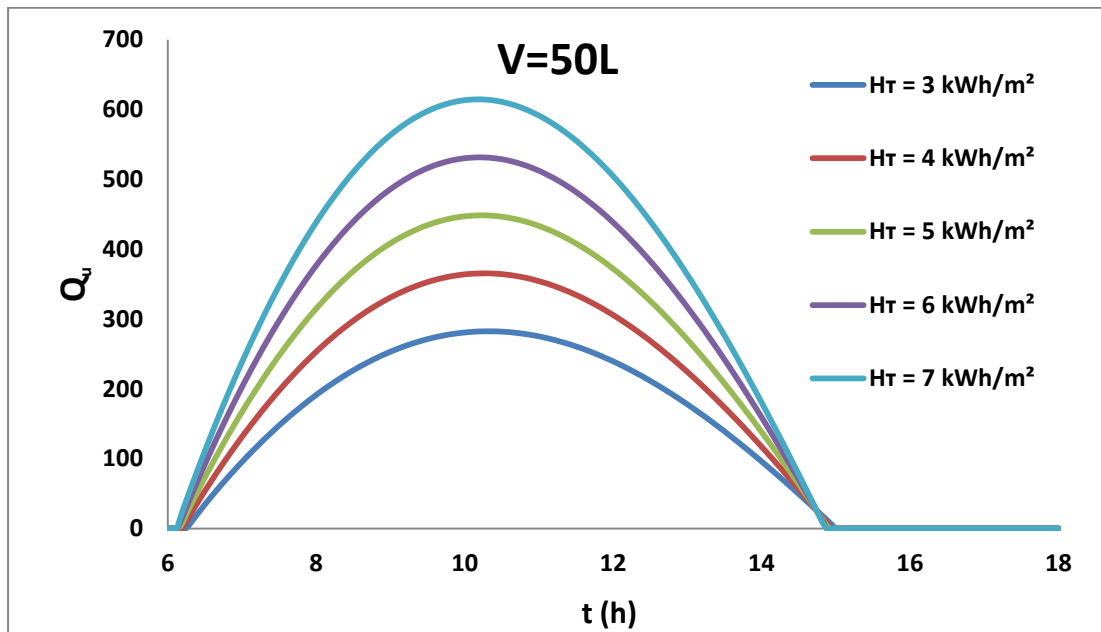


Διάγραμμα 5.78: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=150 \text{ L}$)

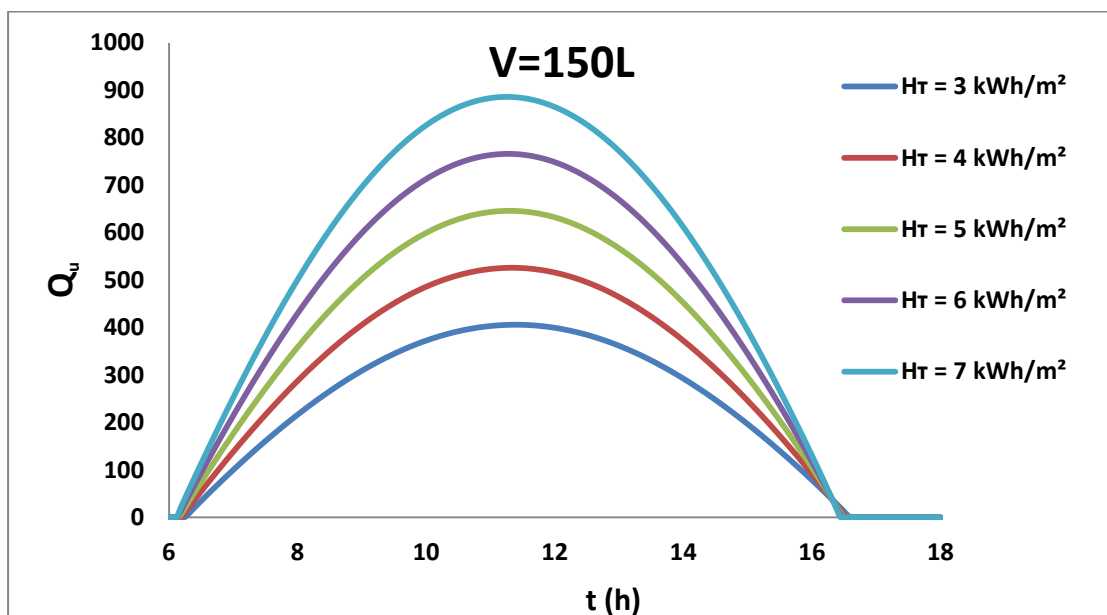


Διάγραμμα 5.79: Μεταβολή του συνολικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=250 \text{ L}$)

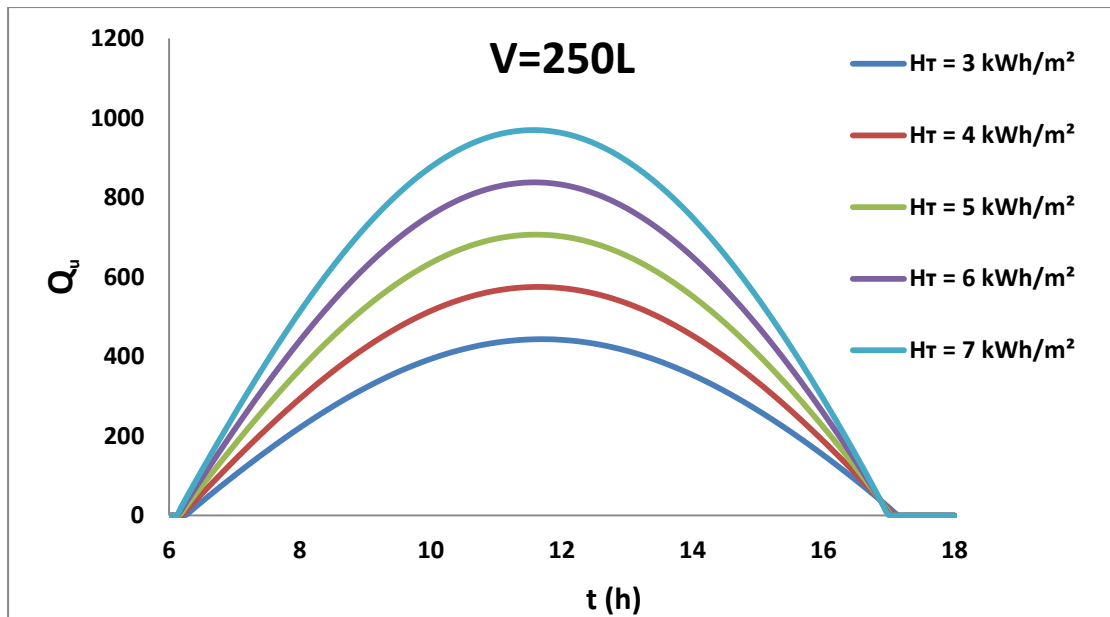
Τα διαγράμματα 5.77 έως 5.79 ακολουθούν παρόμοια πορεία με αυτά του θερμικού βαθμού απόδοσης (5.71 έως 5.73) εφόσον ο θερμικός βαθμός απόδοσης έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στην διαμόρφωση του συνολικού από τον ηλεκτρικό.



Διάγραμμα 5.80: Μεταβολή της ωφέλιμης θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=50 L)



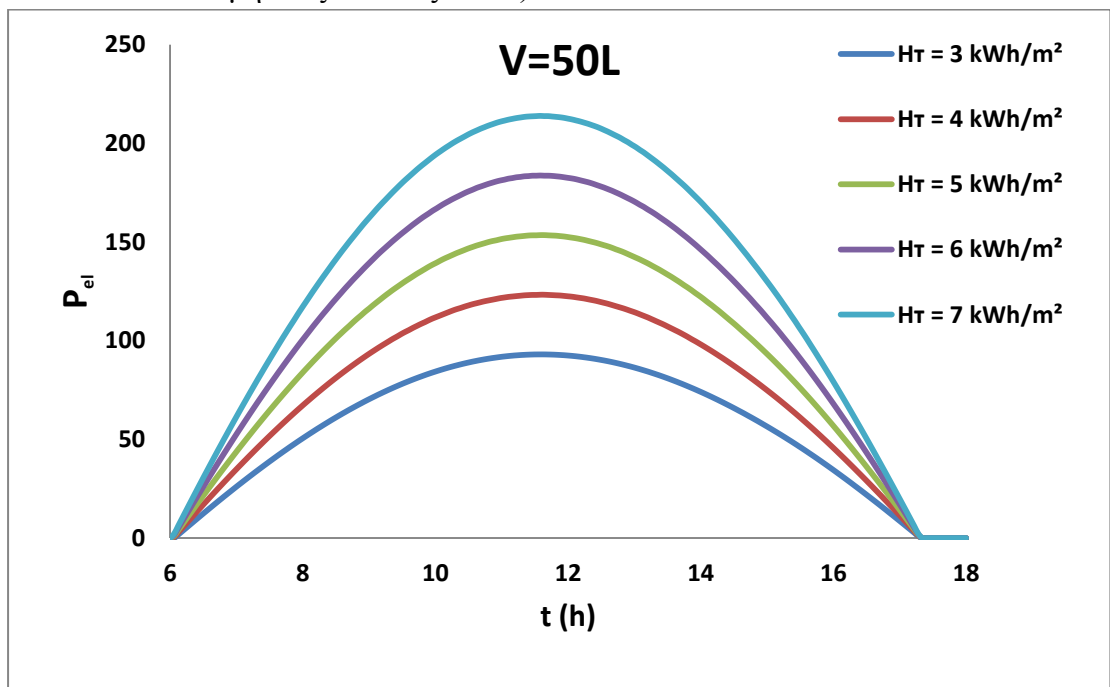
Διάγραμμα 5.81: Μεταβολή της ωφέλιμης θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=150 L)



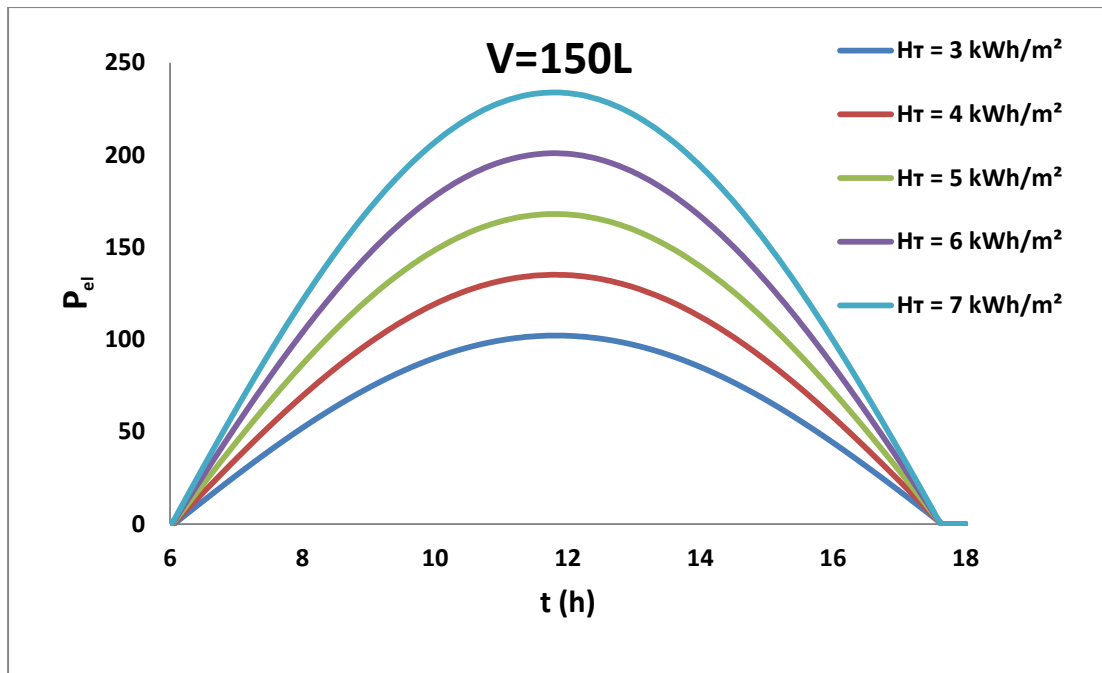
Διάγραμμα 5.82: Μεταβολή της ωφέλιμης θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=250\text{ L}$)

Οι δύο βασικές διαφορές που παρατηρούνται στα διαγράμματα 5.80 έως 5.82 είναι:

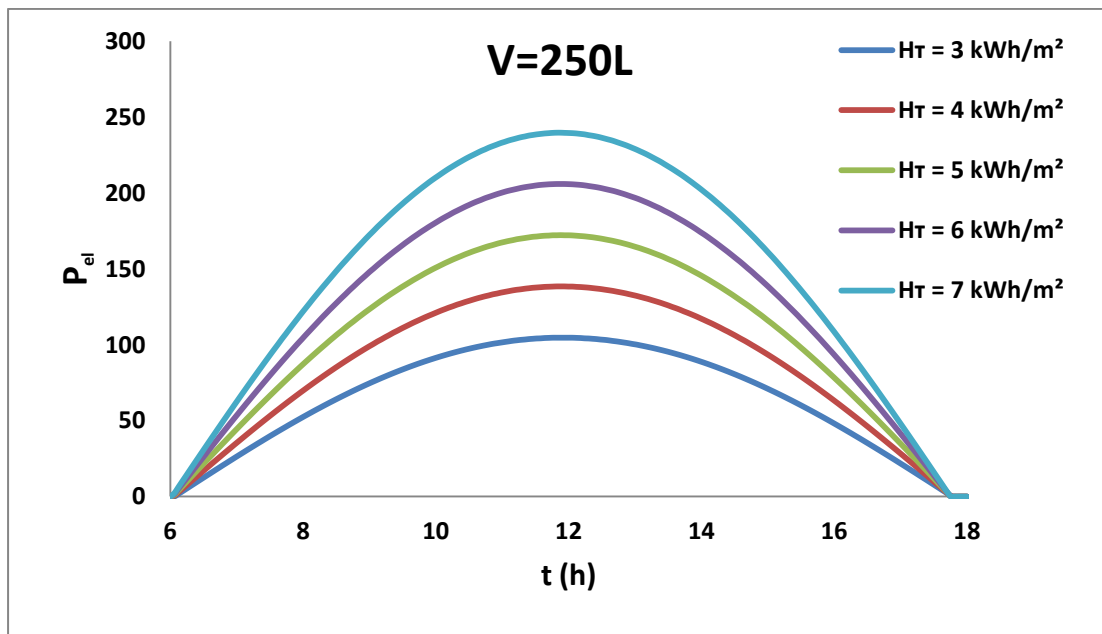
1. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η ωφέλιμη θερμότητα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή.
2. Ο μηδενισμός της ωφέλιμης θερμότητας παρατείνεται έως και δύο ώρες (στην περίπτωση $V=50\text{ L}$ μηδενίζεται περίπου στις 15:00 ενώ στην περίπτωση του $V=250\text{ L}$ μηδενίζεται στις 17:00)



Διάγραμμα 5.83: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=50\text{ L}$)

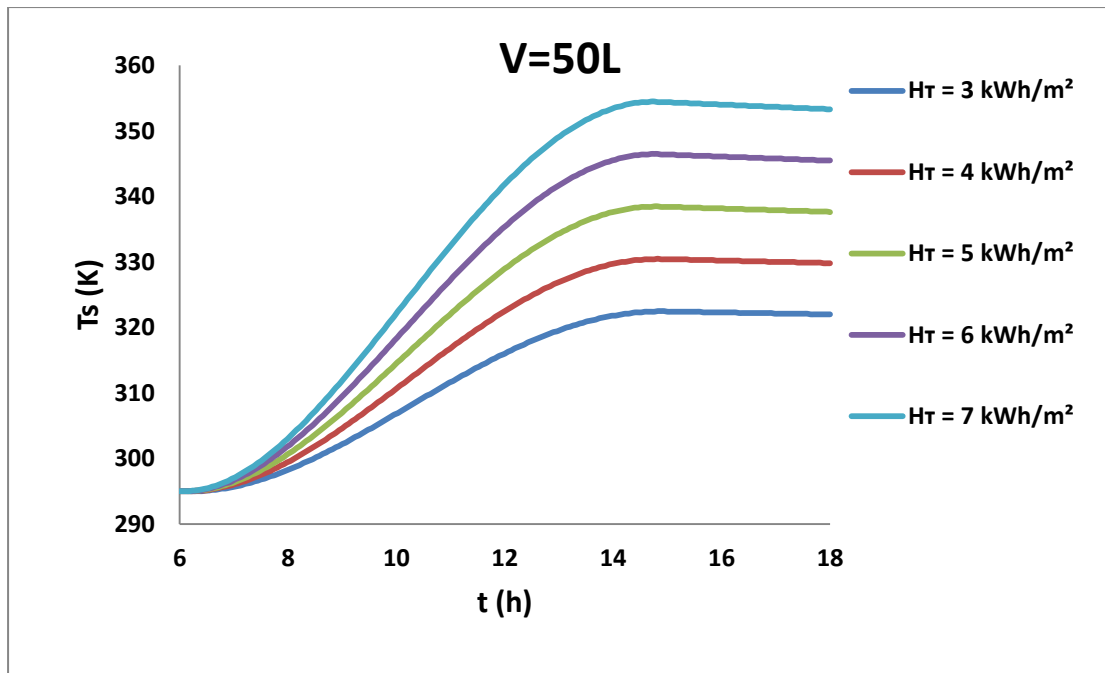


Διάγραμμα 5.84: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=150 L$)

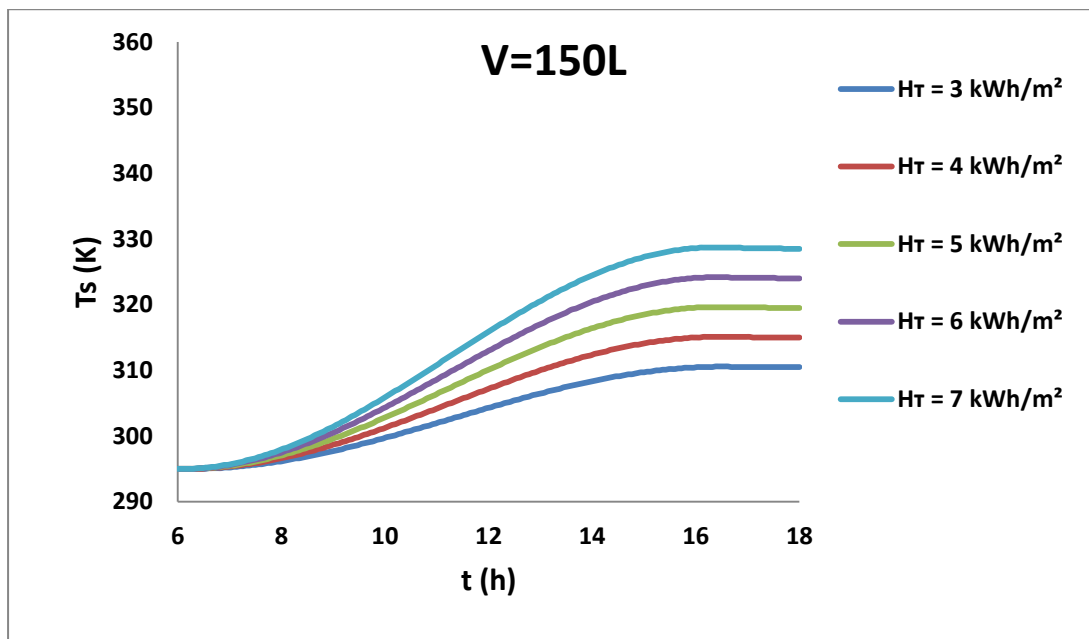


Διάγραμμα 5.85: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας ($V=250 L$)

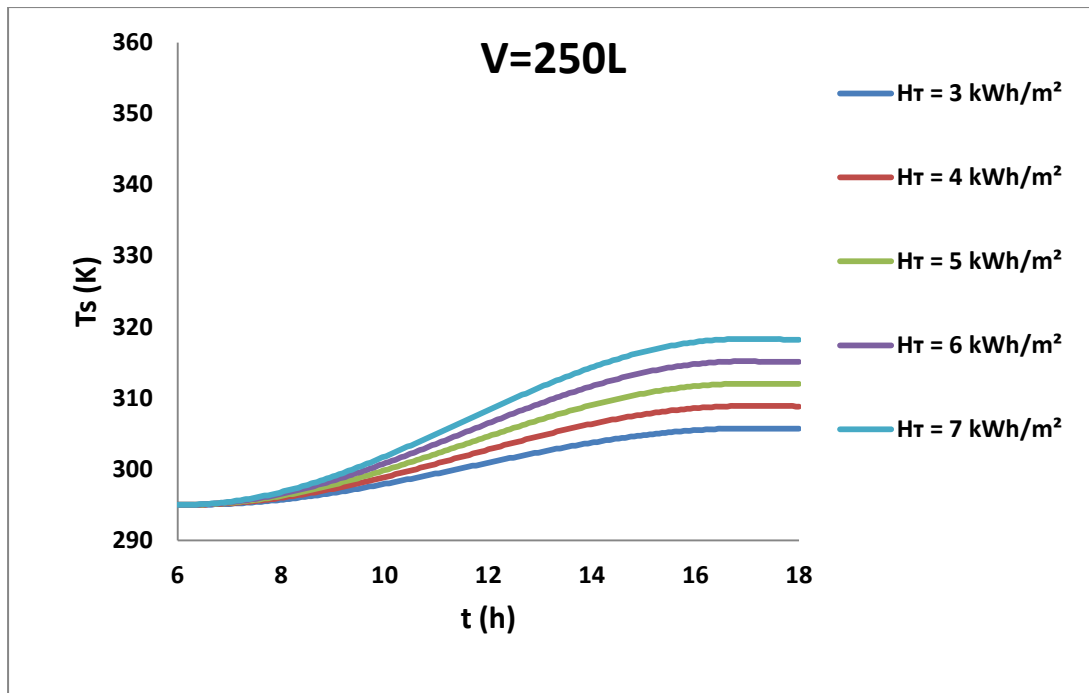
Όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή αποθήκευσης τόσο μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ισχύος λαμβάνουμε. Ακόμα παρατηρείται παράταση του μηδενισμού της ηλεκτρικής ισχύος κατά μία περίπου ώρα (από 17:00 σε 18:00) από την περίπτωση της δεξαμενής των 50 L σε αυτήν των 250 L.



Διάγραμμα 5.86: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=50 L)



Διάγραμμα 5.87: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=150 L)

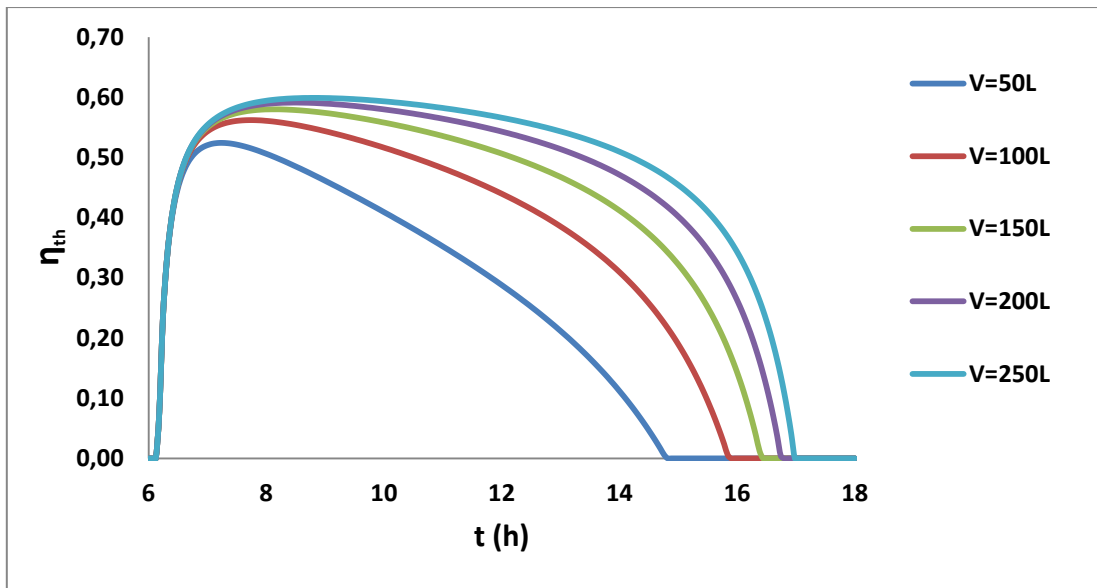


Διάγραμμα 5.88: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της μέρας για διάφορες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας (V=250 L)

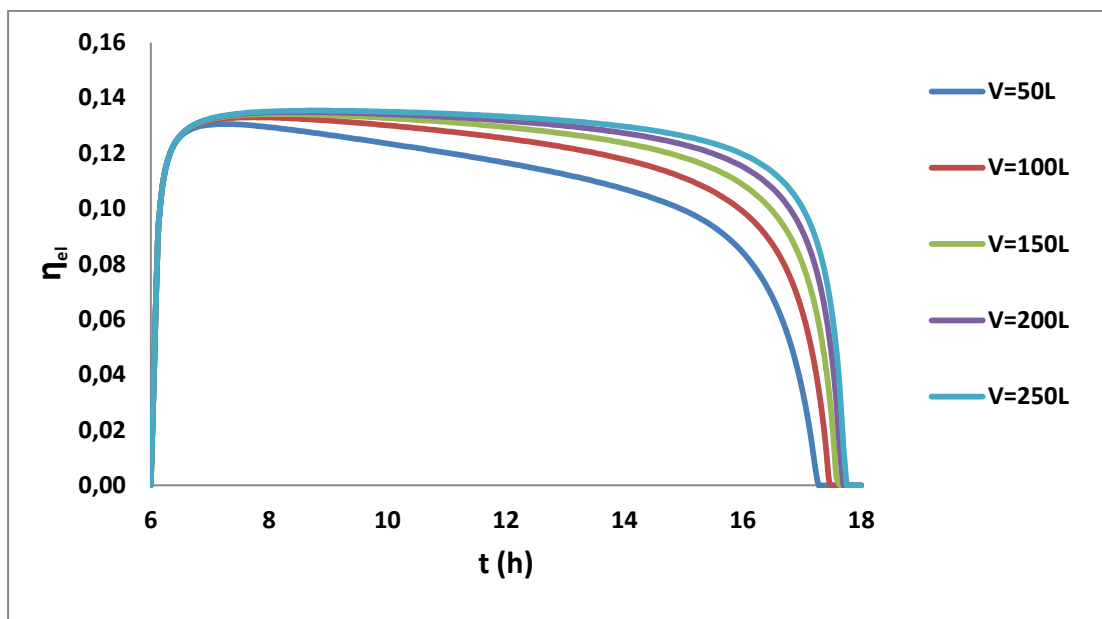
Από τα διαγράμματα 5.86 έως 5.88 παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή τόσο μικρότερη είναι η τελική θερμοκρασία που αποκτά το ρευστό. Επίσης η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην τελική θερμοκρασία του ρευστού είναι μικρότερη όσο μεγαλώνει το μέγεθος της δεξαμενής.

Για την περίπτωση της χρήσης νανοϋλικού

Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν την επίδραση του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης σε διάφορα μεγέθη όπως ο θερμικός και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, η ωφέλιμη θερμότητα που παράγεται, η ηλεκτρική ισχύς και η θερμοκρασία του ρευστού της δεξαμενής κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα αναφέρονται σε ηλιακή ακτινοβολία $H_T=5\text{kWh/m}^2$ και περιεκτικότητα νανοϋλικού σε νανοσωματίδια $\phi=2\%$.

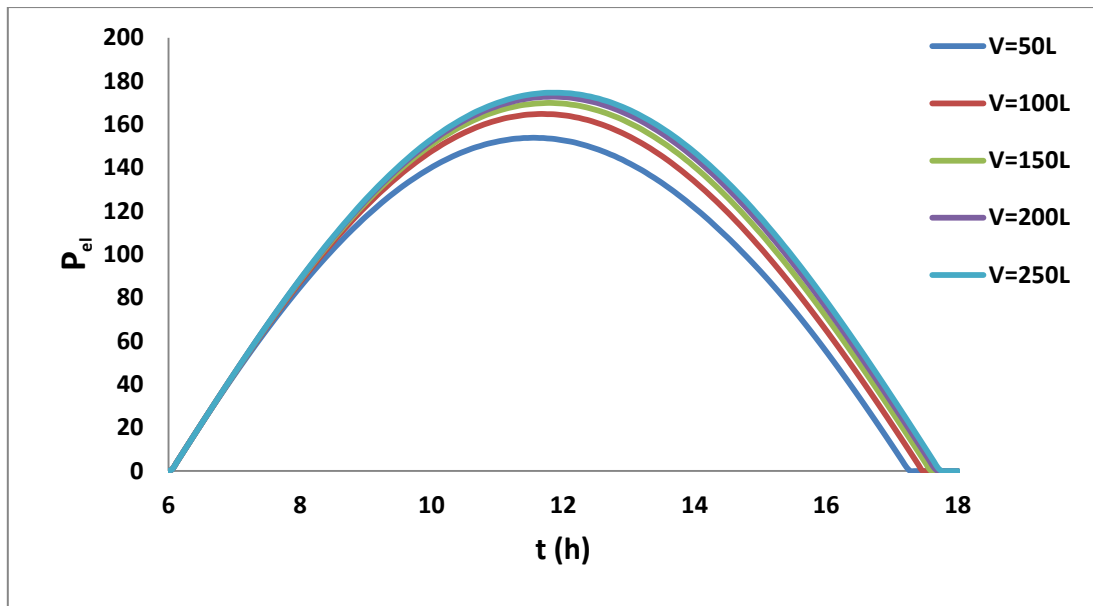


Διάγραμμα 5.89: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης, κατά τη διάρκεια μιας μέρας, συναρτήσει του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης

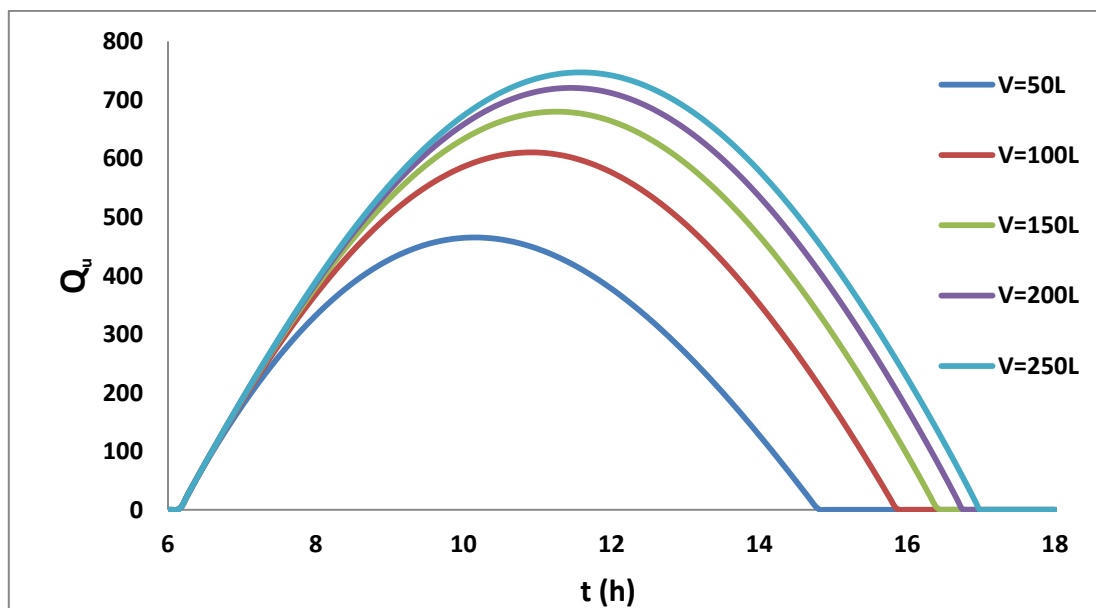


Διάγραμμα 5.90: Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης, κατά τη διάρκεια μιας μέρας, συναρτήσει του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης

Και στα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε μειούμενη αύξηση των βαθμών απόδοσης για κάθε 50 L αύξησης της δεξαμενής αποθήκευσης. Στην περίπτωση του θερμικού η διαφορά αυτή ξεκινά να σχηματίζεται στις 7:00 ενώ του ηλεκτρικού στις 8:00. Επίσης και στους δύο βαθμούς απόδοσης παρατηρείται παράταση του μηδενισμού τους, του θερμικού από τις 15:00 στις 17:00 και του ηλεκτρικού από τις 17:30 στις 18:00.



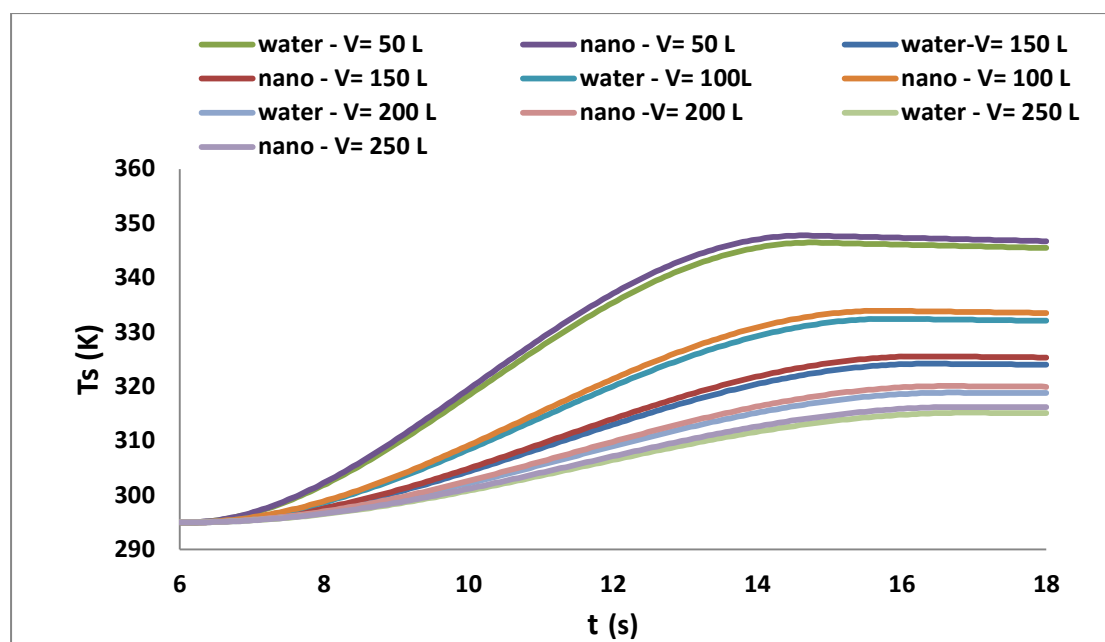
Διάγραμμα 5.91: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος, κατά τη διάρκεια μιας μέρας, συναρτήσει του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης



Διάγραμμα 5.92: Μεταβολή της ωφέλιμης θερμότητας, κατά τη διάρκεια μιας μέρας, συναρτήσει του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης

Παρατηρούμε αύξηση του ποσού της ωφέλιμης θερμότητας καθώς και της ηλεκτρικής ισχύος. Ενώ για την δεξαμενή των 50 L η ωφέλιμη θερμότητα φτάνει τα 464.8W και η ηλεκτρική ισχύς τα 153.6W οι αντίστοιχες τιμές για την δεξαμενή των 250 L είναι 747.2W και 174.7W.

Και για την περίπτωση νερού και νανοϋλικού



Διάγραμμα 5.93: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού της δεξαμενής, κατά τη διάρκεια μιας μέρας, συναρτήσει του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης

Στο διάγραμμα 5.93 παρατηρούμε πως όσο μεγαλώνει ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης τόσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία στην οποία φτάνει το ρευστό ωστόσο η παρουσία νανοσωματιδίων σε κάθε περίπτωση ανεβάζει λίγο την θερμοκρασία λόγω της μεγαλύτερης αγωγιμότητας του νανοϋλικού.

6

Συμπεράσματα

Σε αυτή τη μελέτη εξετάζεται ένα θερμοφωτοβολταϊκό που λειτουργεί με νερό και νανοϋλικό (Water + Cu). Ένα λεπτομερές θερμικό μοντέλο για τον συλλέκτη αναπτύσσεται στο EES και αξιολογείται με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Το νανοϋλικό έχει βρεθεί ότι οδηγεί σε υψηλότερη θερμική απόδοση σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Η σύγκριση πραγματοποιείται για συγκέντρωση νανοϋλικού ίση με 2%. Η ανάλυση απόδοσης απέδειξε υψηλή θερμική και ηλεκτρική ενίσχυση με χρήση νανοϋλικού.

Ο εξεταζόμενος συλλέκτης είναι ένας υβριδικός φωτοβολταϊκός. Στον συλλέκτη αυτό υπάρχει γυάλινο κάλυμμα, φωτοβολταϊκά κύτταρα, πλάκα απορρόφησης, σωλήνες εργασίας και μόνωση. Στην παρούσα μελέτη διερευνώνται υγρά εργαζόμενα ρευστά και στο συλλέκτη υπάρχουν συνολικά 10 σωλήνες. Τα βασικότερα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη που εξετάστηκε έχουν παρουσιασθεί νωρίτερα (Πίνακας 4.1). Η υβριδική φωτοβολταϊκή μονάδα εξετάζεται επίσης με δεξαμενή αποθήκευσης.

Στην μελέτη που έγινε εξετάστηκε παραμετρικά η συμπεριφορά του θερμικού, του ηλεκτρικού, του συνολικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για θερμοκρασία εισόδου του ρευστού από 300 K έως 360 K. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

- Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (G_T)
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (T_{am})
- Η ταχύτητα του ανέμου (U_{wind})
- Η παροχή του ρευστού (m)
- Ο συντελεστής εκπομπής της πλάκας (ϵ_p)
- Η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη (T_{in})

Αποδείχθηκε ότι θετική επίδραση στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης έχουν η αύξηση της: 1) έντασης της ακτινοβολίας 2) θερμοκρασίας του περιβάλλοντος 3) παροχής του ρευστού καθώς και η μείωση : 1) της ταχύτητας του ανέμου 2) της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη 3) του συντελεστή εκπομπής της πλάκας.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με μείωση: 1) της έντασης της ηλιακή ακτινοβολίας 2) της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος 3) της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη και με αύξηση: 1) της ταχύτητας του ανέμου 2) της παροχής του ρευστού 3) του συντελεστή εκπομπής της πλάκας.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης λόγω των υψηλότερων τιμών που λαμβάνει συγκριτικά με τον ηλεκτρικό έχει μεγαλύτερη επίδραση στον συνολικό βαθμό απόδοσης και για αυτό το λόγο ο συνολικός έχει ίδια αντίδραση με τον θερμικό στην μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων.

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης επηρεάζεται θετικά από την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και αρνητικά από την ταχύτητα του ανέμου ειδικά για μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού για όλες τις θερμοκρασίες εισόδου που εξετάστηκαν. Για θερμοκρασία εισόδου του ρευστού έως 315 K αρνητική επίδραση στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης έχουν: 1) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και 2) η παροχή του ρευστού και θετική έχουν 1) η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού και 2) ο συντελεστής εκπομπής της πλάκας. Από την θερμοκρασία όμως αυτή και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού η επίδραση των τεσσάρων αυτών αποκτά αντίθετο πρόσημο.

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποτυπώνονται στους δύο παρακάτω πίνακες όπου με (+) συμβολίζεται η όμοια μεταβολή παραμέτρου και βαθμού απόδοσης και με (-) η αντίθετη μεταβολή.

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ | | |
|--------------|-----------------|------------|-----------|
| | ΘΕΡΜΙΚΟΣ | ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ | ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ |
| G_T | + | - | + |
| T_{am} | + | - | + |
| U_{wind} | - | + | - |
| ϵ_p | - | + | - |
| T_{in} | - | - | - |
| m | + | + | + |

Πίνακας 6.1: Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στον θερμικό, τον ηλεκτρικό και συνολικό βαθμό απόδοσης

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ | |
|--------------|---------------------------------|------|
| | <315 | >315 |
| | ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ | |
| G_T | + | + |
| T_{am} | - | + |
| U_{wind} | - | - |
| ϵ_p | + | - |
| T_{in} | + | - |
| m | - | + |

Πίνακας 6.2: Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης

Στην ετήσια απόδοση του συλλέκτη που ενσωματώνεται με δεξαμενή αποθήκευσης, ο όγκος δεξαμενής αποθήκευσης των 150 L βρέθηκε να είναι η πλέον κατάλληλη επιλογή. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι ο υψηλότερος όγκος δεξαμενής αποθήκευσης οδηγεί σε υψηλότερες θερμικές και ηλεκτρικές επιδόσεις, αλλά η θερμική απόδοση δίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας. Με τη δεξαμενή αποθήκευσης των 150 L, η ωφέλιμη θερμότητα παράγεται κοντά στα 315 K, ένα ικανοποιητικό επίπεδο θερμοκρασίας για τη θέρμανση χώρων και για χρήσεις ζεστού νερού.

Για την δεξαμενή αποθήκευσης των 150 L, η μέση θερμική ενίσχυση βρίσκεται στο 4.55%, ενώ η ηλεκτρική υπολογίζεται σε 1.45%. Ειδικότερα, η μέση θερμική απόδοση φθάνει στο 40.25% με τη χρήση νανοϋλικού σε σύγκριση με το 38.53% σε περίπτωση νερού και η ηλεκτρική απόδοση αυξάνεται από 11.52% σε 11.69%.

Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τη χρήση νανοϋλικών σε υβριδικά φωτοβολταϊκά, ειδικά σε εφαρμογές με υψηλή θερμική ζήτηση, επειδή η θερμική ενίσχυση είναι προφανώς υψηλότερη από την ηλεκτρική. Επιπλέον, η χρήση νανοϋλικών σε υβριδικά φωτοβολταϊκά είναι περισσότερο απαραίτητη σε περιπτώσεις όπου το κόστος της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό και η αυξημένη αποτελεσματικότητα σε περιπτώσεις νανοϋλικών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό οικονομικό κέρδος.