

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ :

**«ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΥ
ΑΕΡΑ»**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ:
ΚΑΠΟΤΗ ΖΩΗ
Α.Μ 2582**

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ :

**Καθ. Δρ. ΣΩΚΡΑΤΗΣ ΚΑΠΛΑΝΗΣ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ Η.Μ.Ε**



-ΠΑΤΡΑ 2002-

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	3421
----------------------	------

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 _____

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες
- 1.2 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ

- 2.1 Γενικά περί της κατασκευής και των εφαρμογών των ηλιακών συλλεκτών θερμού αέρα
- 2.2. Στοιχεία Μετάδοσης Θερμότητας στην περίπτωση Επίπεδων Ηλιακών Συλλεκτών: Υγρού ή Αέρα.
- 2.3 Στοιχεία Μεταφοράς Θερμότητας για Συλλέκτη Αέρα. Υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς $h_{c,pt}$, $h_{c,fg}$ και $h_{c,fb}$.
 - 2.3.1 Περίπτωση στρωτής ροής
 - 2.3.2 Περίπτωση τυρβώδους ροής
- 2.4 Διαφανής Μόνωση (Transparent Insulation)
 - 2.4.1 Γενικά στοιχεία και περιγραφή διαφανών μονωτικών υλικών
 - 2.4.2 Επιμέρους στοιχεία μελέτης συλλέκτη αέρα με διαφανή μόνωση
- 2.5 Συντελεστής ικανότητας του συλλέκτη, F'
- 2.6 Συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη και συντελεστής ροής
- 2.7 Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης
 - 2.7.1 Μέση θερμοκρασία ρευστού και μέση θερμοκρασία απορροφητή
- 2.8 Ενεργός θερμοχωρητικότητα ενός συλλέκτη
 - 2.8.1 Γενικά
 - 2.8.2 Προσδιορισμός της θερμοχωρητικότητας
- 2.9 Ενέργεια απολαβής επίπεδου ηλιακού συλλέκτη αέρα
- 2.10 Απόδοση συλλεκτών
- 2.11 Σχόλια – Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΑ

- 3.1 Γενικά
- 3.2 Συλλέκτης αέρα με ροή μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας και γυάλινου καλύμματος
- 3.3 Ηλιακός συλλέκτης αέρα με ροή κάτω από την επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Πτυχιακή αυτή Εργασία, η οποία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας κατά τη διάρκεια του εκπαιδευτικού έτους 2001 – 2002, ασχολείται με τη μελέτη δύο τύπων **ηλιακών συλλεκτών θερμού αέρα**.

Στον πρώτο τύπο ηλιακού συλλέκτη θερμού αέρα, έχουμε ροή μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και του γυάλινου καλύμματος, ενώ στο δεύτερο τύπο έχουμε ροή κάτω από την επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια.

Για τη μελέτη αυτών των δύο τύπων ηλιακών συλλεκτών αέρα έχουν χρησιμοποιηθεί μεθοδολογίες από διάφορους μελετητές, στηριζόμενες στο ενεργειακό ισοδύναμο.

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία προτείνεται μια μέθοδος υπολογισμού, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και στους δύο τύπους ηλιακών συλλεκτών και στηρίζεται στο ηλεκτρικό ισοδύναμο.

Στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί αυτή η μελέτη σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών οροφής και όψεως, των οποίων η λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή των ηλιακών συλλεκτών θερμού αέρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Δρ. Σωκράτη Καπλάνη και τον εργαστηριακό συνεργάτη Αχιλλέα Κωστούλα για την βοήθεια, την υποστήριξη και τις υποδείξεις τους για την άρτια ανάπτυξη και συγγραφή της πτυχιακής μου εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χρήσιμη θερμική. Ειδικά στους **επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες** καμία οπτική συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων δε γίνεται και η ηλιακή ενέργεια άμεση, έμμεση και ανακλώμενη απορροφάται κατ' ευθείαν και μετατρέπεται σε θερμότητα στην απορροφητική επιφάνεια.

Ειδικότερα, το μεγαλύτερο ποσοστό από την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στον συλλέκτη απορροφάται από την απορροφητική επιφάνεια, η οποία συμπεριφέρεται σαν " μέλαν " σώμα στην ηλιακή ακτινοβολία.

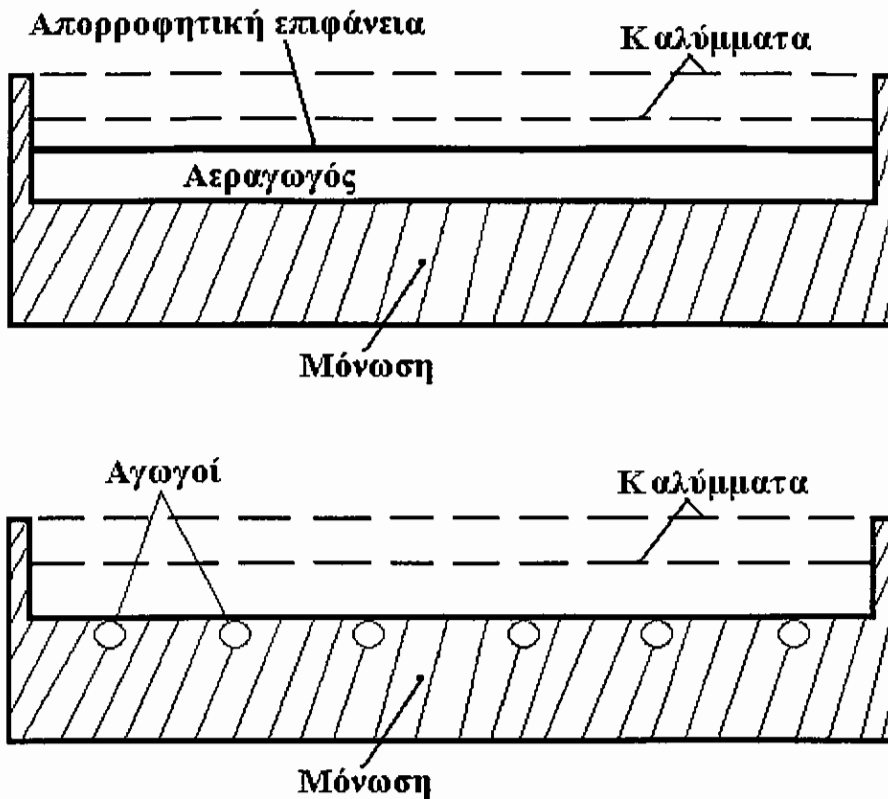
Ένα μέρος από την ενέργεια που απορροφάται, μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό, ενώ το υπόλοιπο χάνεται στο περιβάλλον.

Η θερμότητα, που απάγεται από το ρευστό, είναι το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του συλλέκτη και ή αποθηκεύεται, ή τροφοδοτείται απευθείας το φορτίο.

Σύμφωνα με τον ανωτέρω ορισμό, πέρα από τους γνωστούς τύπους των ηλιακών συλλεκτών και οι παθητικοί ηλιακοί τοίχοι ή οροφές μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούν ειδικές περιπτώσεις επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Το διαφανές κάλυμμα που μπορεί να αποτελείται από ένα, δύο ή και περισσότερες διαφανείς πλάκες από γυαλί ή πλαστικό.
- Την απορροφητική επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ενέργεια και είναι μια ειδικά επεξεργασμένη μεταλλική επιφάνεια ή βαμμένη με ειδική βαφή.
- Τους σωλήνες ή τους αεραγωγούς, που είναι σε επαφή με την απορροφητική πλάκα, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ρευστό που απάγει τη θερμική ενέργεια από την απορροφητική πλάκα.
- Την μόνωση στην πίσω και στις πλάγιες πλευρές του συλλέκτη.
- Το περίβλημα που συνήθως είναι μεταλλικό ή πλαστικό, ενοποιεί την κατασκευή και προστατεύει το συλλέκτη από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.1: Σχηματικό διάγραμμα συλλέκτη αέρα και συλλέκτη υγρού.

Ανάλογα με το ρευστό που απάγει την θερμότητα, διακρίνουμε δύο ειδών συλλέκτες:

Συλλέκτες αερίου, στους οποίους το ρευστό που απάγει τη θερμότητα είναι συνήθως αέρας, αλλά μπορεί να είναι και οποιοδήποτε άλλο αέριο.

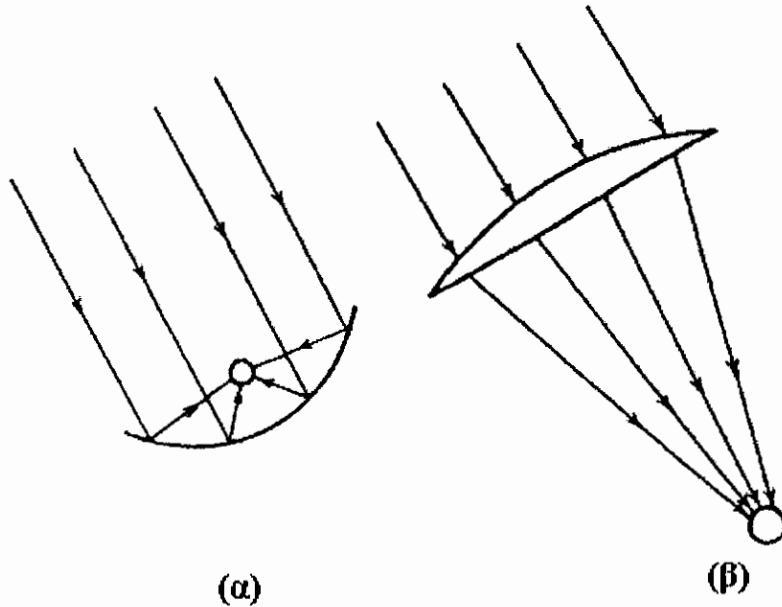
Συλλέκτες υγρού, στους οποίους το ρευστό είναι συνήθως νερό με διάφορα πρόσθετα, αλλά μπορεί να είναι και λάδι ή άλλα υγρά.

1.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες δεν μπορούμε να πετύχουμε θερμοκρασίες πάνω από 150°C (η συνήθης περιοχή λειτουργίας είναι $40 - 100^{\circ}\text{C}$). Αυτό οφείλεται αφ' ενός στη σχετικά χαμηλή ένταση ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη, αφ' ετέρου στο αυξημένο ποσοστό απωλειών προς το περιβάλλον εξαιτίας των μεγάλων επιφανειών.

Η απαίτηση ποσών θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες μας αναγκάζει να στραφούμε προς τους **συγκεντρωτικούς συλλέκτες**. Οι **συγκεντρωτικοί συλλέκτες** είναι συσκευές που συγκεντρώνουν με οπτικά μέσα την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια την απορροφούν και τη μετατρέπουν σε χρήσιμη θερμική. Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, αντί της απορροφητικής επιφάνειας που διαθέτει ο επίπεδος συλλέκτης έχουμε:

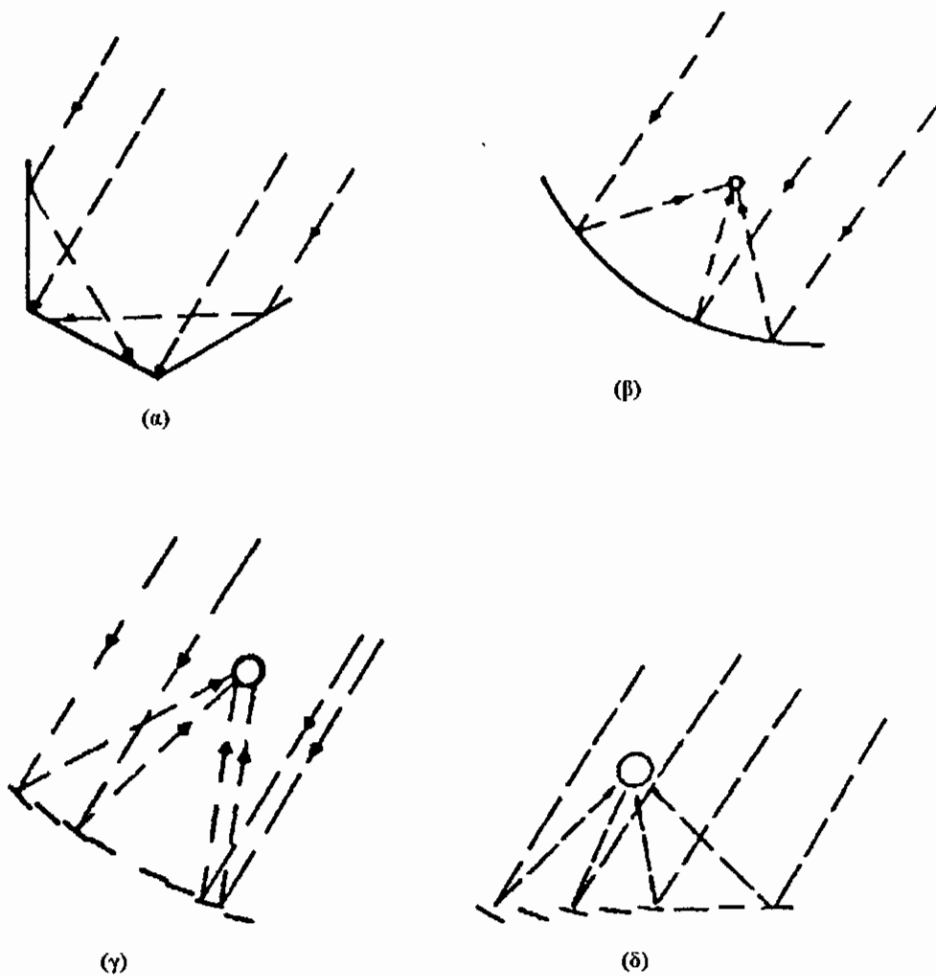
- Το οπτικό σύστημα ή συγκεντρωτήρα, που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, τη συγκεντρώνει και την οδηγεί στον δέκτη.
- Τον δέκτη που δέχεται και απορροφά την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και αποτελείται από την καλύπτουσα διαφανή πλάκα, την απορροφητική επιφάνεια και τη μόνωση.



Σχήμα 1.2: Συγκεντρωτήρας καθρέφτης (α) και συγκεντρωτήρας φακός (β).

Σύμφωνα με τον ανωτέρω ορισμό, μπορεί να έχουμε πληθώρα από διαφορετικούς τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών, ο καθένας από τους οποίους απαιτεί τη δική του μαθηματική ανάλυση.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες διακρίνονται σε πολλές κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση του συγκεντρωτήρα και του δέκτη.



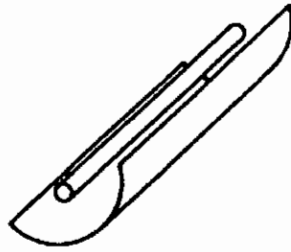
Σχήμα 1.3: Συγκεντρωτήρας επίπεδος (α), παραβολικός (β), που αποτελείται από συνδυασμό πολλών επίπεδων κατόπτρων κινούμενων ή ακίνητων (γ), (δ).

Έτσι ο συγκεντρωτήρας μπορεί να είναι:

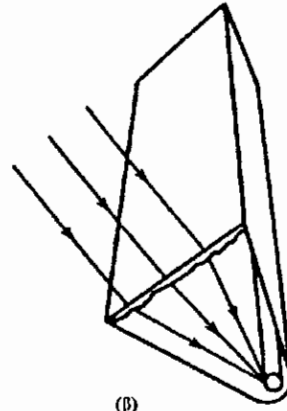
- καθρέφτης και να ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία
- φακός και να την διαθλά
- επίπεδος
- παραβολικός
- να αποτελείται από μια σειρά κινούμενων (ανάλογα με την πορεία του ήλιου) επιπέδων, που να συγκεντρώνουν σε ορισμένο σημείο την ηλιακή ακτινοβολία
- να αποτελείται από σειρές ακίνητων επιπέδων που μπορούν να συγκεντρώσουν την μεσημβρινή ηλιακή ακτινοβολία του θερινού ή του χειμερινού ηλιοστασίου ενός τόπου σε ένα σημείο.

Μια άλλη διάκριση στηρίζεται στο είδος της επιφάνειας του συγκεντρωτήρα που μπορεί να είναι:

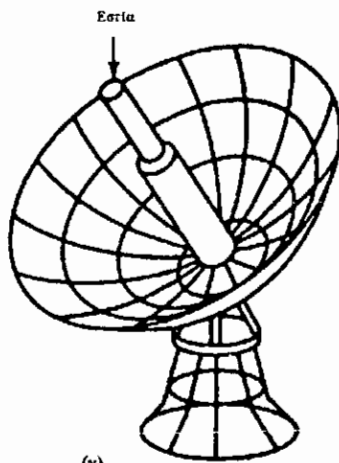
- ευθυογενής καμπύλη επιφάνεια, οπότε και ο δέκτης είναι γραμμή δηλαδή επιφάνεια δύο, μικρών σχετικά, διαστάσεων
- καμπυλογενής, οπότε και ο δέκτης είναι σημείο δηλαδή στην πράξη, μικρή σχετικά επιφάνεια τριών διαστάσεων.



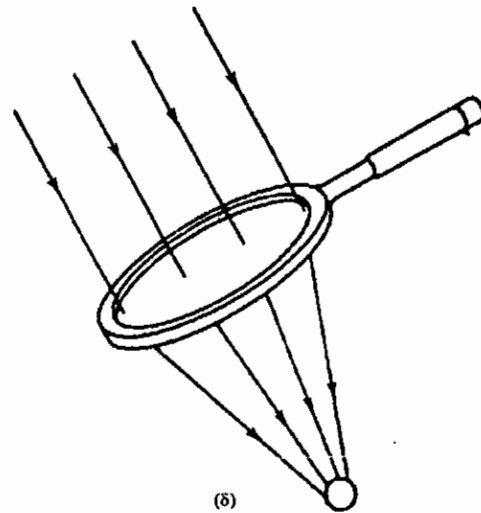
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 1.4: Συγκεντρωτήρας με ευθυογενής καμπύλη επιφάνεια (α), (β) και με καμπυλογενής καμπύλη επιφάνεια (γ), (δ).

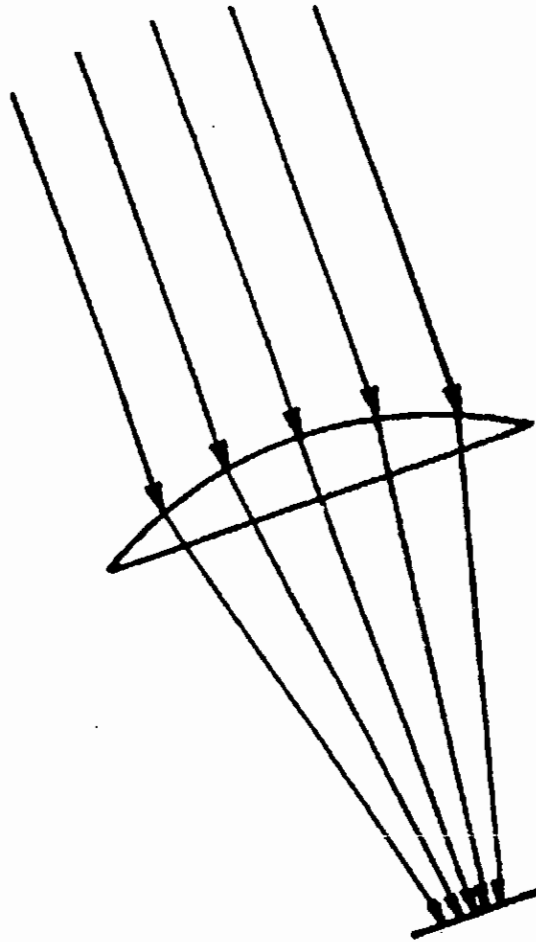
Ο δέκτης μπορεί να είναι:

- σημείο
- γραμμή
- επιφάνεια επίπεδη, κυρτή ή κοίλη

Τέλος οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες διακρίνονται σε:

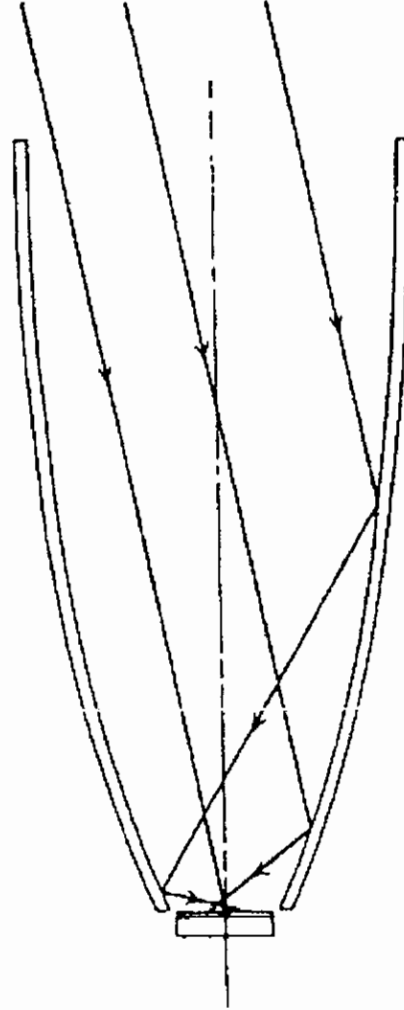
- εικονικούς και
- ανεικονικούς

Εικονικοί λέγονται οι συλλέκτες που σχηματίζουν το είδωλο του ήλιου στο δέκτη, έστω και παραμορφωμένο.



Σχήμα 1.5: Εικονικός συγκεντρωτικός συλλέκτης.

Ανεικονικοί λέγονται οι συλλέκτες, στους οποίους η άμεση ηλιακή ακτινοβολία διαχέεται και απορροφάται τυχαία από το δέκτη, έτσι ώστε κανένα είδωλο του ήλιου δεν μπορεί να σχηματιστεί έστω και παραμορφωμένο.



Σχήμα 1.6: Ανεικονικός συγκεντρωτικός συλλέκτης.

Τα πλεονεκτήματα των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι:

- Συλλογή θερμότητας σε υψηλότερες θερμοκρασίες που είναι χρήσιμη σε ορισμένες, κυρίως βιομηχανικές, χρήσεις.
- Μείωση, κατά κανόνα, των θερμικών απωλειών της απορροφητικής επιφάνειας, λόγω της δραστηκής μείωσής της σε έκταση.

Πέρα όμως από τα πλεονεκτήματα οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες έχουν και πολλά μειονεκτήματα:

- Είναι, κατά κανόνα, ακριβότεροι από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες της ίδιας θερμικής απόδοσης.
- Παρουσιάζουν προβλήματα κατασκευής, εγκατάστασης και συντήρησης.

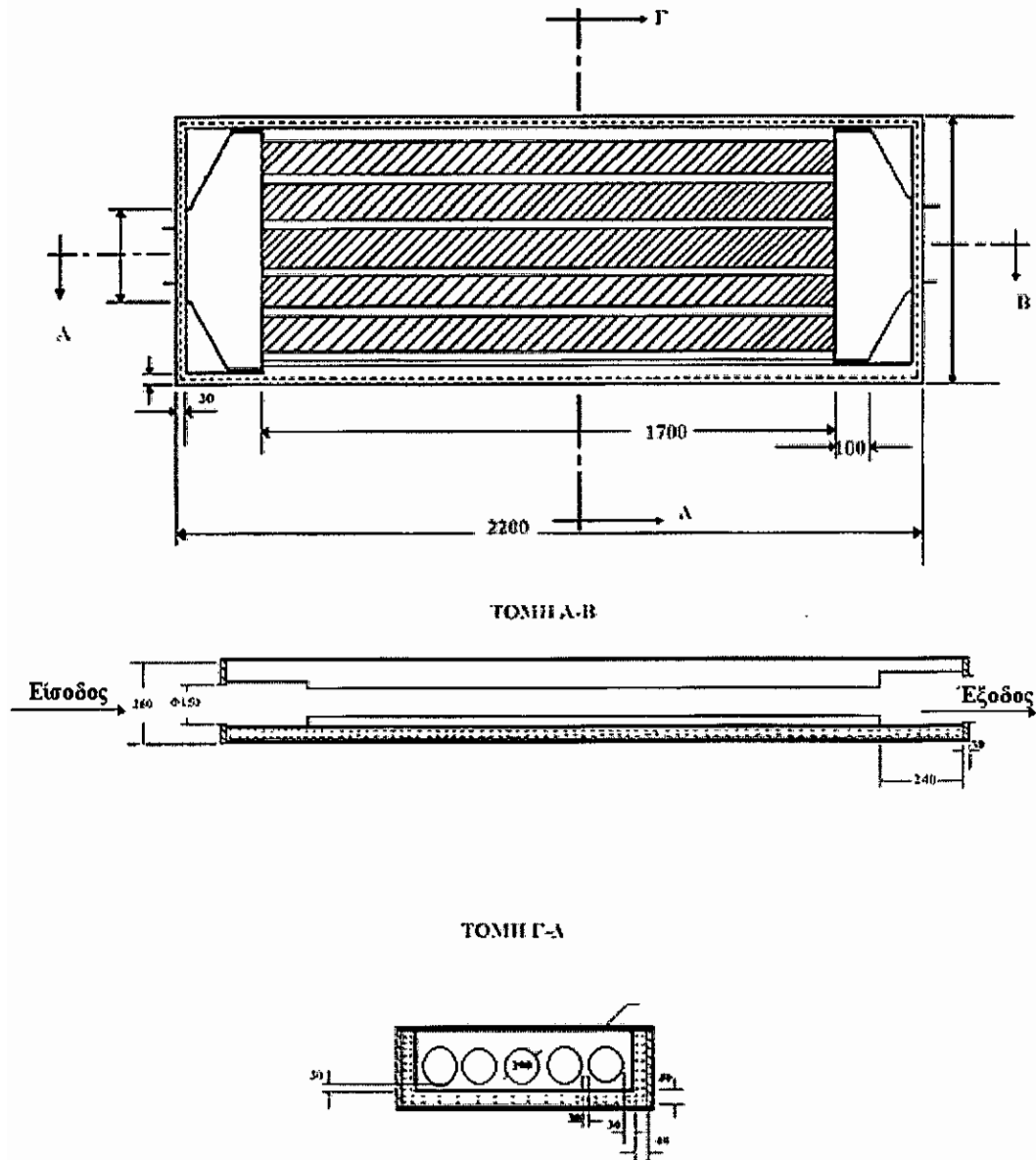
2. ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ

2.1 Γενικά περί της κατασκευής και των εφαρμογών των ηλιακών συλλεκτών θερμού αέρα

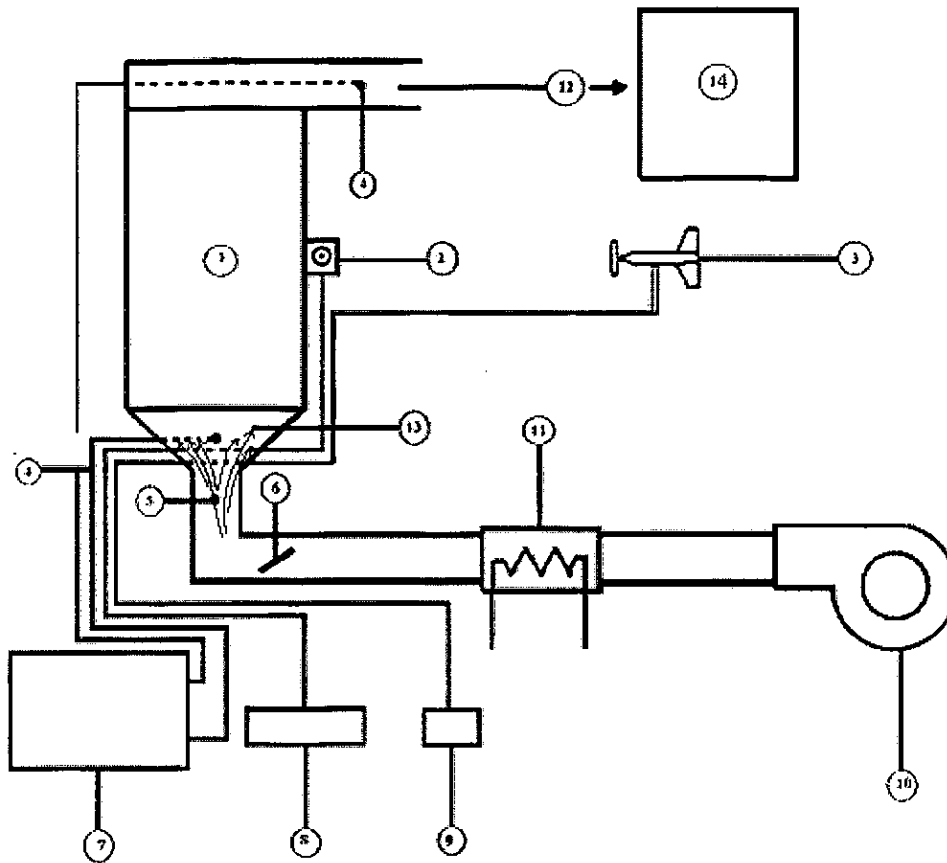
Είναι προφανές ότι το ρευστό το διερχόμενο και θερμαινόμενο μέσα από ένα ηλιακό συλλέκτη μπορεί να είναι και αέρας.

Στην περίπτωση αυτή ομιλούμε για ηλιακούς συλλέκτες θερμού αέρα οι οποίοι διαφέρουν κατά τι των ηλιακών συλλεκτών υγρού, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για σωλήνες ή σωληνοειδή σχήματα, αλλά ολόκληρη η τομή, π.χ. μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και του γυάλινου καλύμματος, αποτελεί τον αγωγό διέλευσης του προς θέρμανση αέρα. Βέβαια, υπάρχει και στην περίπτωση αυτή των ηλιακών συλλεκτών αέρα, ποικιλία σχεδίων όπως δείχνουν τα σχήματα 2.1-2.5 που ακολουθούν.

ΣΩΛΗΝΩΤΟΣ ΕΥΑΛΕΚΤΗΣ ΑΕΡΑ ΜΟΝΟΠΛΑΕΥΡΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΓΥΛΙΝΟ ΚΑΛΥΜΜΑ

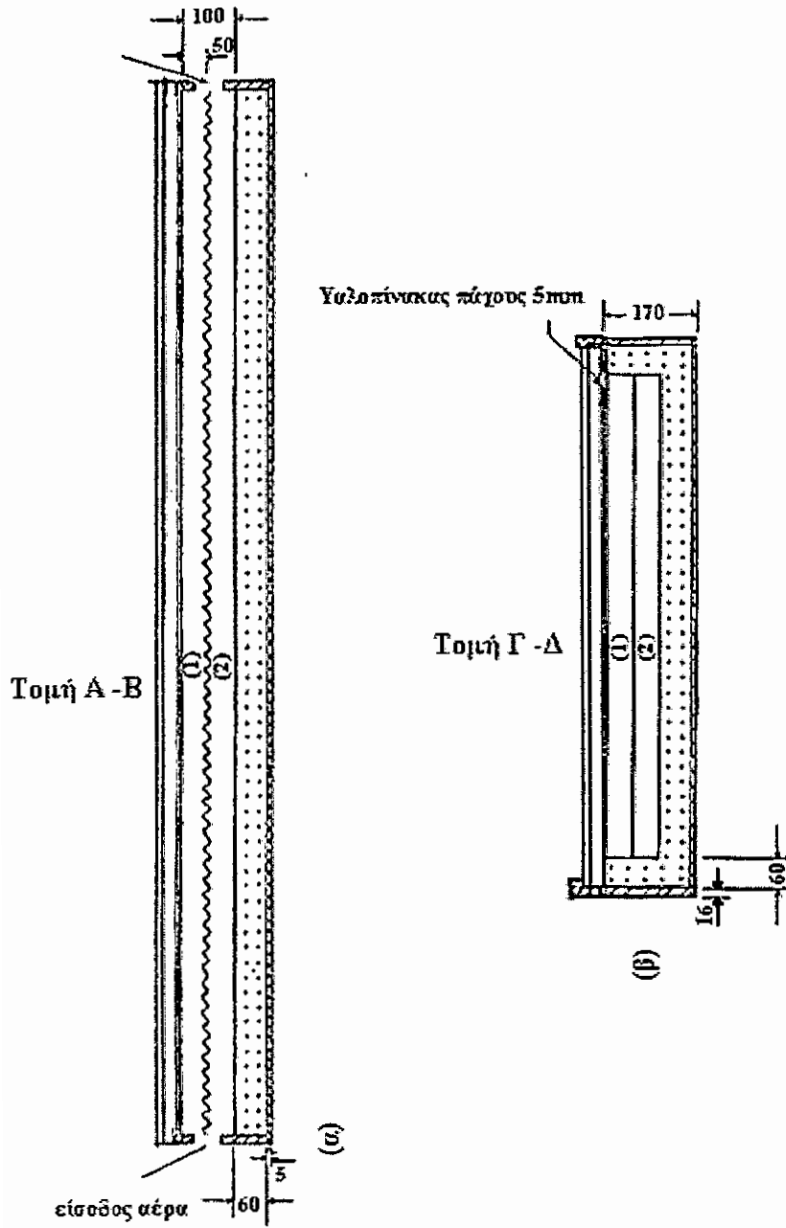


Σχήμα 2.1: Σωληνωτός συλλέκτης αέρα, εύκολης συναρμολόγησης κατά τμήματα, κατασκευασμένος στο εργαστήριο των Η.Μ.Ε του Τ.Ε.Ι Πάτρας για χρήση σε εφαρμογές ξήρανσης γεωργικών προϊόντων, όπως δείχνει το σχήμα 2.2.



- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Ηλιακός Συλλέκτης Αέρα | 8. Ολοκληρωτής |
| 2. Πυρανόμετρο | 9. Καταγραφικό |
| 3. Αισθητήρες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ανέμου | 10. Φυσητήρας |
| 4. Θερμοζεύγος | 11. Θερμική Αντίσταση |
| 5. Αισθητήρες μαζικής παροχής | 12. Έξοδος Αέρα προς ξηραντήριο |
| 6. Διάφραγμα | 13. Διαχύτης |
| 7. Καταγραφικό | 14. Ξηραντήριο |

Σχήμα 2.2: Σχηματική περιγραφή πειραματικής διάταξης με ηλιακούς συλλέκτες θερμού αέρα που χρησιμεύει για ξήρανση προϊόντων. Πειράματα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο των Η.Μ.Ε του Τ.Ε.Ι Πάτρας.

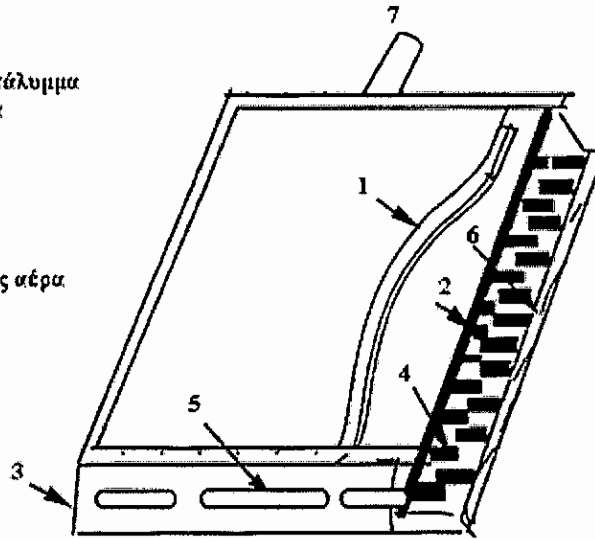


Σχήμα 2.3: Τομές δύο τύπων ηλιακών συλλεκτών που κατασκευάσθηκαν στο εργαστήριο Η.Μ.Ε του Τ.Ε.Ι Πάτρας.

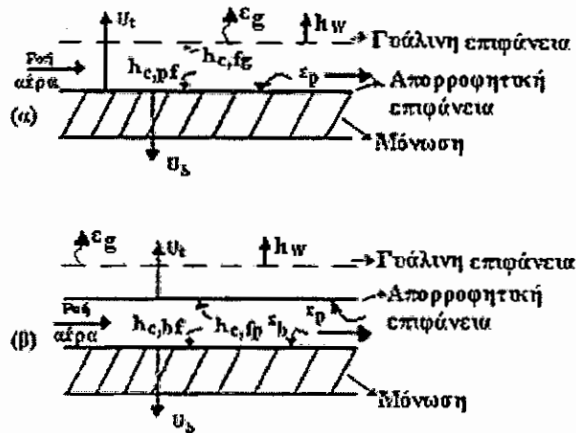
α. Συλλέκτης με διπλή γυάλινη προστατευτική επιφάνεια και κυματοειδή-προσεριστή απορροφητική επιφάνεια. Η ροή του αέρα δύναται να γίνει με κατάλληλη χρήση ενός κλείστρου από την επιφάνεια (1) ή (2).

β. Τομή του ίδιου τύπου συλλέκτη όπου στην περίπτωση αυτή η απορροφητική επιφάνεια είναι επίπεδη.

1. Γυάλινο προστατευτικό κάλυμμα
2. Απορροφητική επιφάνεια
3. Πλαίσιο συλλέκτη
4. Πτερύγια για κατάλληλη διαμόρφωση της ροής
5. Είσοδος του αέρα
6. Μόνωση
7. Έξοδος του θερμανθέντος αέρα

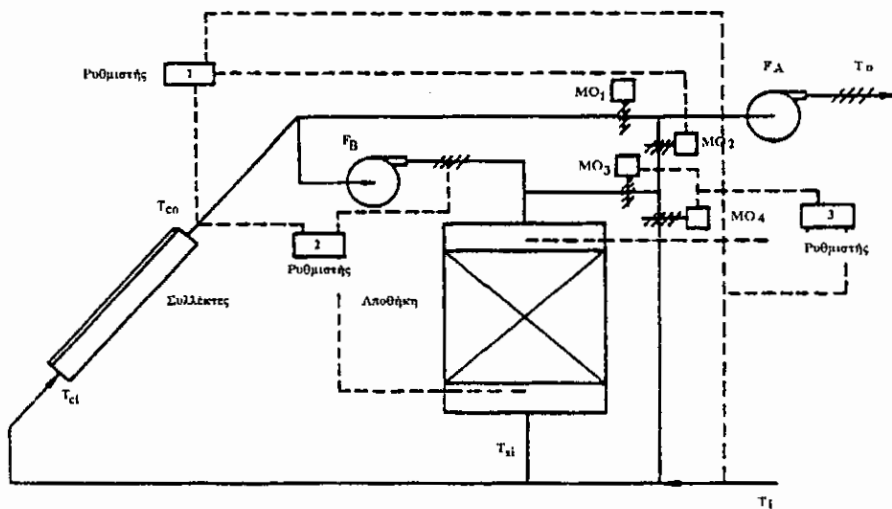


Σχήμα 2.4: Συλλέκτης θερμού αέρα με παρεμβολή εμποδίων, κατά τη διέλευσή του από το χώρο μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας (2) και της μόνωσης (6), ώστε η ροή να είναι τυρβώδης.

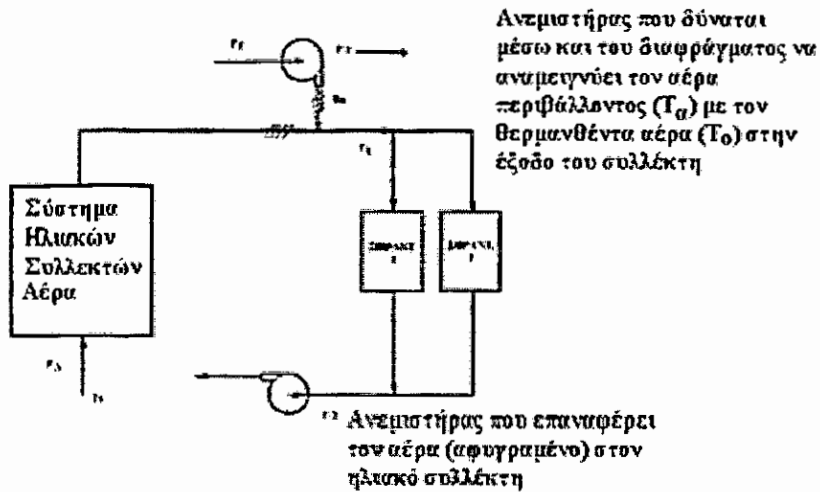


Σχήμα 2.5: Τομές διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών αέρα.

Συστήματα ηλιακής ενέργειας με επίπεδους συλλέκτες για παραγωγή ζεστού αέρα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με στόχο την ξήρανση προϊόντων, θέρμανση χώρων κ.λ.π, βλ. σχήματα 2.6-2.7.



Σχήμα 2.6: Σύστημα θέρμανσης αέρα με ηλιακή ενέργεια και με θερμική αποθήκη. Θα χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων ή σε άλλη εφαρμογή. Η αποθήκη σε κατοικίες ευρίσκεται σε χώρους υπογείων και περιλαμβάνει υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας διαμορφωμένα συνήθως σε σφαιρικό σχήμα ή είναι πέτρες-κροκάλες θαλάσσης, καθώς αφήνουν αρκετό διάκενο διέλευσης του ρευστού.



Σχήμα 2.7: Σύστημα ηλιακών συλλεκτών αέρα σε σύνδεση με μονάδα ξήρανσης που αποτελείται από δύο ξηραντήρια, εν παραλλήλω.

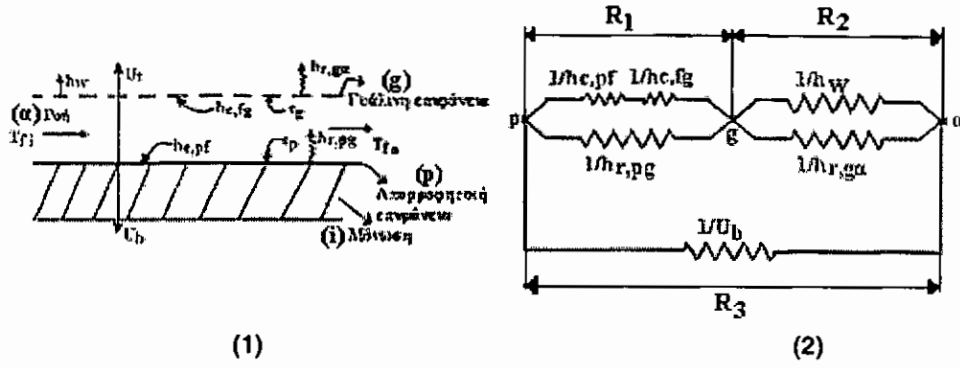
Η ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς των συλλεκτών θερμού αέρα είναι όμοια με αυτή των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούν υγρό ως θερμαινόμενο ρευστό.

Λόγω της σπουδαιότητας, του εύρους και της ποικιλίας των εφαρμογών στον αστικό τομέα: αντιμετώπιση προβλημάτων θέρμανσης κτιρίων, στον αγροτικό τομέα: ξήρανση προϊόντων κ.α, θα επιχειρήσουμε μια εις βάθος θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας τους και της εκτίμησης της απόδοσής τους.

2.2 Στοιχεία Μετάδοσης Θερμότητας στην περίπτωση Επίπεδων Ηλιακών Συλλεκτών: Υγρού ή Αέρα.

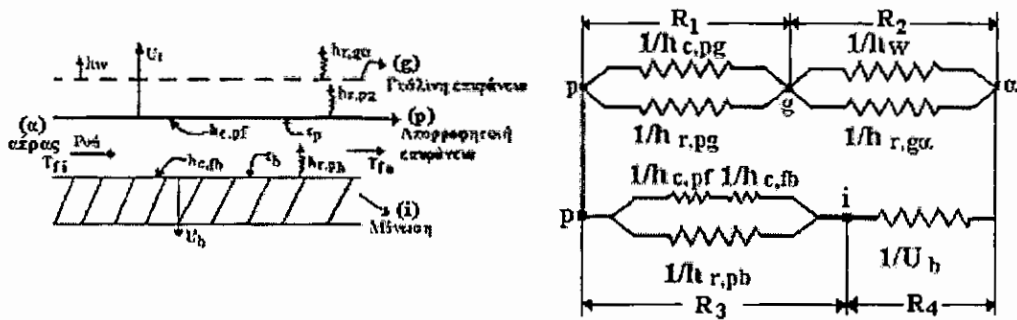
Το ηλεκτρικό ισοδύναμο της μετάδοσης θερμότητας σε ένα επίπεδο ηλιακό συλλέκτη υγρού ή αέρα δίδεται στα σχήματα 2.8.α και 2.8.β.

Το σχήμα 2.8.α (1) παρουσιάζει την τομή ενός ηλιακού συλλέκτη αέρα. Σύμφωνα με τη σχεδίαση το ρεύμα αέρα διέρχεται μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και του διαφανούς καλύμματος. Ο τύπος αυτός του συλλέκτη θα καλείται ηλιακός συλλέκτης αέρα, τύπου (α). Το σχήμα 2.8.α (2) δίνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο του συλλέκτη αυτού.



Σχήμα 2.8α: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού συλλέκτη υγρού ή αέρα (τύπος 2.5α).

Το σχήμα 2.8.β (1) παρουσιάζει την τομή ενός ηλιακού συλλέκτη αέρα. Σύμφωνα με τη σχεδίαση το ρεύμα αέρα διέρχεται μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και της μόνωσης. Ο τύπος αυτός του συλλέκτη θα καλείται ηλιακός συλλέκτης αέρα, τύπου (β). Το σχήμα 2.8.β (2) δίνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο του συλλέκτη αυτού.



Σχήμα 2.8β: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού συλλέκτη υγρού ή αέρα (τύπος 2.5β).

- Ηλιακός συλλέκτης αέρα τύπου (α)

Ειδικότερα ορίζουμε τις αντιστάσεις:

R_1 : Θερμική αντίσταση μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και του γυάλινου καλύμματος θερμοκρασίας T_g .

R_2 : Θερμική αντίσταση μεταξύ του καλύμματος και του περιβάλλοντος.

R_3 : Θερμική αντίσταση, λόγω μεταφοράς, μεταξύ οπίσθιας επιφάνειας του συλλέκτη και του αέρα του περιβάλλοντος.

Οι επιμέρους ηλεκτρικές αντιστάσεις που αντιστοιχούν στις θερμικές αντιστάσεις λόγω αγωγής, μεταφοράς και ακτινοβολίας, για τον α τύπο συλλέκτη αέρα, δίδονται από τις ακόλουθες παραστάσεις:

$$R_1 = \left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pg} \right)^{-1} : \text{Θερμική αντίσταση από την απορροφητική} \quad (2.1\alpha)$$

επιφάνεια, **p**, προς το γυάλινο κάλυμμα, **g** .

Απόδειξη

$$\left. \begin{array}{l} R_{1,1} = \frac{1}{h_{c,pf}} + \frac{1}{h_{c,fg}} \\ R_{1,2} = \frac{1}{h_{r,pg}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{1,1}} + \frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{1/h_{c,pf} + 1/h_{c,fg}} + \frac{1}{1/h_{r,pg}} = \frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pg}$$

$$\Rightarrow R_1 = \left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pg} \right)^{-1}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} : \text{Θερμική αντίσταση από το γυάλινο κάλυμμα, } \mathbf{g}, \quad (2.1\beta)$$

προς το περιβάλλον, **α**.

Απόδειξη

$$\left. \begin{array}{l} R_{2,1} = \frac{1}{h_w} \\ R_{2,2} = \frac{1}{h_{r,g\alpha}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{2,1}} + \frac{1}{R_{2,2}} = \frac{1}{1/h_w} + \frac{1}{1/h_{r,g\alpha}} \Rightarrow R_2 = \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}}$$

$$R_3 = \frac{1}{U_b} : \text{Θερμική αντίσταση από το πίσω μέρος του συλλέκτη, } \mathbf{p}, \quad (2.1\gamma)$$

προς στο περιβάλλον, **α**.

Για τον τύπο **β** συλλέκτη αέρα οι επιμέρους ηλεκτρικές αντιστάσεις δίδονται από τις ακόλουθες παραστάσεις:

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,pg} + h_{r,pg}} : \text{Θερμική αντίσταση από την απορροφητική} \quad (2.1\delta)$$

επιφάνεια, **p**, προς το γυάλινο κάλυμμα, **g** .

Απόδειξη

$$\left. \begin{array}{l} R_{1,1} = \frac{1}{h_{c,pg}} \\ R_{1,2} = \frac{1}{h_{r,pg}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{1,1}} + \frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{1/h_{c,pg}} + \frac{1}{1/h_{r,pg}} = h_{c,pg} + h_{r,pg} \Rightarrow R_1 = \frac{1}{h_{c,pg} + h_{r,pg}}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} : \text{Θερμική αντίσταση από το γυάλινο κάλυμμα, } g, \quad (2.1\epsilon)$$

προς το περιβάλλον, α.

Απόδειξη

$$\left. \begin{array}{l} R_{2,1} = \frac{1}{h_w} \\ R_{2,2} = \frac{1}{h_{r,g\alpha}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{2,1}} + \frac{1}{R_{2,2}} = \frac{1}{1/h_w} + \frac{1}{1/h_{r,g\alpha}} = h_w + h_{r,g\alpha} \Rightarrow R_2 = \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fb}^{-1}} + h_{r,pb} : \text{Θερμική αντίσταση από την απορροφητική} \quad (2.1\sigma\tau)$$

επιφάνεια, p, προς την μόνωση, i.

Απόδειξη

$$\left. \begin{array}{l} R_{3,1} = \frac{1}{h_{c,pf}} + \frac{1}{h_{c,fb}} \\ R_{3,2} = \frac{1}{h_{r,pb}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{3,1}} + \frac{1}{R_{3,2}} = \frac{1}{1/h_{c,pf} + 1/h_{c,fb}} + \frac{1}{1/h_{r,pb}} = \frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fb}^{-1}} + h_{r,pb} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_3 = \left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fb}^{-1}} + h_{r,pb} \right)^{-1}$$

$$R_4 = \frac{1}{U_b} : \text{Θερμική αντίσταση από το πίσω μέρος του συλλέκτη, } p, \quad (2.1\zeta)$$

προς το περιβάλλον, α.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας προς το πίσω μέρος του συλλέκτη και το περιβάλλον δίδεται από τη σχέση:

$$U_b = \frac{1}{R_1} = \frac{k_\mu}{\ell_\mu} \quad (2.2)$$

όπου:

U_b : συντελεστής θερμικής διαπερατότητας της οπίσθιας επιφάνειας του συλλέκτη, λόγω αγωγής $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$.

k_{μ} : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης $\left[\frac{W}{mK} \right]$.

ℓ_{μ} : πάχος μόνωσης [m].

Στη συνέχεια, ορίζουμε τον **συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με εκπομπή** μεταξύ **p** και **g** ως εξής:

$$h_{r,pg} = \frac{\sigma \cdot (T_p + T_g) \cdot (T_p^2 + T_g^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \quad (2.3)$$

όπου:

T_p : θερμοκρασία απορροφητικής επιφάνειας, σε $^{\circ}K$

T_g : θερμοκρασία της γυάλινης επιφάνειας του συλλέκτη, σε $^{\circ}K$

σ : η σταθερά των Stefan και Boltzmann ίση με 5.669×10^{-8} , $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$

ϵ_p : ο συντελεστής εκπομπής της απορροφητικής επιφάνειας.

ϵ_g : ο συντελεστής εκπομπής του γυάλινου καλύμματος.

Ο **συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με εκπομπή** μεταξύ **g** και **a** ορίζεται ως εξής:

$$h_{r,g\alpha} = \epsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_g + T_{sky}) \cdot (T_g^2 + T_{sky}^2) \cdot \frac{(T_g - T_{sky})}{T_g - T_{\alpha}} \quad (2.4)$$

όπου:

T_{sky} : θερμοκρασία του ουρανού: $T_{sky} = 0.0552 \cdot (T_{\alpha})^{1.5}$, [K] (2.5)

T_{α} : θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε [K]

Ο **συντελεστής μεταφοράς θερμότητας** από την γυάλινη επιφάνεια **g**, του συλλέκτη προς το περιβάλλον, **a**, δίδεται από τη σχέση (Mac Adams):

$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot V_w \quad (2.6)$$

όπου:

V_w : ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια του συλλέκτη, [m/sec]

Η συνολική τελικά αντίσταση, R_t , της πρόσοψης του συλλέκτη, ήτοι μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας που "βλέπει" στον ήλιο και περιβάλλοντος, βάσει και του σχήματος 2.8.α για τον τύπο **a** συλλέκτη, δίδεται από τη σχέση:

$$R_t = \left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pg} \right)^{-1} + \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} \quad (2.7\alpha)$$

ενώ για τον τύπο β συλλέκτη, δίδεται από τη σχέση:

$$R_t = \frac{1}{h_{c,pg} + h_{r,pg}} + \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} \quad (2.7\beta)$$

Ισοδύναμα, ο συντελεστής απωλειών της πρόσοψης μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας και περιβάλλοντος, δίδεται από τη σχέση:

$$U_t = \left(\left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pg} \right)^{-1} + \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} \right)^{-1} \quad (2.8\alpha)$$

ενώ στην περίπτωση β τύπου συλλέκτη αέρα, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{c,pg} + h_{r,pg}} + \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} \right)^{-1} \quad (2.8\beta)$$

όπου:

U_t : συντελεστής απωλειών θερμότητας από την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη προς το περιβάλλον μέσω του γυάλινου καλύμματος $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

$h_{c,pf}$: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας, p , και του ρευστού, f , σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

$h_{c,fg}$: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού, f και της γυάλινης επιφάνειας, g , σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

$h_{c,pg}$: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας, p , και της γυάλινης επιφάνειας, g , σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

h_w : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της γυάλινης επιφάνειας, g και του περιβάλλοντος, α , σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

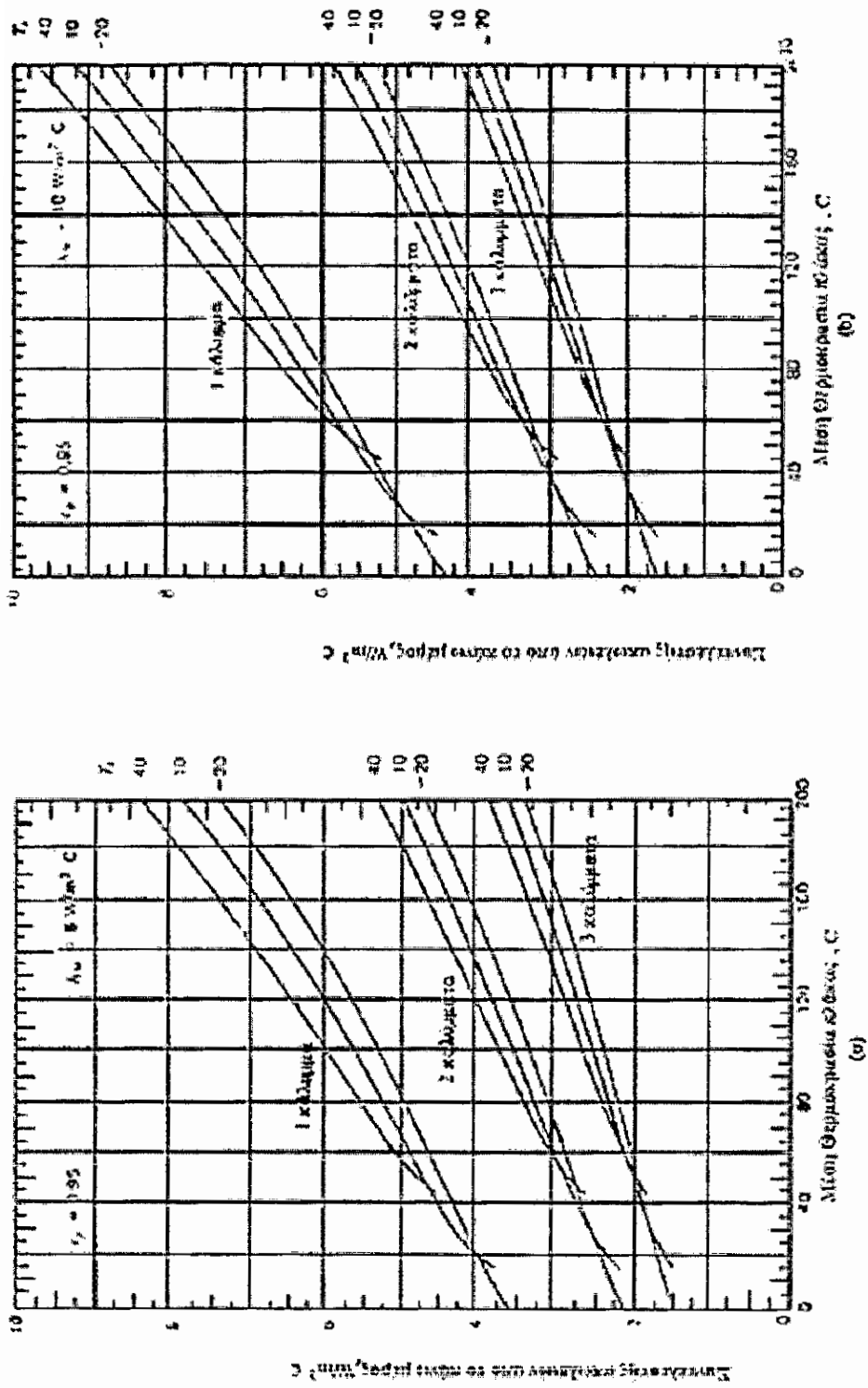
$h_{r,pg}$: συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με εκπομπή μεταξύ της μαύρης

απορροφητικής επιφάνειας, p , και της γυάλινης επιφάνειας, g , σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

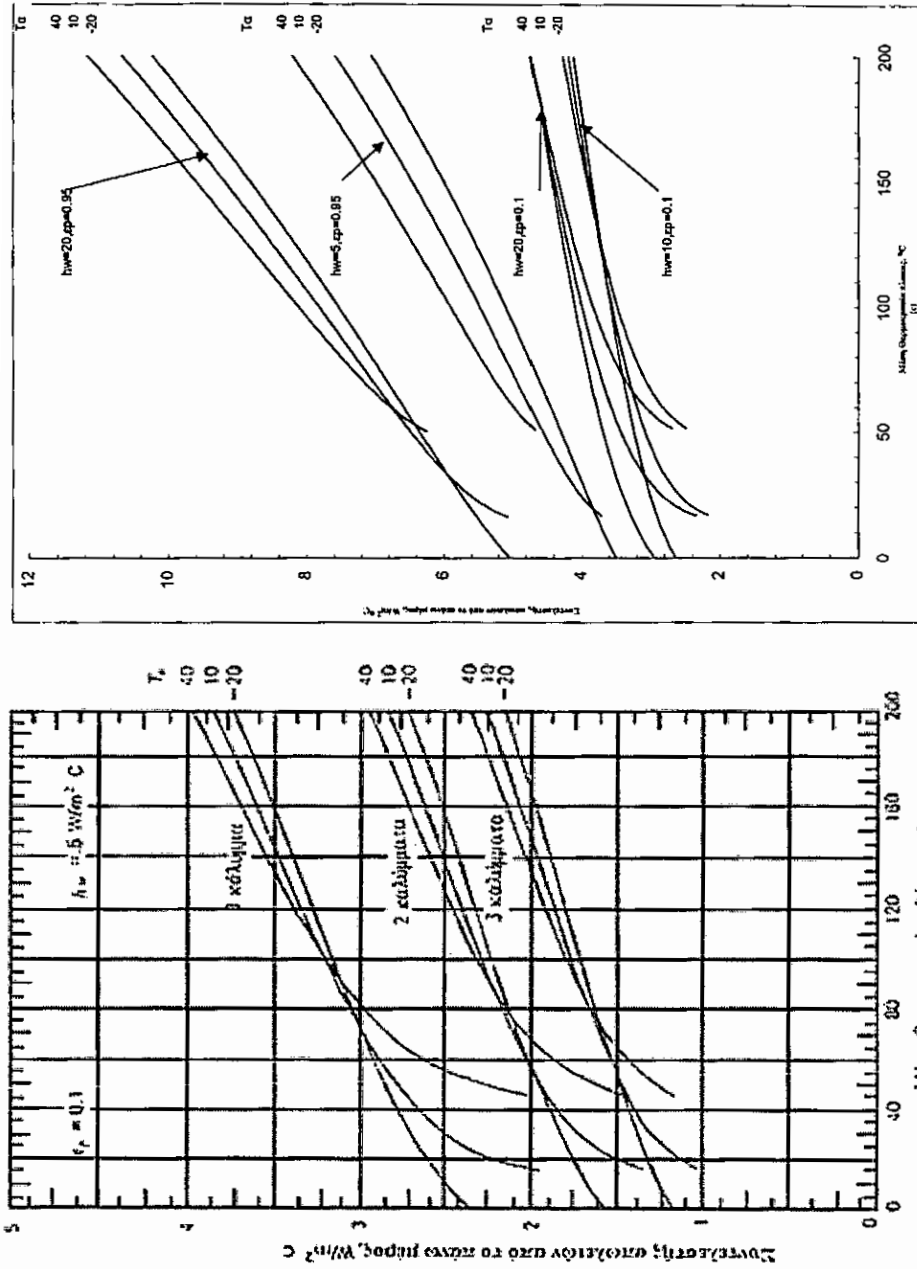
$h_{r,ga}$: συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με εκπομπή μεταξύ της γυάλινης

επιφάνειας, g , και του περιβάλλοντος, a , σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

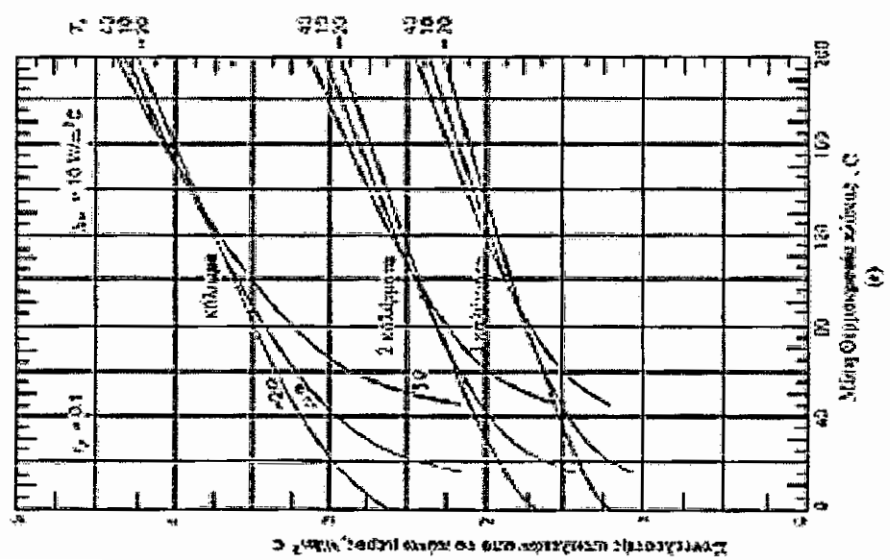
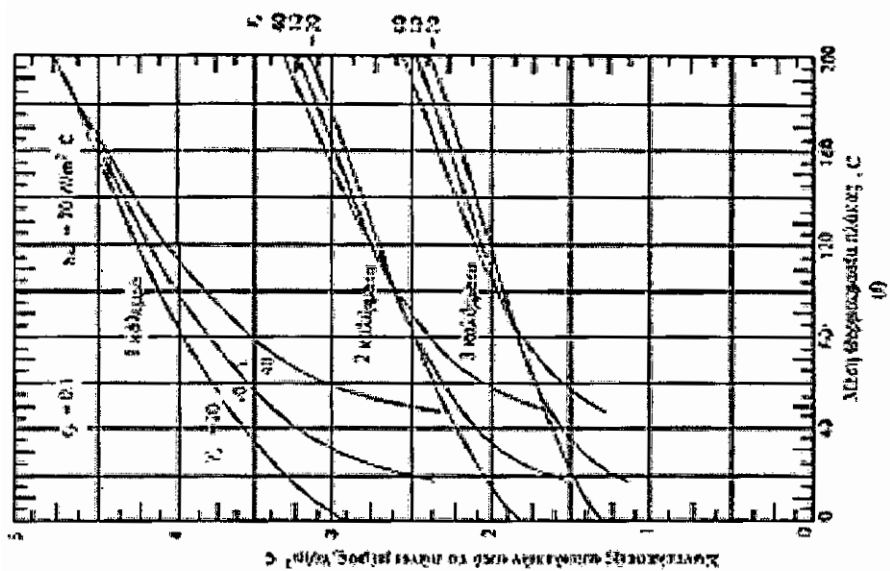
- Ο υπολογισμός του συντελεστή απωλειών, U_i από το πάνω μέρος του συλλέκτη προς το περιβάλλον, είναι γενικά μια δύσκολη μελέτη. Για να απλοποιηθούν αυτοί οι υπολογισμοί και γενικότερα οι υπολογισμοί της απόδοσης του συλλέκτη, δίδεται μια σειρά από διαγράμματα, βλ. σχήματα 2.9-2.11. Οι υπολογισμοί έγιναν με μια αριθμητική επαναληπτική μέθοδο που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Η.Μ.Ε του Τ.Ε.Ι Πατρών .



Σχήμα 2.9 : Συντελεστής θερμικών απωλειών από το πάχος μέγρο για κλίση 45°



Σχήμα 2.10: Συντελεστής θερμικών απωλειών από το πάνω μέρος για κλίση 45°



Σχήμα 2.11: Συντελεστής θερμοδύναμης από το πάνω μέρος του υδραγωγείου

Ωστόσο, για τους περισσότερους συλλέκτες, η εκτίμηση των θερμικών απωλειών από τα πλαϊνά τοιχώματα του συλλέκτη, είναι πολύπλοκη. Βέβαια, σε ένα καλά σχεδιασμένο συλλέκτη, οι απώλειες από την περιφέρεια του συλλέκτη μπορεί να μειωθούν δραστικά, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν αυτές με μεγάλη ακρίβεια.

• Οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον μέσω των πλευρικών άκρων του συλλέκτη και με την υπόθεση ότι το πάχος της μόνωσης είναι ίσο με αυτό της πίσω πλευράς του συλλέκτη, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$U_e = \frac{(UA)_e}{A_c} = \frac{\left(\frac{k_\mu}{\ell_\mu}\right) \cdot S \cdot d_c}{A_c} \quad (2.10)$$

όπου:

$(UA)_e$: είναι το γινόμενο του συντελεστή απωλειών των άκρων επί την περιφερειακή επιφάνεια του συλλέκτη.

ℓ_μ : το πάχος της πλαϊνής μόνωσης [m]

S : το μήκος της περιμέτρου του συλλέκτη [m]

d_c : το πάχος του συλλέκτη [m]

Τελικά, ο ολικός συντελεστής απωλειών, U_L είναι το άθροισμα των τριών επιμέρους συντελεστών απωλειών, δηλαδή του συντελεστή απωλειών από την εμπροσθεν επιφάνεια U_i , από την πίσω επιφάνεια, U_b , και από την περιφέρεια του συλλέκτη, U_e :

$$U_L = U_i + U_b + U_e \quad (2.11)$$

Στην περίπτωση του α τύπου συλλέκτη το U_L δίδεται από τη σχέση:

$$U_L = \left(\left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pq} \right)^{-1} + \frac{1}{h_w + h_{r,ga}} \right)^{-1} + U_b \quad (2.12\alpha)$$

ενώ για τον β τύπου συλλέκτη το U_L δίδεται από τη σχέση:

$$U_L = \left(\frac{1}{h_{c,pq} + h_{r,pq}} + \frac{1}{h_w + h_{r,ga}} \right)^{-1} + \left(\left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fb}^{-1}} + h_{r,pb} \right)^{-1} + \frac{1}{U_b} \right)^{-1} \quad (2.12\beta)$$

Συμπληρώνεται τέλος ότι οι θερμικές απώλειες από την πρόσοψη ενός συλλέκτη εξαρτώνται από:

- Τη μέση θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας, T_p .

- Τη θερμοκρασία του ουράνιου θόλου T_{sky} και τη θερμοκρασία του αέρα, του περιβάλλοντος, T_a .
- Τον αριθμό των καλυμμάτων του συλλέκτη, τη μεταξύ τους απόσταση, καθώς και την απόσταση από την απορροφητική επιφάνεια.
- Τη γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο, β .
- Την ταχύτητα του αέρα πάνω από το γυάλινο κάλυμμα, V_w .

Παρατήρηση:

Ωστόσο, για να υπολογισθεί το U_i π.χ. από τις σχέσεις (2.8α,β) πρέπει κατ' αρχήν να υπολογισθούν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας $h_{c,pt}$, $h_{c,fg}$ και $h_{c,fb}$. Τούτο το ζήτημα θα αναλυθεί στη συνέχεια.

2.3 Στοιχεία Μεταφοράς Θερμότητας για Συλλέκτη Αέρα.

Υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς $h_{c,pt}$, $h_{c,fg}$ και $h_{c,fb}$.

Ένα από τα βασικά στοιχεία που πρέπει να εξεταστούν σε έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη αέρα, με στόχο τον υπολογισμό της αποδιδόμενης θερμότητας, Q_u , μέσω του θερμαινόμενου αέρα, είναι η διαμόρφωση της ροής του αέρα μέσα στο συλλέκτη, βλ. σχήματα 2.5 α, β.

Η ροή του αέρα μπορεί να είναι στρωτή ή τυρβώδης. Αυτό καθορίζεται από τον αριθμό Reynolds (Re), καθώς η ροή είναι βεβιασμένη.

Για ροή του αέρα, μέσα στο συλλέκτη, μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας και καλύμματος ο αριθμός Re δίδεται από την σχέση:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L^*}{\mu} = \frac{\rho \cdot u \cdot D_h}{\mu} \quad (2.13)$$

όπου:

ρ : πυκνότητα του αέρα $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$, βλ. Πίνακες

u : ταχύτητα του αέρα $\left[\frac{m}{sec} \right]$

$D_h = 2 \times d$

Απόδειξη:

L^* το χαρακτηριστικό μήκος της τομής δια της οποίας διέρχεται ο θερμαινόμενος αέρας, που ορίζεται ως ακολούθως:

$L^* = 4 \times \text{Διατομή/Περιφέρεια ή αντικαθιστώντας}$

$$4W \cdot d / 2(W+d) \approx \frac{4Wd}{2W} \approx 2d$$

(αν $W/d \gg 1$ τότε το d παραλείπεται)

d : απόσταση μεταξύ των παραλλήλων πλακών (απορροφητικής και γυάλινης) σε [m]

μ : δυναμικό ιξώδες του αέρα $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{sec}} \right]$, βλ. Πίνακες.

Τιμές των ρ , μ υπολογίζονται για τη θερμοκρασία του κυρίως όγκου του ρευστού.

2.3.1 Περίπτωση στρωτής ροής

Ο αριθμός Nusselt (Nu) για στρωτή ροή μεταξύ επίπεδων παραλλήλων επιφανειών δίδεται από την σχέση:

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \quad (2.14)$$

Για τους υπολογισμούς απαιτείται η γνώση του αριθμού Prandtl (Pr) που δίδεται από την σχέση:

$$Pr = \frac{\mu_{\alpha} \cdot c_{p,\alpha}}{k_{\alpha}} \quad (2.15)$$

όπου:

$c_{p,\alpha}$: η ειδική θερμότητα του αέρα $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \right]$,

k_{α} : η θερμική αγωγιμότητα του αέρα $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \right]$,

Βέβαια ο αριθμός Pr είναι και πινακοποιημένος, και δεν απαιτείται ο υπολογισμός του βάσει της σχέσης (2.15).

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο παραλλήλων πλακών $h_{c,fg}$ και $h_{c,pf}$ θεωρούνται ίσοι ομοίως και οι συντελεστές $h_{c,pf}$ και $h_{c,fb}$, (βλ. σχήμα 2.5 α, β) και δίδονται από τη σχέση:

$$h_{c,pf} = h_{c,fg} = Nu \times k_{\alpha} / D_h \quad (2.16\alpha)$$

$$h_{c,pf} = h_{c,fb} = Nu \times k_{\alpha} / D_h \quad (2.16\beta)$$

• Περίπτωση στρωτής ροής για συλλέκτη αέρα τύπου β.

Στην περίπτωση κατά την οποία η ροή του αέρα γίνεται κάτω από την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη (βλέπε σχήμα 2.5β), ο αριθμός Re δίδεται από την σχέση:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D_h}{\mu} \quad (2.17)$$

όπου: $D_h=2 \times d$

d : απόσταση μεταξύ των παραλλήλων πλακών (απορροφητικής και γυάλινης)
σε [m]

Για στρωτή ροή και ανάλογα με την διαμόρφωση-σχήμα του αγωγού ο αριθμός Nu δίδεται από τον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

2.3.2 Περίπτωση τυρβώδους ροής

Για την περίπτωση τυρβώδους ροής του αέρα κάτω από την απορροφητική επιφάνεια, βλ. σχήμα 2.5.β, ο αριθμός Re δίδεται και πάλιν από την ίδια σχέση που δίδεται και στην στρωτή ροή, ήτοι ισχύει η σχέση (2.17)

Να επισημάνουμε ότι όταν ο αριθμός Re είναι μεγαλύτερος από την τιμή των 2000 η ροή είναι τυρβώδης.

Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμός Nu δίδεται από την σχέση:

$$Nu=0.0158 \cdot Re^{0.8} \quad (\text{τυρβώδης ροή όπου μόνο η μια επιφάνεια θερμαίνεται και η άλλη είναι μόνωση}) \quad (2.18)$$

$$Nu=0.0196 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \quad (\text{τυρβώδης ροή μεταξύ παραλλήλων επιφανειών όπου μόνο η μια θερμαίνεται}) \quad (2.19)$$

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας $h_{c,fg}$, $h_{c,pf}$ και $h_{c,pt}$, $h_{c,fb}$ θεωρούνται και πάλι ίσοι, και υπολογίζονται ομοίως από τις σχέσεις (2.16.α και 2.16.β).

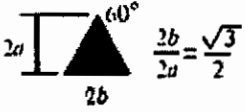
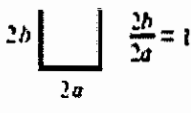

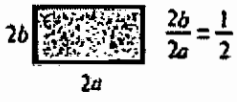

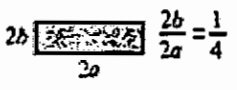
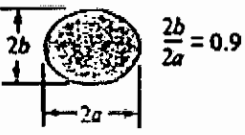
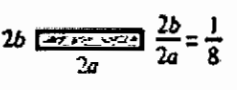
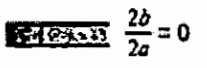

Σημείωση

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν δύο τύποι ηλιακών συλλεκτών αέρα, βλ. σχήματα 2.5.α και 2.5.β, ώστε να υπολογισθεί ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών U_L και ο συντελεστής ικανότητας του συλλέκτη F' .

Τελικά, θα εκτιμηθεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον συλλέκτη και το θερμικό κέρδος για τους δύο αυτούς τύπους συλλεκτών θερμού αέρα.

Στόχος είναι να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία του ενεργειακού προσδιορισμού λειτουργίας των διαφόρων τύπων συλλεκτών αέρα, ώστε να καταστεί ο αναγνώστης ικανός να υπολογίζει τα θερμικά κέρδη από τους συλλέκτες αυτούς αλλά και να προχωρεί σε κατάλληλους σχεδιασμούς μέσα από την διερεύνηση των σχέσεων τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε αναλυτικά στο Κεφ. 3.

Πίνακας 1: Τιμές του αριθμού Nu για διάφορες τομές σχήματος των αγωγών με την προϋπόθεση ότι η ροή είναι στρωτή.

Γωμετρία ($L/D_h > 100$)	Nu_{m1}	Nu_{m2}	Nu_T	$f Re$
 $\frac{2b}{2a} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	3.111	1.892	2.47	13.333
 $\frac{2b}{2a} = 1$	3.608	3.091	2.976	14.227
	4.002	3.862	3.34	15.054
 $\frac{2b}{2a} = \frac{1}{2}$	4.123	3.017	3.391	15.548
	4.364	4.364	3.657	16.000
 $\frac{2b}{2a} = \frac{1}{4}$	5.099	4.35	3.66	18.700
 $\frac{2b}{2a} = 0.9$	5.331	2.930	4.439	18.233
 $\frac{2b}{2a} = \frac{1}{8}$	6.490	2.904	5.597	20.585
 $\frac{2b}{2a} = 0$	8.235	8.235	7.541	24.000
 $\frac{b}{a} = 0$ Insulated	5.385	—	4.861	24.000

2.4 Διαφανής Μόνωση (Transparent Insulation)

2.4.1 Γενικά στοιχεία και περιγραφή διαφανών μονωτικών υλικών

Όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο 2.1 ένας “συμβατικός” επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται βασικά από

- ένα ή περισσότερα καλύμματα,
- την απορροφητική επιφάνεια και φυσικά από
- την μόνωση: παράπλευρη και οπίσθια,

Τα σχήματα 2.1, 2.3, 2.4 παρουσιάζουν αναλυτικά τα στοιχεία αυτά.

Οι ηλιακοί συλλέκτες ή γενικότερα τα συστήματα ηλιακών συλλεκτών χρησιμοποιούνται ευρέως σε ποικίλες καθημερινές εφαρμογές.

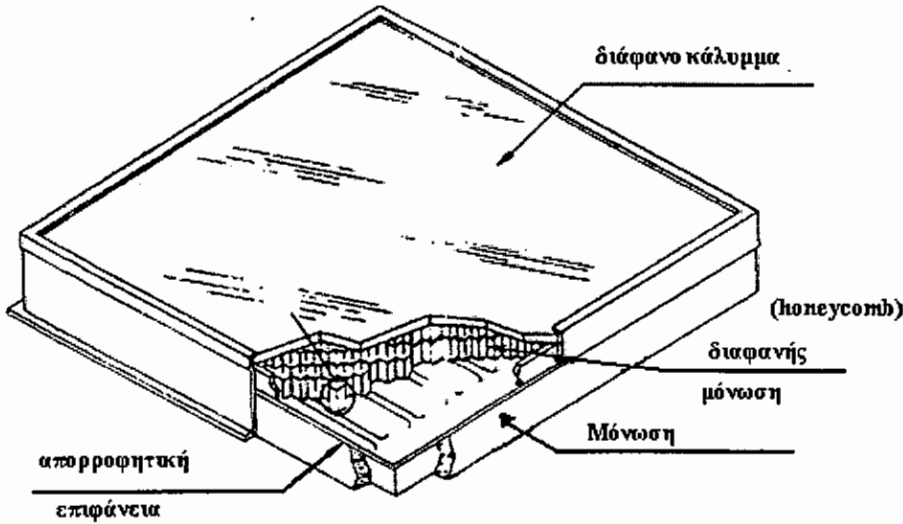
Η ανάγκη για την μείωση των απωλειών, και ειδικότερα από την εμπρόσθια επιφάνεια του συλλέκτη, οδήγησε τους ερευνητές στη μελέτη και αργότερα στην πρακτική εφαρμογή διαφόρων τύπων κυψελωτών κατασκευών (honeycombs) που ενεργούν ως διαφανής μόνωση, με συγκριτικά βελτιωμένη απόδοση έναντι των απλού τύπου.

Τα βασικά στοιχεία ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (απορροφητική επιφάνεια και τα γυάλινα καλύμματα), όπως είναι γνωστό, μειώνουν τις απώλειες προς το περιβάλλον. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει στο παρελθόν με σκοπό την βελτίωση της απορροφητικής επιφάνειας. Επιλεκτικές επιφάνειες έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να μειώσουν τις απώλειες της υπέρυθρης ακτινοβολίας χωρίς να χάνουν την ικανότητά τους να απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία.

Η εφαρμογή μονωτικών υλικών (διαφανούς μόνωσης), προσφέρει καλές προδιαγραφές στη βελτίωση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών για περιοχή θερμοκρασιών άνω των 80 °C.

Συμπερασματικά τονίζεται, ότι η χρήση των κυψελωτών (honeycomb) κατασκευών φαίνεται να είναι περισσότερο αποδοτική, καθώς μειώνεται η υπέρυθρη ακτινοβολία με ή / και χωρίς επιλεκτικές επιφάνειες απορρόφησης.

Αυτές οι κυψελωτές κατασκευές τοποθετούνται γενικά κάτω από το διαφανές κάλυμμα του συλλέκτη και σε κάποια απόσταση πάνω από τον απορροφητήρα, με σκοπό να περιορίζουν την μεταφορά θερμότητας από την ροή του ρευστού μέσα στο συλλέκτη.



Σχήμα 2.12: Ηλιακός συλλέκτης με παρεμβολή διαφανούς μόνωσης (honeycomb).

Η εύρεση πρακτικών τρόπων για την κατασκευή των κυψελών, ως διαφανούς μόνωσης, παραμένει ένα μόνιμο πρόβλημα για τους ερευνητές αυτού του αντικειμένου. Παρόλα αυτά όμως, δύο τύποι κυψελωτών κατασκευών είναι οι κυριότεροι και οι πιο εύχρηστοι. Ο τύπος

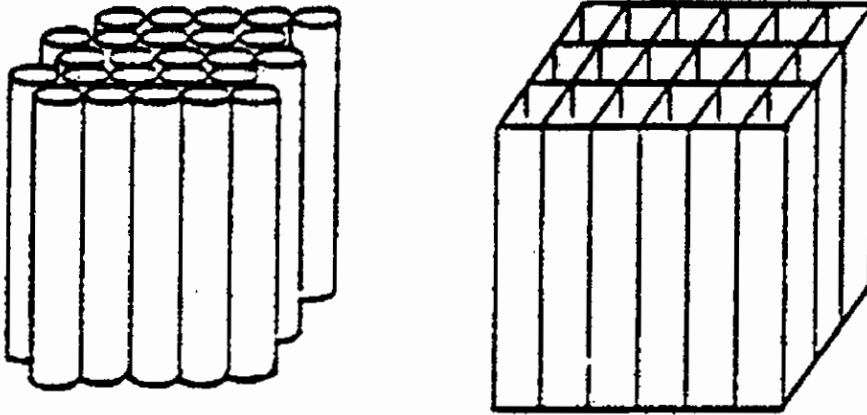
- α. με τετράγωνες κυψελίδες (μικρές ή μεγάλες), και
- β. με κυλινδρικές κυψελίδες (μικρές ή μεγάλες)

Οι πιθανότητες χρήσης των κυψελωτών κατασκευών εξαρτώνται από την εφαρμογή αυτή καθαυτή και τις απαιτήσεις.

Οι κυψελωτές κατασκευές με μικρές κυψελίδες συνήθως, χρησιμοποιούνται ως διαφανής μόνωση σε τοίχους διαφόρων κτιρίων.

Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης με μικρή κυψελωτή κατασκευή και με επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια παρουσιάζει γενικά τα εξής χαρακτηριστικά σε διάφορες συνθήκες και συγκεκριμένα 50% απόδοση σε 800W/m^2 ακτινοβολία και 100 K διαφορά θερμοκρασίας από το περιβάλλον.

Στρογγυλεμένη δομή Τετράγωνη δομή



Σχήμα 2.13: Σχέδια δύο βασικών γεωμετριών (honeycomb).

Τα στοιχεία αυτά είναι ότι ακριβώς δείχνει το σχήμα 2.12 κάτω από το διαφανές κάλυμμα.

Συμπερασματικά καταλήγουμε στο ότι η χρήση διαφόρων τύπων κυψελωτών παρεμβασμάτων, φέρει τον ηλιακό συλλέκτη σε πλεονεκτικότερη θέση, αφ' ενός γιατί μειώνονται οι απώλειές του και αφ' ετέρου γιατί αυξάνεται ουσιαστικά η απόδοσή του.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται ευρύτατα τέτοιες κατασκευές συλλεκτών, καθώς λόγω των πλεονεκτημάτων τους ευρίσκουν μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

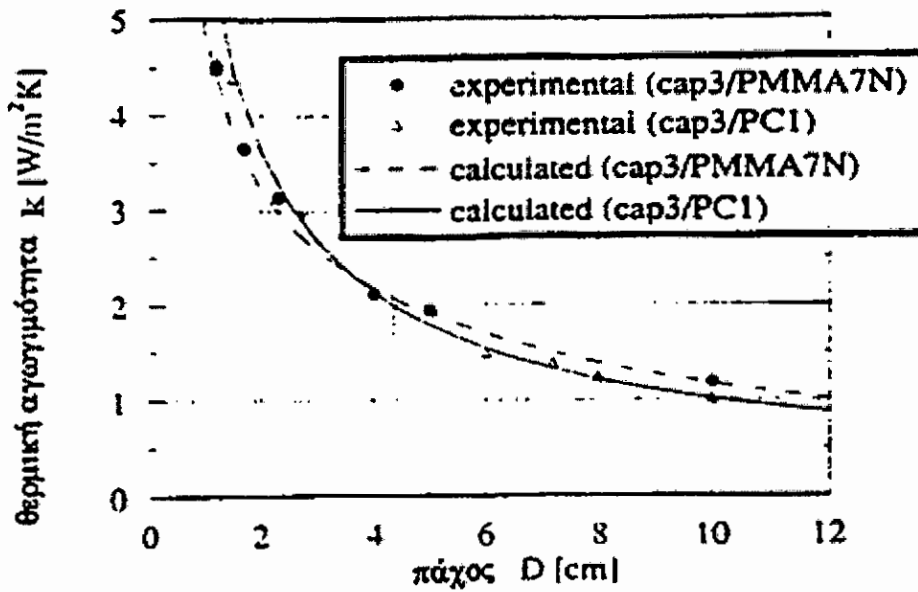
Ωστόσο, η μελέτη και η έρευνα από τους ερευνητές συνεχίζεται, με αποτέλεσμα οι κυψελωτές αυτές κατασκευές να βελτιώνονται συνεχώς, έτσι ώστε με την χρησιμοποίησή τους να αναμένονται όλο και καλύτερα αποτελέσματα.

2.4.2 Επιμέρους στοιχεία μελέτης συλλέκτη αέρα με διαφανή μόνωση

Στη συνέχεια μελετούμε έναν τύπο συλλέκτη στον οποίο έχει τοποθετηθεί ένα κυψελωτό πλέγμα (honeycomb), ως διαφανής μόνωση.

Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η θερμική αγωγιμότητα μιας κυψελίδας με διαφανή μέρη (honeycomb) συνήθως παίρνει τιμές από 1 μέχρι 3 $\left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right]$. (Solar energy 49,351-358).

Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.14: Τιμές θερμικής αγωγιμότητας του honeycomb συναρτήσει του πάχους αυτού.

Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και ο προσδιορισμός του αριθμού Nu σε ένα τέτοιου είδους συλλέκτη.

Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός Nu προσδιορίζεται συναρτήσει του αριθμού Ra. Το διάγραμμα που ακολουθεί, σχήμα 2.15, δείχνει τη σχέση μεταξύ Nu και Ra. Στην περίπτωση αυτή επειδή μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας και διαφανούς μόνωσης ο αέρας δεν ρέει, ο συντελεστής απωλειών, h, θα υπολογισθεί από τον Nu, αλλά ο Nu εξαρτάται από τον Gr και κατ' επέκταση από τον Ra.

Ο αριθμός Ra και η σχέση που συνδέει τους αριθμούς Ra και Nu δίδονται παρακάτω:

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos\beta} \right]^+ \cdot \left[1 - \frac{(\sin 1.8\beta)^{1.6} \cdot 1708}{Ra + \cos\beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos\beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (2.20\alpha)$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.20.\beta)$$

όπου:

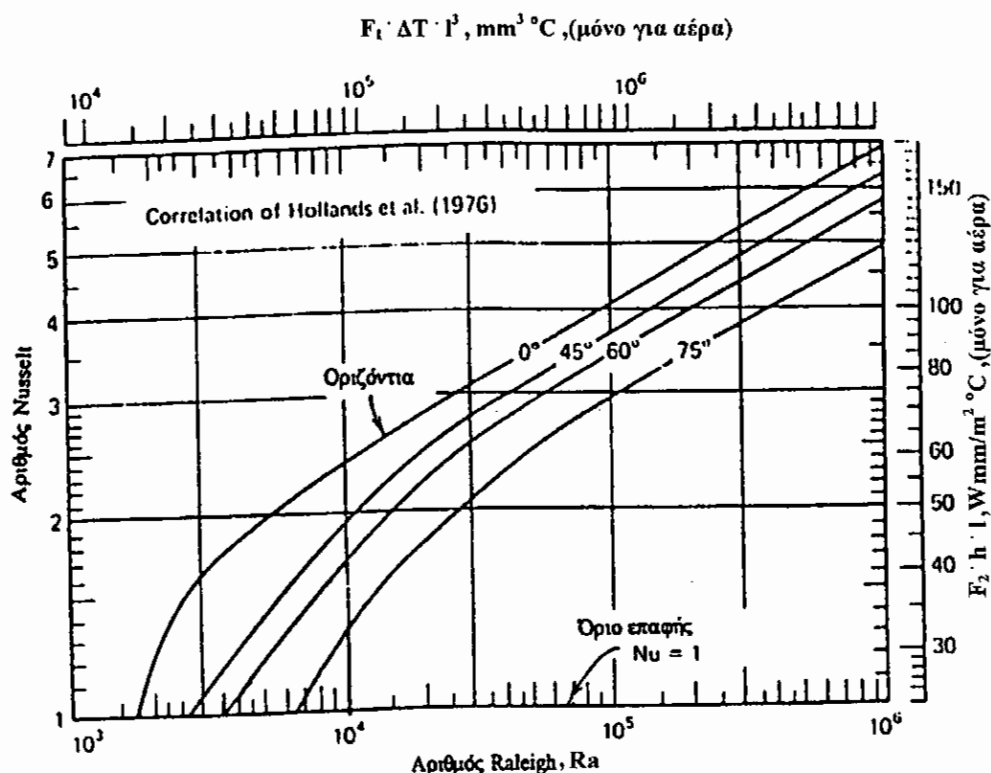
g : είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με $9.81 [m/s^2]$

β' : είναι ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής του ρευστού και για ιδανικά αέρια είναι $\beta' = 1/T_f$, όπου T_f : θερμοκρασία λεπτής στοιβάδας $= (T_b + T_p)/2$, σε $[1/^\circ K]$

ΔT : είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών $[K]$

ν : είναι το κινηματικό ιξώδες $[m^2/s]$

α : είναι ο συντελεστής θερμικής διαχυτικότητας: $\alpha = \frac{k_a}{\rho_a \cdot c_{pa}}$, $[m^2/s]$



Σχήμα 2.15: Ο αριθμός Nu συναρτήσεσι του αριθμού Ra για την ελεύθερη μεταφορά θερμότητας μεταξύ επίπεδων παραλλήλων πλάκων σε ποικίλες κλίσεις.

2.5 Συντελεστής ικανότητας του συλλέκτη, F'

- Ο συντελεστής ικανότητας, F' , του συλλέκτη, είτε υγρού, είτε αέρα, υπολογίζεται από διαφορετικές εξισώσεις για τον κάθε τύπο συλλέκτη όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, Κεφ. 3 και οι οποίες χαρακτηρίζουν τον τύπο του συλλέκτη.
- Ο συντελεστής F' αντιστοιχεί στο λόγο της πραγματικής ωφέλιμης ενέργειας που συλλέγεται, προς την ωφέλιμη ενέργεια που θα συλλεγόταν εάν η θερμοκρασία ολόκληρης της απορροφητικής επιφάνειας του συλλέκτη ήταν ίση με τη μέση θερμοκρασία του ρευστού κυκλοφορίας.
Ο συντελεστής ικανότητας του συλλέκτη, πρακτικά είναι σταθερός για κάθε τύπο συλλέκτη και για κάθε παροχή του ρευστού δι' αυτόν.
- Ο συντελεστής F' ορίζεται από το λόγο της θερμικής αντίστασης μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και του περιβάλλοντος, U_o , προς την θερμική αντίσταση μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (νερό, άλλο υγρό ή αέρας) και του περιβάλλοντος U_L .

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (2.21)$$

Σημείωση:

1. Ο συντελεστής ικανότητας, F' , του συλλέκτη, μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από κέντρο σε κέντρο μεταξύ δύο διαδοχικών σωλήνων (συλλέκτης υγρού) και αυξάνει με την αύξηση του πάχους των υλικών των δύο σωλήνων και της θερμικής αγωγιμότητάς τους.
2. Αυξανόμενου του ολικού συντελεστή απωλειών, U_L , μειώνεται ο F' , ενώ
3. Αυξάνοντας τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h) από το ρευστό στο σωλήνα, με διάφορες σχεδιαστικές τεχνικές, αυξάνει και το F' .
4. Προφανώς, οι σχεδιασμοί και οι προσπάθειες συντείνουν στο να αυξηθεί ο F' .

2.6 Συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη και συντελεστής ροής

- Η πραγματική ωφέλιμη θερμική ισχύς, (w) που αποδίδει ο συλλέκτης δίδεται από τη σχέση της θερμιδομετρίας

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (2.22)$$

- Ακόμα, με βάση την εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου των Whillier-Bliss-Hottel η ωφέλιμη θερμική ισχύς που αποδίδει το σύστημα του συλλέκτη ισούται με:

$$Q_u = A_c \cdot [I_T(\tau\alpha) - U_L \cdot (T_g - T_a)] \quad (2.23)$$

Ωστόσο, επειδή η T_g δεν είναι γνωστή και είναι δύσκολο να μετρηθεί πειραματικά, καθώς είναι η θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας που είναι εντός του συλλέκτη, εισάγουμε στη σχέση (2.23) τη μετρούμενη θερμοκρασία $T_{f,i}$ (θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο του συλλέκτη) και συγχρόνως πολλαπλασιάζουμε με τον διορθωτικό συντελεστή θερμικής απολαβής F_R : Προκύπτει, τότε, η γενική σχέση (2.29)

- Ορίζουμε συνεπώς, μια νέα παράμετρο, F_R , που δίνει την πραγματική ωφέλιμη ενέργεια που συλλέγεται από τον συλλέκτη, προς εκείνη την ωφέλιμη ενέργεια που θα συλλεγόταν, εάν ολόκληρος ο απορροφητήρας βρισκόταν στην ίδια θερμοκρασία με την θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο ($T_{f,i}$). Η ποσότητα αυτή καλείται συντελεστής θερμικής απολαβής, F_R , και μαθηματικά δίδεται από την σχέση:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_c \cdot [I_T(\tau\alpha) - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)]} \quad (2.24)$$

που προκύπτει από τις (2.29 και 2.30)

$$\dot{m} \quad : \quad \text{παροχή μάζας του ρευστού στο συλλέκτη} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right]$$

C_p	: ειδική θερμότητα του ρευστού	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$
$T_{f,o}$: θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
$T_{f,i}$: θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
A_c	: συλλεκτική επιφάνεια	$[\text{m}^2]$
$I_T(\tau\alpha)$: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τη απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη	

Η σχέση (2.24) δύναται να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
 F_R &= \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[\frac{T_{f,o} - T_{f,i}}{\frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} - (T_{f,i} - T_a)} \right] = \\
 &= \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[\frac{\left(T_{f,o} - T_a - \frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} \right) - \left(T_{f,i} - T_a - \frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} \right)}{\frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} - (T_{f,i} - T_a)} \right] \\
 F_R &= \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - \frac{\frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} - (T_{f,o} - T_a)}{\frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} - (T_{f,i} - T_a)} \right] \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

Τελικά, ο συντελεστής F_R γράφεται:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{(A_c \cdot U_L \cdot F')}{\dot{m} \cdot C_p}} \right] \quad (2.26)$$

Με βάση την σχέση (2.26), ορίζουμε και έναν άλλο συντελεστή, τον συντελεστή ροής F'' , όπου:

$$F'' = F_R / F' \quad (2.27)$$

οπότε και προκύπτει:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{(A_c \cdot U_L \cdot F')}{\dot{m} \cdot C_p}} \right] \quad (2.28)$$

Παρατηρήσεις:

1. Ο συντελεστής $F_R \rightarrow F'$ για μικρές τιμές της ποσότητας $\frac{A_c \cdot U_L}{\dot{m} \cdot c_p} F'$.

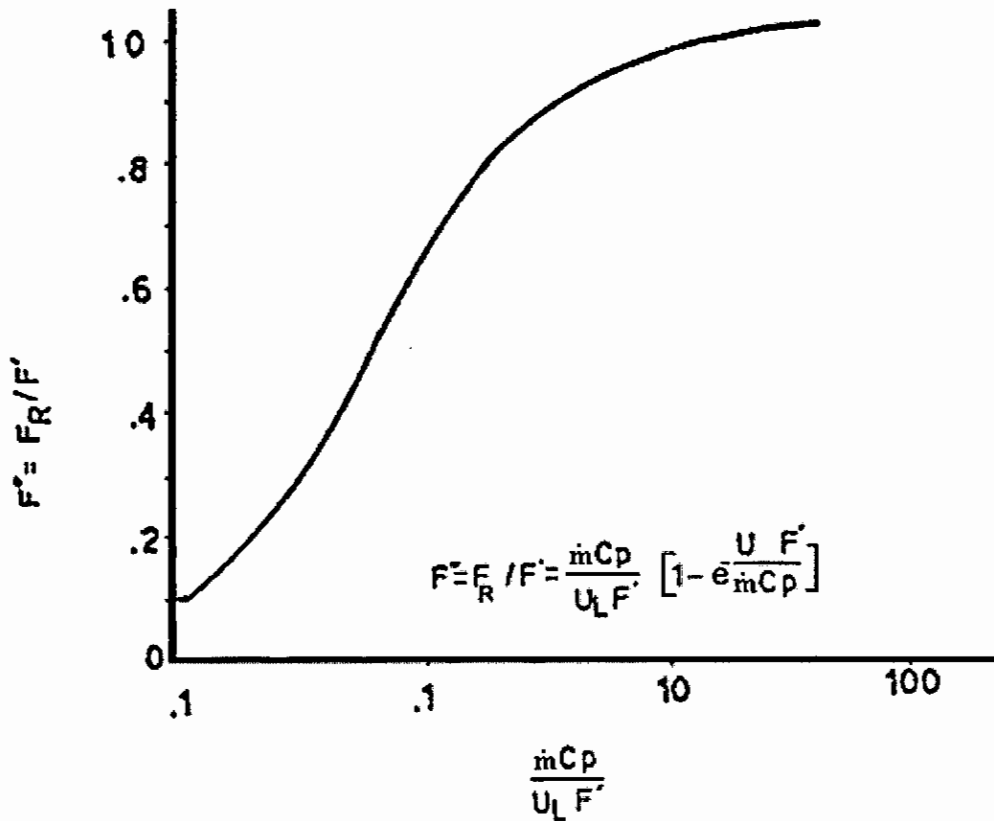
Τούτο προκύπτει από την ανάλυση του $\exp(-A_c \cdot U_L \cdot F' / \dot{m} \cdot C_p) = 1 - (-A_c \cdot U_L \cdot F' / \dot{m} \cdot C_p)$ και την αντικατάστασή του στη σχέση (2.28).

2. Η ποσότητα του F_R είναι ισοδύναμη με τον συντελεστή εκμετάλλευσης ενός συμβατικού εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας από το ένα ρευστό στο άλλο προς το μέγιστο δυνατό να μεταφερθεί, ποσό θερμότητας.

3. Το μέγιστο δυνατό ποσό ωφέλιμης ενέργειας, σε έναν ηλιακό συλλέκτη, λαμβάνει χώρα όταν ο συλλέκτης έχει θερμοκρασία ίση με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Τότε, οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον είναι το ελάχιστο κλάσμα της ωφέλιμης ενέργειας.

Ο συντελεστής ροής F'' , είναι συνάρτηση της θερμοχωρητικότητας του συλλέκτη, δηλαδή του $\frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L \cdot F'}$.

Αυτό φαίνεται και από το σχήμα 2.16 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.16: Ο Συντελεστής ροής F'' συναρτήσει του $\dot{m} C_p / U_L F'$.

4. Η χρήσιμη ενέργεια που συλλέγεται από έναν συλλέκτη είναι τελικά:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [I_T(\tau\alpha) - U_L \cdot (T_{f,i} - T_{f,o})] \quad (2.29)$$

όπου:

F_R : συντελεστής θερμικής απολαβής

Ο τύπος αυτός ισχύει όπως και η ανάλυση που έγινε ανωτέρω για κάθε είδος επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, είτε υγρού είτε αέρα.

Παρατηρήσεις:

1. Η σχέση (2.29) είναι από τις πιο σημαντικές σχέσεις αυτού του κεφαλαίου και εφαρμόζεται στους περισσότερους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Με αυτή την εξίσωση, η ωφέλιμη ενέργεια από έναν συλλέκτη, υπολογίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού, $T_{f,i}$.

2. Τονίζεται ότι ο συντελεστής F_R εκφράζει την ικανότητα μεταφοράς της θερμικής ενέργειας από την απορροφητική επιφάνεια στο ρευστό.

3. Το αποτέλεσμα του συντελεστή, F_R , είναι να μειώνει την τιμή της θεωρητικά ωφέλιμης ενέργειας που θα συλλεγόταν εάν ολόκληρη η απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη βρισκόταν στην θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, ώστε να λαμβάνουμε την πραγματική τιμή της Q_u .

4. Καθώς η ροή μέσα στον συλλέκτη αυξάνει, η αύξηση της θερμοκρασίας ήτοι η διαφορά $(T_{f,o}-T_{f,i})$ μειώνεται. Αυτό προκαλεί μείωση των απωλειών, αφού η μέση θερμοκρασία στο συλλέκτη είναι χαμηλότερη και αντίστοιχα αυξάνει το ποσοστό της ωφέλιμης ενέργειας. Αυτή η αύξηση είναι αναμενόμενη καθώς ως γνωστόν ο συντελεστής απολαβής, F_R , αυξάνει όταν η ροή αυξάνει, βλ. (σχέση 2.26) και σχήμα 2.16.

5. Η μέγιστη τιμή του F_R είναι 0.9 και δεν υπερβαίνει τον συντελεστή F' , όπως είδαμε προηγουμένως στις παρατηρήσεις. Καθώς η ροή αυξάνει, η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού από την είσοδο, $T_{f,i}$, προς στην έξοδο, $T_{f,o}$, μειώνεται, ενώ η θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας παραμένει υψηλότερη από την θερμοκρασία του ρευστού. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας εξηγήθηκε με βάση τον συντελεστή ικανότητας του συλλέκτη F' .

6. Ο συντελεστής F_R εξαρτάται από την αντίσταση στη μετάδοση της θερμότητας (U_L) και από την θερμαινόμενη απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη, A_c . Η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τον τύπο και την κατασκευή της απορροφητικής επιφάνειας, τις ιδιότητες του ρευστού και την παροχή του ρευστού (\dot{m}), βλ. σχέσεις (2.26) και (2.12.α, 2.12.β)

2.7 Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης

Το ενεργό γινόμενο του συντελεστή απορρόφησης (α) και διαπερατότητας (τ) του γυάλινου καλύμματος δηλαδή το $(\tau\alpha)_e$, μπορεί να αντικατασταθεί από την αντίστοιχη τιμή για κάθετη πρόσπτωση των ακτίνων στο συλλέκτη, $(\tau\alpha)_n$, εάν εισαχθεί ένας συντελεστής ο οποίος ονομάζεται συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης και συμβολίζεται με $K_{\tau\alpha}$ ως εξής:

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha)_e}{(\tau\alpha)_n} \quad (2.30)$$

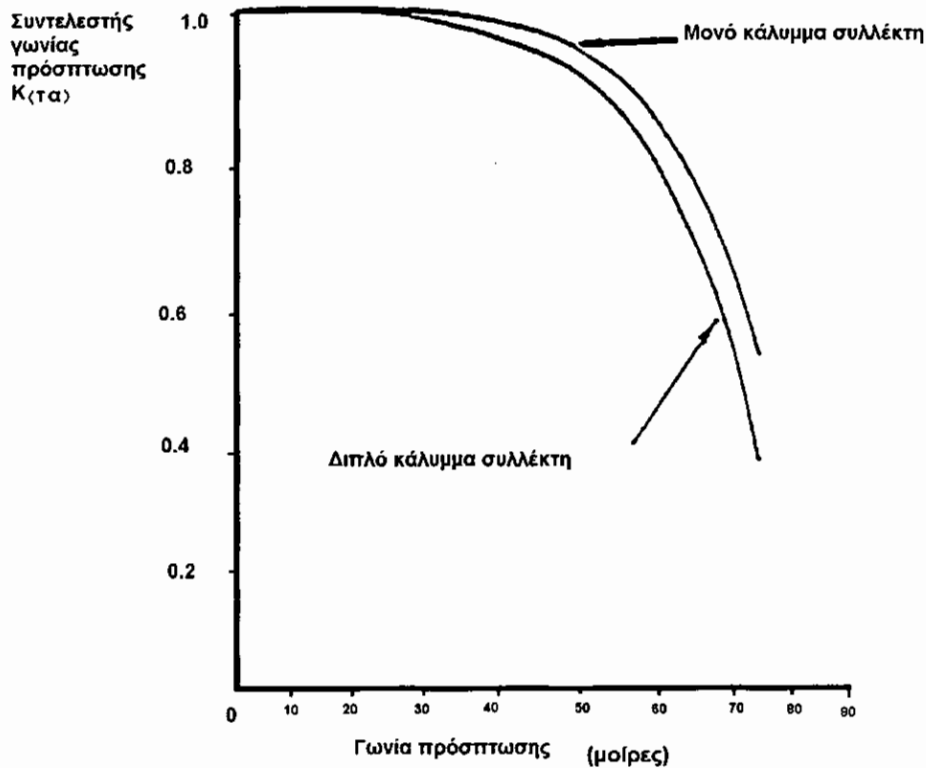
Τότε, η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη γράφεται:

$$\eta = F_R \cdot K_{(\tau\alpha)} \cdot ((\tau\alpha)_n - U_L \cdot (T_{f,j} - T_\alpha) / I_T) \quad (2.31)$$

$$\eta = F_R \cdot ((\tau\alpha)_e - U_L \cdot (T_{f,j} - T_\alpha) / I_T) \quad (2.32)$$

Τελικά, για επίπεδους συλλέκτες θα ισχύει:

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n \cdot \frac{(\tau\alpha)_e}{(\tau\alpha)_n} - F_R \cdot U_L \cdot (T_{f,j} - T_\alpha) / I_T \quad (2.33)$$



Σχήμα 2.17: Τυπικές τιμές συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης, $K_{(τα)}$.

Το σχήμα 2.17 παρουσιάζει τη μεταβολή του συντελεστή $K_{(τα)}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για δύο τύπους συλλεκτών, με ένα και δύο διαφανή καλύμματα.

Η σημασία του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης συνίσταται στο γεγονός ότι οι τιμές της θερμικής απόδοσης προσδιορίζονται συνήθως για κάθετη ή σχεδόν κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη οπότε και $K_{(τα)} = 1$ όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 2.17.

Ουσιαστικά, οι δοκιμές του συλλέκτη που "βλέπει" προς το Νοτιά γίνονται το ηλιακό μεσημέρι Α.Η.Χ οπότε $\omega=0$.

Στην περίπτωση αυτή, για έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, η τομή της καμπύλης απόδοσης με τον άξονα των y είναι ίση με $F_R(τα)_n$.

Ένας σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η ενεργειακή απολαβή ενός συλλέκτη είναι και ο συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης, $K_{(τα)}$.

Ο συντελεστής αυτός καθορίζεται από το γεωγραφικό πλάτος, την κλίση (β) και τον προσανατολισμό του συλλέκτη.

Η βέλτιστη επιλογή της κλίσης και του προσανατολισμού επιτυγχάνεται αν ληφθούν υπόψη η τοποθεσία (γεωγραφικό πλάτος), η μορφολογία του περιβάλλοντος χώρου και το φορτίο (μέγεθος και χρονική κατανομή) ("profile").

2.7.1 Μέση θερμοκρασία ρευστού και μέση θερμοκρασία απορροφητή

- Για να προσδιορισθεί η απόδοση, η , ενός συλλέκτη είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον συντελεστή των ολικών απωλειών, U_L , και τον εσωτερικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του ρευστού, βλ. σχέσεις 2.8.α, 2.8.β και 2.12.α, 2.12.β.

Ωστόσο, και τα δύο αυτά μεγέθη είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας. Τους συντελεστές αυτούς τους προσδιορίζουμε στη μέση θερμοκρασία του ρευστού, και τη μέση θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας.

- Η μέση θερμοκρασία του ρευστού, $T_{f,m}$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{f,m} = T_{f,i} + \frac{Q_u/A_c}{U_L \cdot F_R} \cdot (1 - F'') \quad (2.34)$$

όπου:

Q_u : ωφέλιμη ενέργεια [W]

A_c : επιφάνεια συλλέκτη [m²]

F'' : συντελεστής ροής

Το $T_{f,m}$, είναι η καταλληλότερη θερμοκρασία για να υπολογίσουμε και τις ιδιότητες του ρευστού, π.χ. μ , ρ , P_r , k , C_p κλπ.

- Η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας είναι πάντα μεγαλύτερη από την μέση θερμοκρασία του ρευστού, εξ' αιτίας της αντίστασης μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και του ρευστού.

Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά είναι συνήθως μικρή για τα συστήματα ηλιακών συλλεκτών υγρού, αλλά όμως σημαντική για τα συστήματα συλλεκτών αέρα.

- Η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας δίδεται τότε από την εξίσωση:

$$T_{p,m} = T_{f,i} + \frac{Q_u/A_c}{U_L \cdot F_R} \cdot (1 - F_R) \quad (2.35)$$

- Ο υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας της απορροφητικής επιφάνειας γίνεται αφού έχει υπολογισθεί ο ολικός συντελεστής απωλειών, U_L .

Με προσεγγιστικές τιμές για F_R , F'' και Q_u βρίσκουμε μια νέα μέση θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας από την σχέση (2.35) η οποία χρησιμοποιείται για να βρούμε μια νέα τιμή του συντελεστή απωλειών, U_L στο πάνω μέρος του συλλέκτη. Με βάση τη νέα τιμή που προκύπτει στη συνέχεια για το U_L , επαναπροσδιορίζουμε στη συνέχεια τους συντελεστές F_R και F'' και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Ειδική περιγραφή της ανωτέρω επαναληπτικής μεθόδου η οποία φαντάζει πολύπλοκη δίδεται αναλυτικά και κατανοητά στο παράδειγμα, που αναλύεται στη συνέχεια.

2.8 Ενεργός θερμοχωρητικότητα ενός συλλέκτη

2.8.1 Γενικά

- Η ενεργός θερμοχωρητικότητα και η σταθερά χρόνου ενός συλλέκτη είναι πολύ σημαντικές παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του σε μεταβατικές καταστάσεις.

Ένας συλλέκτης συνήθως, θεωρείται ως ένας συνδυασμός μαζών, που η κάθε μια από αυτές βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία.

- Όταν ένας συλλέκτης λειτουργεί, κάθε τμήμα του συμπεριφέρεται διαφορετικά σε μια μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας. Για τούτο είναι χρήσιμο να θεωρήσουμε μια ενεργό θερμοχωρητικότητα για το σύνολο του συλλέκτη. Δυστυχώς, η ενεργός θερμοχωρητικότητα εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και δεν είναι μια παράμετρος με μια σταθερή τιμή.

- Πολλές και διαφορετικές μέθοδοι έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας των συλλεκτών και διαπιστώθηκε ότι παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να προκύψουν από εντελώς διαφορετικές μεθόδους.

Όπως δεν υπάρχει μονοσήμαντη τιμή για την ενεργό θερμοχωρητικότητα, έτσι δεν υπάρχει γενικός τύπος για τον προσδιορισμό της σταθεράς χρόνου του συλλέκτη. Διαφορετικά τμήματα του συλλέκτη αποκρίνονται με διαφορετικούς χρόνους, στην αλλαγή των καταστάσεων, διαμορφώνοντας έτσι μια ενεργό ολική σταθερά χρόνου η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας.

2.8.2 Προσδιορισμός της θερμοχωρητικότητας

Για έναν συλλέκτη που είναι εκτεθειμένος στο ύπαιθρο και υπόκειται σε όλες τις καιρικές μεταβολές, όσο μικρότερη θερμοχωρητικότητα έχει τόσο μικρότερος χρόνος απαιτείται για να θερμανθεί όλη του η μάζα νωρίς το πρωί και να αυξηθεί η θερμοκρασία του γρήγορα, ώστε να αρχίσει να αποδίδει ωφέλιμη ενέργεια.

Απαιτείται δηλαδή, μια κρίσιμη ποσότητα ακτινοβολίας, I_g , για να καλύψει τις θερμικές του απώλειες.

Γίνεται αντιληπτό ότι η πρωινή θέρμανση της μάζας του συλλέκτη δεν θερμαίνει το ρευστό, αλλά εξισορροπεί τις απώλειες θερμότητας, καθώς το ρευστό που εισέρχεται στο συλλέκτη είναι πιθανόν να έχει θερμότητα $T_{f,i} \gg T_g$, εάν κατά την προηγούμενη ημέρα δεν απομακρύνθηκε όλη η ποσότητα του αποθηκευμένου θερμού νερού.

Η θερμοχωρητικότητα ενός συλλέκτη, C , σε $(J/m^2 K)$, υπολογίζεται από το άθροισμα του γινομένου της μάζας ανά τετραγωνικό μέτρο του συλλέκτη, m_i σε (kg/m^2) , επί την ειδική θερμότητα C_i σε (J/kgK) και επί ένα συντελεστή p_i για κάθε συστατικό τμήμα του συλλέκτη (γυαλί, απορροφητική επιφάνεια, ρευστό, μόνωση). Ισχύει, δηλαδή:

$$C = \sum p_i \cdot m_i \cdot C_i \quad (2.36)$$

Ο συντελεστής ρ_i παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εισέρχεται στην σχέση υπολογισμού γιατί κάποια κατασκευαστικά στοιχεία συμμετέχουν στην θερμική αδράνεια του συλλέκτη με διαφορετικό βάρος ή τιμή. Οι τιμές για τον συντελεστή ρ_i δίδονται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί.

Πίνακας 2: Συντελεστές βαρύτητας τμημάτων ηλιακών συλλεκτών για τον προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητάς τους.

Κατασκευαστικό στοιχείο	ρ_i
Απορροφητική επιφάνεια	1
Μόνωση	1
Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	1
Εξωτερικό κάλυμμα συλλέκτη	$0.06a_i$
Συλλέκτης με δύο καλύμματα	$0.21a_i$
Συλλέκτης με τρία καλύμματα	$0.36a_i$

Το a_i είναι ένας συντελεστής της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη ή συντελεστής απωλειών θερμότητας. Όταν η ακριβής τιμή του a_i δεν είναι γνωστή, συνιστώνται οι ακόλουθες προσεγγιστικές τιμές ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το ρ_i :

- 7.5 (για συλλέκτη με μονό κάλυμμα)
- 4.0 (για συλλέκτη με διπλό κάλυμμα)
- 2.5 (για συλλέκτη με τριπλό κάλυμμα)

2.9 Ενέργεια απολαβής επίπεδου ηλιακού συλλέκτη αέρα

Η ενέργεια απολαβής Q_u ενός επίπεδου συλλέκτη αέρα δίδεται από την σχέση:

$$Q_u = F_1 \cdot H_n + F_2 \cdot (T_a - T_m) \quad (2.37)$$

όπου:

F_1 : συντελεστής που προκύπτει από το πείραμα πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας- απολαβής θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη, βλ. σχήμα 2.23 και 2.24 $[m^2]$

F_2 : συντελεστής που προκύπτει από το πείραμα πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας - απολαβής θερμότητας

από τον ηλιακό συλλέκτη $\left[\frac{MJ}{K} \right]$

H_n : ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη. $\left[\frac{MJ}{m^2} \right]$

Τιμές της λαμβάνονται από Πίνακα, εάν διαιρεθούν οι μέσες μηνιαίες τιμές δια του αριθμού των ημερών του μήνα.

Ο συντελεστής F_1 υπολογίζεται θεωρητικά από τη σχέση:

$$F_1 = A_c \cdot F' \times K_{(τα)} \quad (2.38)$$

όπου:

$(\tau\alpha)$: το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας

$K_{(\tau\alpha)}$: συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης

F' : συντελεστής ικανότητας του συλλέκτη

Ο συντελεστής F_2 υπολογίζεται επίσης θεωρητικά με βάση τη σχέση:

$$F_2 = A_c \cdot U_o \cdot \Delta t + (MC)_c \quad (2.39)$$

όπου:

Δt : ο χρόνος λειτουργίας του συλλέκτη [hr]

$(MC)_c$: η ενεργός θερμοχωρητικότητα του συλλέκτη $\left[\frac{J}{m^2 K} \right]$

Τα υπόλοιπα μεγέθη που απαιτούνται για να υπολογιστεί η ενέργεια απολαβής, Q_u , ενός συλλέκτη αέρα αναφέρονται σε προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού.

Η ενέργεια απολαβής θα υπολογιστεί στα Παραδείγματα στο τέλος για δύο τύπους συλλεκτών αέρα.

Άλλοι τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών αέρα, οι οποίοι πρέπει να μελετηθούν για τις συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι τύποι αυτοί συλλεκτών θερμού αέρα δίδονται στο σχήμα 3.1 μαζί με τους τύπους για τον υπολογισμό των παραμέτρων U_L , F' , h_r . Αυτές οι παράμετροι είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της θερμικής συμπεριφοράς και του θερμικού κέρδους των συλλεκτών.

Στο σχήμα 3.1 δίδονται δύο τύποι συλλεκτών αέρα. Ο τύπος (β) είναι περισσότερο συνηθισμένος από ό,τι ο τύπος (α), γιατί ο (α) έχει μια πιο πολύπλοκη ανάλυση.

Σχόλιο:

Ο τύπος (α) είναι παρόμοιος με τους συλλέκτες που προσαρμόζονται σε ένα παθητικό σύστημα για τα κτίρια, βλ. σχήμα 2.5α.

Για τούτο και θα γίνει μια πλήρης ανάλυσή του.

2.10 Απόδοση συλλεκτών

Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.6 η σχέση (2.23) περιγράφει τη θερμική απόδοση των συλλεκτών κάτω από σταθερές συνθήκες λειτουργίας.

Για τον υπολογισμό του θερμικού κέρδους σε W για έναν ηλιακό συλλέκτη θα ισχύει:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [I_T \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)] \quad (2.40)$$

Τονίζεται ότι η απορροφούμενη ακτινοβολία $I_T(\tau\alpha)$ γράφεται ως το γινόμενο της ολικής ακτινοβολίας I_T που προσπίπτει στο συλλέκτη επί το ενεργό γινόμενο απορροφητικότητας – διαπερατότητας, $(\tau\alpha)$.

Το γινόμενο $(\tau\alpha)$ είναι ένας αριθμός, ο οποίος (σε συνδυασμό με τα F_R και U_L) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό ενός συλλέκτη.

• Η σχέση (2.40) μας οδηγεί στην “στιγμιαία” απόδοση, η , του συλλέκτη, όπου:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_T} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{I_T} \right) \quad (2.41)$$

Η σχέση αυτή για την στιγμιαία απόδοση μπορεί να λάβει τη μορφή:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_T} = F' \cdot (\tau\alpha)_e - F' \cdot U_L \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{I_T} \right) \quad \text{ή} \quad (2.42.a)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_T} = \frac{\dot{m} \cdot C_P \cdot (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_c \cdot I_T} = \eta_o - U_o \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{I_T} \right) \quad (2.42.b)$$

όπου:

$$\eta_o = F' \times (\tau\alpha) \quad (2.43)$$

είναι η στιγμιαία απόδοση, που ισχύει για την περίπτωση $T_m = T_a$

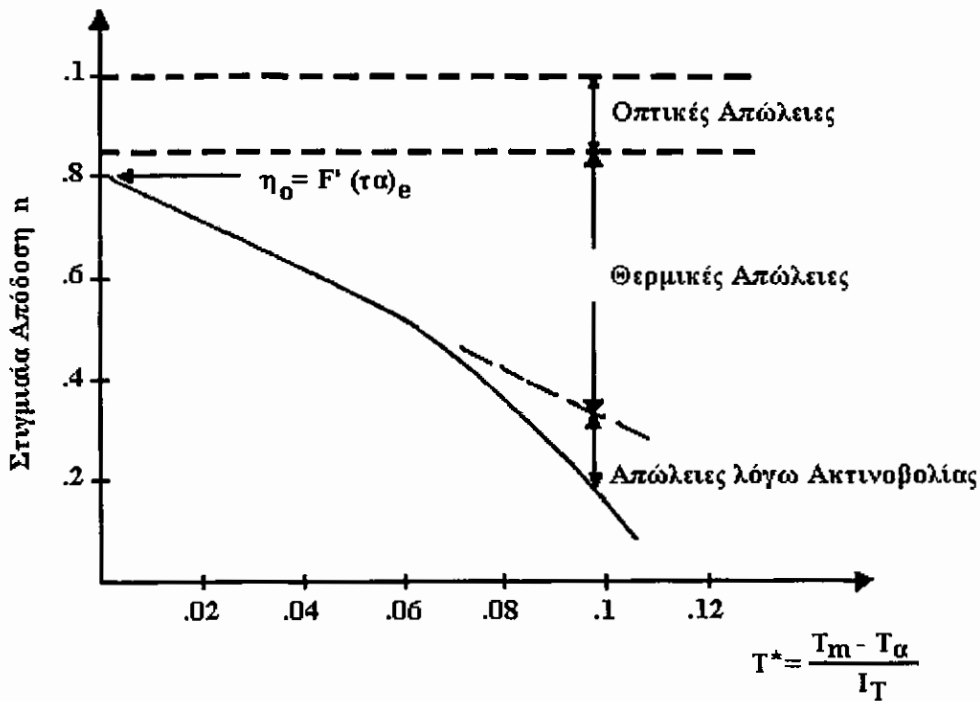
$$T_m = \frac{T_{f,i} + T_{f,o}}{2} \quad \text{και}$$

$$U_o = F' \times U_L \quad (2.44)$$

είναι ο ολικός συντελεστής των θερμικών απωλειών $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

Η σχέση (2.41) δίδει τη στιγμιαία απόδοση του επιπέδου συλλέκτη, για σταθερές ή σχεδόν σταθερές συνθήκες συναρτήσει του μεγέθους:

$$T^* = \frac{T_m - T_a}{I_T}, \quad \text{βλ. σχήμα (2.18)}$$



Σχήμα 2.18: Καμπύλη στιγμιαίας απόδοσης επίπεδου συλλέκτη συναρτήσει του μεγέθους

$$\Gamma^* = \frac{T_m - T_a}{I_T}$$

Διερεύνηση:

- Το η_0 προσδιορίζεται από το σημείο τομής της καμπύλης απόδοσης με τον άξονα, το δε σημείο $U_0 = F' \cdot U_L$ είναι η κλίση της εφαπτομένης σε κάθε σημείο της καμπύλης.

Η στιγμιαία απόδοση των επίπεδων συλλεκτών υπολογίζεται για διάφορες θερμοκρασίες που παίρνουν τιμές από αυτή του περιβάλλοντος, T_a , και πάνω.

Από την σχέση (2.41) η απόδοση μπορεί να προσεγγιστεί ως γραμμική συνάρτηση του Γ^* . Τα σφάλματα όμως που ίσως προκύπτουν στις μετρήσεις επιβάλλουν όπως η συνάρτηση $[\eta, (\Gamma^*)]$ προσεγγισθεί με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού. Η προσέγγιση αυτή γίνεται με τη βοήθεια των ελαχίστων τετραγώνων και από τη ζεύση των τιμών (η, Γ^*) που προκύπτουν από τις δοκιμές-πειράματα.

- Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης, η , λαμβάνει τη μορφή:

$$\eta = a_0 - a_1 \cdot \Gamma^* - a_2 \cdot (\Gamma^*)^2 \quad (2.45)$$

όπου:

$$T^* = \frac{T_m - T_a}{I_T}$$

Το a_0 είναι η τιμή της $[\eta, (T^*)]$ για $T^*=0$ δηλαδή $a_0=\eta_0$. Τα a_1 και a_2 είναι συντελεστές θερμικών απωλειών.

• Η εξίσωση $Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [I_T(t_a) - U_L \cdot (T_{i,i} - T_a)]$ είναι η βασική εξίσωση της μεθόδου δοκιμών των συλλεκτών.

Υπάρχουν διαδικασίες δοκιμών τόσο για συλλέκτες υγρού όσο και για συλλέκτες αέρα, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί και σε συλλέκτες με χαμηλή θερμοχωρητικότητα.

Τα πρότυπα ASHRAE περιλαμβάνουν μια μέθοδο δοκιμών για συλλέκτες αέρα και η οποία δίδεται στο σχήμα (2.19).

Οι μετρήσεις σε ένα συλλέκτη μπορούν να γίνουν και στο ύπαιθρο και σε εσωτερικό χώρο χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό προσομοιωτή.

Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, όπως φαίνεται στη σχέση (2.41) εκφράζεται ως συνάρτηση τριών σημαντικών παραμέτρων που είναι οι: (t_a) , F_R , και U_L .

• Συνοπτικά αναφέρουμε:

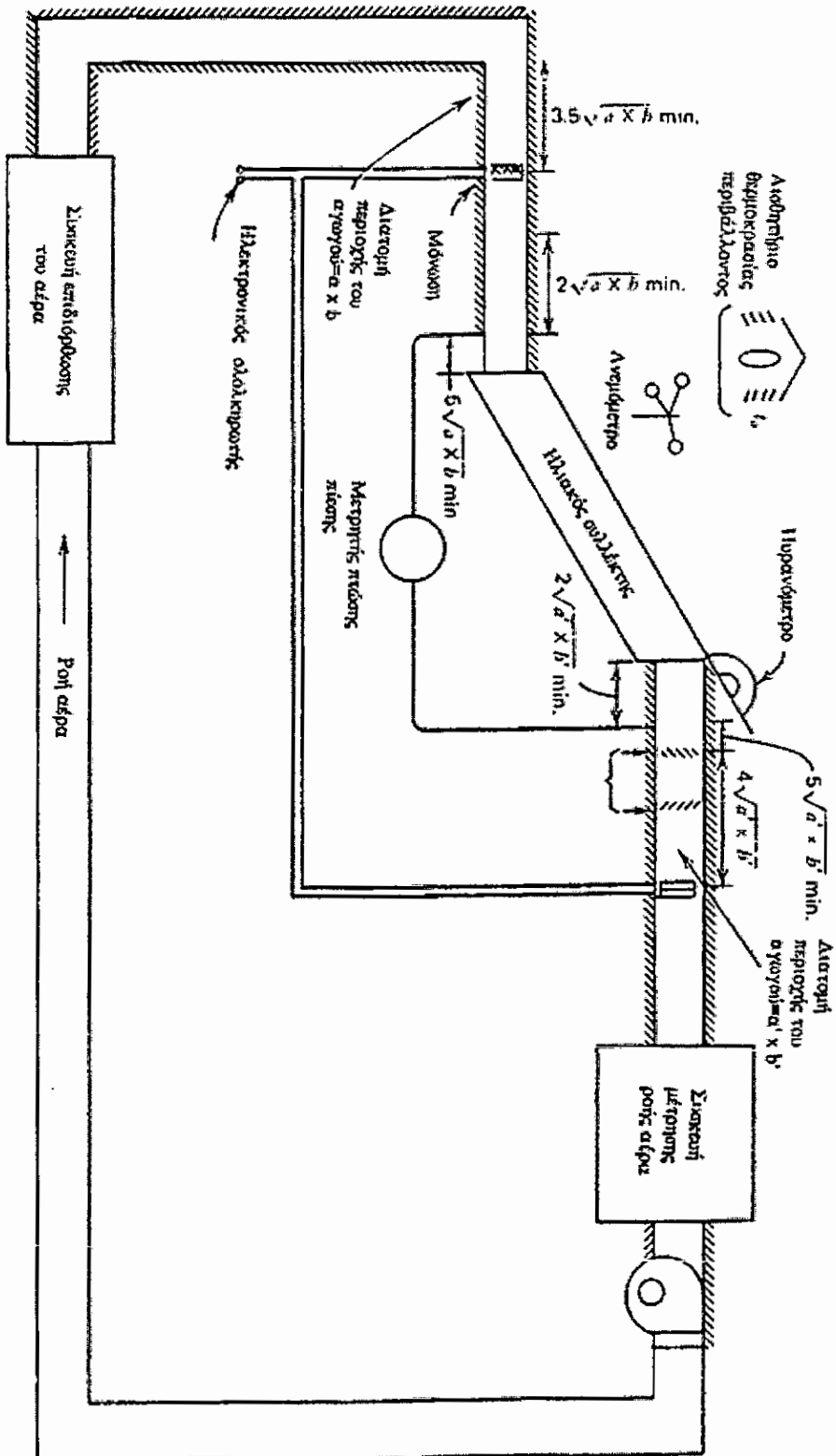
α. Ο όρος (t_a) εκφράζει το είδος της κάλυψης του συλλέκτη (αριθμός φύλλων, απόσταση, υλικό) καθώς και την ποιότητα της απορροφητικής επιφάνειας με ή χωρίς επιλεκτική επιφάνεια.

β. Ο όρος F_R εκφράζει τον τρόπο και την ποιότητα κατασκευής της απορροφητικής επιφάνειας όσον αφορά:

το υλικό και το πάχος της απορροφητικής επιφάνειας, και τον τρόπο κατασκευής των αγωγών του ρευστού

γ. Ο όρος U_L εκφράζει το μέτρο προστασίας του συλλέκτη ως προς τις θερμικές απώλειες.

Ο όρος U_L εξαρτάται από τον αριθμό των φύλλων επικάλυψης και την μεταξύ τους απόσταση, τον συντελεστή εκπομπής, ϵ , της απορροφητικής επιφάνειας, την χρησιμοποίηση διαφανούς μόνωσης (honeycomb), ή κενού αέρος, την μόνωση της πλάτης και των πλευρών του συλλέκτη κλπ.



Επίσημο 2.19: Διάταξη δοκιμής συλλέκτη αέρα. Από ASHRAE Standard 93-77(1977)

2.11 Σχόλια - Συμπεράσματα

- Από την πειραματική επεξεργασία των μετρήσεων για κάθε συλλέκτη χωριστά, παρατηρείται μια ψευδομόνιμη κατάσταση εξαρτώμενη από την ηλιακή ακτινοβολία της ημέρας.

Για υψηλές τιμές της ακτινοβολίας τόσο οι συλλέκτες όσο και το σύστημα παρουσιάζουν μια γραμμική συμπεριφορά η οποία όμως "ανατρέπεται" τις πρώτες πρωινές και τις τελευταίες απογευματινές ώρες.

- Επίσης από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων (regression analysis), για διαφορετικές θερμοκρασιακές διαφορές ΔT , παρατηρείται ότι οι συντελεστές F_1 και F_2 της εξίσωσης (2.44) ικανοποιούν τη σχέση:

$$Q_u = F_1 \cdot H_n + F_2 \cdot (T_a - T_m)$$

η οποία παρουσιάζει μια πολύ καλή συμφωνία μεταξύ θεωρίας και πειράματος.

Υπάρχουν όμως και αποκλίσεις, οι οποίες οφείλονται τόσο σε σφάλματα του πειράματος, όσο και στους διάφορους αστάθμητους παράγοντες που προκύπτουν κατά τη διαδικασία αυτή.

- Ο θεωρητικός προσδιορισμός των ανωτέρω παραμέτρων (ο οποίος είναι αρκετά ακριβής όπως δείχνουν τα πειράματα) δίνει τη δυνατότητα της ενεργειακής πρόβλεψης του συλλέκτη, αλλά και βοηθά σημαντικά στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού αυτού για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας του συλλέκτη.

- Η εξίσωση "εισόδου - εξόδου" και τα αντίστοιχα διαγράμματα για σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά ΔT λειτουργίας, αποτελούν βασικό στοιχείο για την εκτίμηση της ημερήσιας ενεργειακής συμπεριφοράς του συλλέκτη.

3 Ανάλυση διαφόρων τύπων Ηλιακών συλλεκτών αέρα

3.1 Γενικά

Είναι αναγκαίο κατά την μελέτη των συστημάτων – διατάξεων ηλιακών συλλεκτών να μπορούμε να υπολογίσουμε διαφόρους παραμέτρους τους όπως:

- α. τον συντελεστή θερμικών απωλειών, U_L , και
- β. τον συντελεστή ικανότητας του συλλέκτη, F' ,

ώστε τελικά να υπολογισθεί η ωφέλιμη θερμική ενέργεια, από τη σχέση $Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [(I_T \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (T_i - T_a))]$, που θα αποδώσει το σύστημα που μελετούμε, για την κάλυψη των θερμικών φορτίων.

- Για τον σκοπό αυτό είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε τις σχέσεις βάση των οποίων υπολογίζονται οι διάφοροι παράμετροι, όπως π.χ. οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, h_c , h_r κλπ. για τους οποίους ειδική αναφορά έγινε στις § 2.10 και 2.11.
- Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί επίσης στο γεγονός ότι οι σχέσεις αυτές πιθανόν να αλλάζουν από ένα τύπο ηλιακού συλλέκτη σε κάποιον άλλον. Για τον λόγο αυτό στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε την ανάλυση των δύο πρώτων τύπων ηλιακών συλλεκτών αέρα, που παρουσιάζονται στα σχήματα 2.5α και 2.5β.

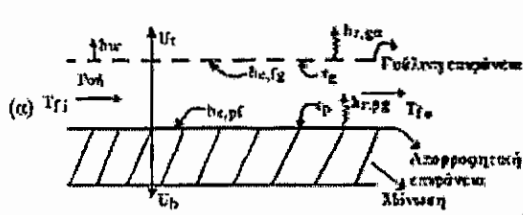
3.2 Συλλέκτης αέρα με ροή μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας και γυάλινου καλύμματος

Παράδειγμα: Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ενέργεια από ένα τύπο Η.Σ. θερμού αέρα, όπως αυτόν που δείχνει το σχήμα 2.5(α). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δίδει ο Πίνακας 3 που ακολουθεί.

Πίνακας 3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
μήκος συλλέκτη	m	3
πλάτος συλλέκτη	m	1
ύψος συλλέκτη	m	0.18
υλικό μόνωσης	-	Πετροβάμβακες
πάχος μόνωσης	mm	70
υλικό καλύμματος	-	Γυαλί
πάχος καλύμματος	mm	3
αριθμός καλυμμάτων	-	1
πάχος απορροφητή	mm	1
υλικό απορροφητή	-	Cu
τρόπος επεξεργασίας απορροφητή	-	επιλεκτικός
απόσταση γυαλιού-απορροφητή		107

- Οι σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή ικανότητας F' , καθώς και του ολικού συντελεστή απωλειών, U_L , για τον συλλέκτη αυτό δίδονται στο σχήμα 3.1.α που ακολουθεί:



$$U_L = \left(\left(\frac{1}{h_{c,pt}^{-1} + h_{r,pg}} \right)^{-1} + \frac{1}{h_w + h_{r,ga}} \right)^{-1} + U_b \quad (3.1)$$

$$F' = \frac{h_{c,fg} \cdot h_{r,pg} + h_{c,pt} \cdot U_b + h_{c,pt} \cdot h_{c,fg}}{(U_t + h_{r,pg} + h_{c,fg})(U_b + h_{r,pg} + h_{c,pt}) - h_{r,pg}^2} \quad (3.2)$$

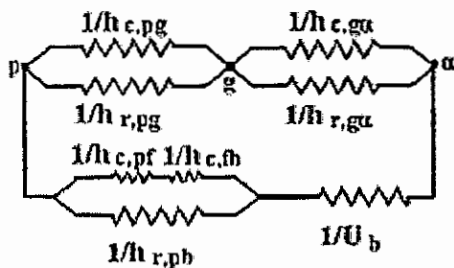
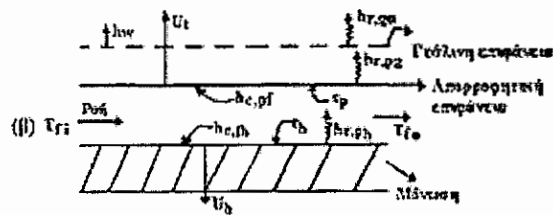
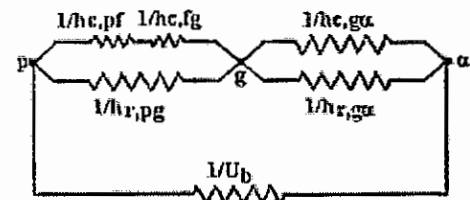
$$h_{r,pg} = \frac{\sigma \cdot (T_p^2 + T_g^2) \cdot (T_p + T_g)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_g - 1} \quad (3.3)$$

$$U_L = \left(\frac{1}{h_{c,pg} + h_{r,pg}} + \frac{1}{h_w + h_{r,ga}} \right)^{-1} + \quad (3.19)$$

$$+ \left(\left(\frac{1}{h_{c,pt}^{-1} + h_{c,fb}} \right)^{-1} + \frac{1}{U_b} \right)^{-1}$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_{c,pt} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c,fb}} + \frac{1}{h_{r,pb}}}}} \quad (3.20)$$

$$h_{r,pb} = \frac{\sigma \cdot (T_p^2 + T_b^2) \cdot (T_p + T_b)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_b - 1} \quad (3.21)$$



Σχήμα 3.1 (α): Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης με ροή μεταξύ απορροφητικής επιφάνειας και τζαμιού. (β): Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης με ροή μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και της μόνωσης.

Οι υπολογισμοί θα γίνουν για μια μέση θερμοκρασία του διερχόμενου αέρα αρχικά λαμβανομένη ίση με 40 °C.

π.χ έστω $T_{f,i}=20\text{ }^\circ\text{C}=293\text{ K}$ και $T_{f,o}=60\text{ }^\circ\text{C}=333\text{ K}$, τότε $T_m=40\text{ }^\circ\text{C}=313\text{ K}$

Ο Πίνακας 4 δίνει τις τιμές των βασικών μεγεθών: ρ , μ , k_a που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς για διάφορες θερμοκρασίες.

Πίνακας 4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

T_m (αέρα) °C	ρ kg/m ³	μ kg/msec	k_a W/m ² K
20	1.185	$1.8 \cdot 10^{-5}$	0.026
30	1.135	$1.85 \cdot 10^{-5}$	0.027
40	1.05	$1.92 \cdot 10^{-5}$	0.029
45	1.05	$1.92 \cdot 10^{-5}$	0.029

1. Υπολογισμός των συντελεστών απωλειών, U_t , U_L .

Σύμφωνα με το ηλεκτρικό ισοδύναμο (σχήμα 3.1.α), ο συντελεστής απωλειών από το κάλυμμα του συλλέκτη προς το περιβάλλον, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_t = \left(\left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1}} + h_{r,pg} \right) + \frac{1}{h_w + h_{r,ga}} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

1.α. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h_w , λόγω ρεύματος αέρα με ταχύτητα V_w επί της επιφάνειας του συλλέκτη, δίδεται από τη σχέση:

$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot V_w \quad (3.5)$$

$$\text{Αν } V_w = 1 \text{ m/sec, τότε } h_w = 9.5 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

1.β. Ακόμη ο συντελεστής απωλειών λόγω ακτινοβολίας, $h_{r,ga}$, από το κάλυμμα προς το περιβάλλον δίδεται από τη σχέση:

$$h_{r,ga} = \epsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_g^2 + T_a^2) \cdot (T_g + T_a) \quad (3.6)$$

όπου:

$$\sigma : \text{η σταθερά των Stefan και Boltzman ίση με } 5.669 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

Αν θέσουμε στη σχέση (3.6) $\epsilon_g = 0.9$, την ανωτέρω τιμή του σ , $T_g = 305 \text{ K}$ ως θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος ίση περίπου με τη θερμοκρασία του διερχόμενου ρεύματος του αέρα και $T_a = 288 \text{ K}$ (15 °C θερμοκρασία περιβάλλοντος), ευρίσκουμε τελικά ότι:

$$h_{r,ga} = 0.9 \cdot 5.669 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \right) \cdot (305^2 + 288^2) \text{ K}^2 \cdot (305 + 288) \text{ K} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow h_{r,ga} = 5.3 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

και συνεπώς λόγω της (3.4)

$$U_t = 5.155 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (3.8)$$

- Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή h_r ο οποίος είναι το μέτρο των απωλειών της θερμικής ακτινοβολίας από τον συλλέκτη και ο οποίος ταυτίζεται με τον συντελεστή $h_{r,pg}$ τον οποίο γνωρίσαμε στη σχέση (2.3) του Κεφαλαίου 2.2.

Για τον υπολογισμό του $h_r \equiv h_{r,pg}$, υποθέτουμε τιμές $\varepsilon_p = 0.95$,
 $T_p = (273 + 70) = 343 \text{ K}$

Αντικαθιστούμε στη σχέση (3.3) και έχουμε:

$$h_r = h_{r,pg} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right) \cdot (343^2 + 305^2) \cdot (343 + 305) K^3}{\frac{1}{0.9} + \frac{1}{0.95} - 1} \Rightarrow$$

$$h_{r,pg} = 6.65 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής απωλειών από το πίσω μέρος του συλλέκτη είναι:

$$U_b = \frac{1}{R_t} = \frac{k_p}{L} = 0.66 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

- Τέλος για τον υπολογισμό του συντελεστή των ολικών απωλειών, U_L , αλλά και του συντελεστή ικανότητας, F' , του συλλέκτη πρέπει να υπολογίσουμε τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας $h_{c,pf}$ και $h_{c,fg}$. Τους συντελεστές $h_{c,pf}$ και $h_{c,fg}$ θα τους υπολογίσουμε από την τιμή του αριθμού Nu . Ωστόσο, για να επιλέξουμε τη σωστή σχέση για τον αριθμό Nu πρέπει να εξακριβώσουμε αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης.

Για τούτο υπολογίζουμε τον αριθμό Re από τη σχέση (2.13)

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L^*}{\mu} = \frac{\rho \cdot U \cdot D_h}{\mu} = \frac{1.05 (\text{Kg/m}^3) \cdot 0.52 (\text{m/s}) \cdot 2 \cdot 0.107 (\text{m})}{1.92 \cdot 10^{-5} (\text{Kg/ms})} = 6085 \quad (3.10)$$

Από την τιμή του Re στη σχέση (3.10) αποφαινόμεθα ότι η ροή είναι τυρβώδης και πλήρως διαμορφωμένη.

Ο αριθμός Nu υπολογίζεται τότε από τη σχέση:

$$Nu = 0.0196 \cdot (Re)^{0.8} \cdot (Pr)^{0.33} = 0.0196 \cdot (6085)^{0.8} \cdot (0.7)^{0.33} = 18.6 \quad (3.11)$$

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας $h_{c,pf}$ και $h_{c,fg}$, όπως δείχνει και το σχήμα 3.1α., αποτελούν το μέτρο μεταφοράς θερμότητας από τις δύο επιφάνειες που το ρεύμα αέρα έρχεται σε επαφή και είναι σχεδόν ίσοι αφού οι θερμοκρασίες δεν διαφέρουν σημαντικά. Συνεπώς:

$$h_{c,fg}=h_{c,pf}=Nu \cdot k_g/D_h = 18.6 \cdot 0.029 \left[\frac{W}{mK} \right] / 2 \cdot 0.107m = 2.5 \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.12)$$

Ο ολικός συντελεστής απωλειών σύμφωνα με το ηλεκτρικό ισοδύναμο δίνεται από τη σχέση (3.1) και είναι:

$$U_L = \left(\left(\frac{1}{h_{c,pf}^{-1} + h_{c,fg}^{-1} + h_{r,pg}} \right)^{-1} + \frac{1}{h_w + h_{r,g\alpha}} \right)^{-1} + U_b =$$

$$= \left(\left(\frac{1}{2.5^{-1} + 2.5^{-1}} + 6.65 \right)^{-1} + \frac{1}{9.5 + 5.3} \right)^{-1} + 0.66 = 5.815 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Με βάση τη σχέση (3.2) προσδιορίζουμε την τιμή του F' .

$$F' = \frac{2 \cdot 2.5 (W/m^2K) \cdot 6.65 (W/m^2K) + 2.5 \cdot 2.5 (W/m^2K)^2 + 2.5 \cdot 0.66 (W/m^2K)^2}{(5.155 + 6.65 + 2.5)(W/m^2K) \cdot (0.66 + 2.5 + 6.65)(W/m^2K) - 6.65^2 (W/m^2K)} = 0.43$$

• Υπολογισμός της ωφέλιμης θερμικής ενέργειας από τον ηλιακό συλλέκτη αέρα.

Έστω ότι $\dot{m} = 0.0588 \left[\frac{kg}{s} \right]$ και ότι $A_c = 1 \cdot 3 = 3 [m^2]$ (ήτοι 1m πλάτος και 3m μήκος),

βλ. Πίνακα 4.

Επίσης πρέπει να είναι γνωστή η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συλλέκτη.

Έστω ότι αυτή είναι 20 °C.

Τέλος είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε:

Την ένταση της προσπίπτουσας στο συλλέκτη ηλιακής ακτινοβολίας.

Έστω $I_T = 1000 [W/m^2]$, και την τιμή (τ_a), την οποία θα υποθέσουμε ότι είναι 0.83.

Από τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών, U_L και F' που υπολογίσθηκαν προηγουμένως και τη σχέση (2.34) υπολογίζουμε τον συντελεστή F'' .

Αρχικά υπολογίζουμε την παράσταση:

$$\frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L \cdot F'} = \frac{0.0588 (kg/s) \cdot 1009 (J/KgK)}{3 (m^2) \cdot 5.815 (W/m^2K) \cdot 0.43} = 7.91 \quad (3.13)$$

Ο συντελεστής F'' υπολογίζεται με βάση τη σχέση (2.34) και (2.35):

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{(A_c \cdot U_L \cdot F')}{\dot{m} \cdot C_p}} \right] = 7.91 \cdot \left[1 - e^{-1/7.91} \right] = 0.94 \quad (3.14)$$

Γνωστών των F' και F'' υπολογίζουμε το συντελεστή θερμικής απολαβής, F_R , του συλλέκτη.

$$F_R = F'' \cdot F' = 0.94 \cdot 0.43 = 0.40 \quad (3.15)$$

Η ωφέλιμη ενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση (2.40):

$$Q_u = 0.40 \cdot 3(\text{m}^2) [1000(\text{W}/\text{m}^2) \cdot 0.83 - 5.815(\text{W}/\text{m}^2\text{K}) \cdot (293-288)\text{K}] = 961.11[\text{W}]$$

Η απόδοση του συλλέκτη υπολογίζεται από τη σχέση (2.41):

$$\eta = Q_u / A_c I_T = 961.11 \text{ W} / [3(\text{m}^2) \cdot 1000(\text{W}/\text{m}^2)] = 0.32$$

Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο θα είναι:

$$T_{f,o} = T_{f,i} + \frac{Q_u}{\dot{m} \cdot C_p} = 293\text{K} + \frac{961.11\text{W}}{0.0588(\text{Kg}/\text{s}) \cdot 1009(\text{J}/\text{KgK})} = 309.2\text{K} = 36.2^\circ\text{C} \quad (3.16)$$

❖ Μια άλλη σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα δίδεται από τον S. Aboul – Enein και είναι:

$$T_{fo} = T_f(x,t) \Big|_{x=L} = \left(\frac{\bar{f}_1(t)}{b_1} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(L - \frac{t}{\alpha_1} \right) \left(\frac{b_1}{2} \right) \right] \right\} + T_{fi} \exp \left[- \left(L + \frac{t}{\alpha_1} \right) \left(\frac{b_1}{2} \right) \right] \quad (3.17)$$

Η ωφέλιμη ενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \quad (3.18)$$

Παρατηρήσεις:

- Όπως παρατηρούμε η σχέση για το T_{fo} εξαρτάται από την απόσταση από την είσοδο x και το χρόνο t . Αυτές οι δύο μεταβλητές θεωρήθηκαν σταθερές. Έτσι $x=L$ =μήκος του συλλέκτη=3m και $t=5.769\text{sec}$.
- Ο υπολογισμός των διαφόρων όρων που περιλαμβάνουν οι σχέσεις έγινε χρησιμοποιώντας μια ομάδα εξισώσεων οι οποίες είναι συνάρτηση των: h (συντελεστής μεταφοράς θερμότητας), T (θερμοκρασία περιβάλλοντος και εισόδου του αέρα), A (επιφάνεια του συλλέκτη), I (ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας) κλπ, (βλέπε ref 13).
- Ο Aboul Enein για τον υπολογισμό των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας, h , χρησιμοποίησε τον αριθμό Ra (που χρησιμοποιείται στην περίπτωση ελεύθερης ροής). Λόγω του ότι στην περίπτωσή μας η ροή είναι βεβιασμένη για τον υπολογισμό των συντελεστών, h , χρησιμοποιήσαμε τον αριθμό Nu . Τα αποτελέσματα και με τους δύο τρόπους φαίνονται στις περιπτώσεις 2 και 3 αντίστοιχα, του παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5 ΤΙΜΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΝΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

α/α	T_m (αέρα) °C	τ (γυαλιού)	α (χάλκινη επιφάνεια)	F'	U_t W/m ² K	U_L W/m ² K	Q_u W	η	$T_{f,o}$ °C
1	40	0.88	0.95	0.43	5.155	5.815	961.11	0.32	36.2
2	40	0.88	0.95	0.43	5.155	5.815	937.4	0.31	35.8
3	40	0.88	0.95	0.43	5.155	5.815	961.1	0.32	36.2

3.3 Ηλιακός συλλέκτης αέρα με ροή κάτω από την επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια

Παράδειγμα: Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ενέργεια από ένα τέτοιο τύπο Η.Σ. θερμού αέρα, όπως αυτός που δείχνει το σχήμα 3.1.β.

Οι υπολογισμοί του συντελεστή ικανότητας του συλλέκτη F' , του ολικού συντελεστή απωλειών U_L , και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h_r , γι' αυτόν το συλλέκτη αέρα δίδονται από τις σχέσεις (3.19), (3.20) και (3.21).

- Στον Πίνακα 6 δίδονται οι διαστάσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη τον οποίο θα αναλύσουμε ώστε να υπολογίσουμε το θερμικό του κέρδος.

Πίνακας 6 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
μήκος συλλέκτη	m	3
πλάτος συλλέκτη	m	1
ύψος συλλέκτη	m	0.096
υλικό μόνωσης	-	πετροβάμβακας
πάχος μόνωσης	mm	70
υλικό καλύμματος	-	γυαλί
πάχος καλύμματος	mm	3
αριθμός καλυμμάτων	-	1
πάχος απορροφητή	mm	1
υλικό απορροφητή	-	Cu
τρόπος επεξεργασίας απορροφητή	-	επιλεκτικός
απόσταση γυαλιού-απορροφητή	mm	12
απόσταση πλάκας αλουμινίου-απορροφητή	mm	10

Τονίζεται ότι ο υπολογισμός του συντελεστή απωλειών από το κάλυμμα προς το περιβάλλον γίνεται σύμφωνα με το διάγραμμα (σχήμα 2.11α) με βάση την θερμοκρασία του απορροφητήρα, την θερμοκρασία περιβάλλοντος και το συντελεστή εκπομπής, ϵ_p , της απορροφητικής επιφάνειας.

- Ο συντελεστής h_r υπολογίζεται από την σχέση που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο παράδειγμα. Αναλυτικά γράφεται η διαδικασία υπολογισμού μόνο για την μέση θερμοκρασία του αέρα 40 °C.

Οι τιμές των φυσικών μεγεθών του αέρα για άλλες θερμοκρασίες αναγράφονται χωριστά για κάθε μια από αυτές στον Πίνακα 4 του τύπου συλλέκτη που μελετήθηκε.

- Ο αριθμός Re δίδεται από την σχέση (2.18) και είναι:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D_h}{\mu} = \frac{1.05(\text{Kg/m}^3) \cdot 5.6(\text{m/s}) \cdot 2 \cdot 0.01(\text{m})}{1.92 \cdot 10^{-5}(\text{Kg/ms})} = 6125$$

Ο λόγος του μήκους προς την υδραυλική διάμετρος είναι:

$$\frac{L}{D_h} = \frac{3\text{m}}{0.02\text{m}} = 150$$

Εφόσον ο αριθμός Re είναι μεγαλύτερος από 2100 και ο λόγος L/D_h είναι πολύ μεγάλος, η ροή είναι τυρβώδης και πλήρως διαμορφωμένη.

Ο αριθμός Nu, σε αυτή την περίπτωση, για ροή όπου μόνο η μια πλάκα θερμαίνεται και η άλλη είναι μονωμένη, σύμφωνα με τους Duffie & Beckman δίδεται από τη σχέση (2.19):

$$Nu = 0.0158 \cdot Re^{0.8} = 0.0158 \cdot 6125^{0.8} = 16.92$$

Από την σχέση (2.17.β) προκύπτει η τιμή για τους συντελεστές $h_{c,pf}$ και $h_{c,fb}$:

$$h_{c,pf} = h_{c,fb} = Nu \times k_a / D_h = \frac{16.92 \cdot 0.029(\text{W/mK})}{0.02(\text{m})} = 24.53 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με εκπομπή $h_{r,pb}$ δίνεται σε αυτή την περίπτωση από τη σχέση (3.21):

$$h_{r,pb} = \frac{\sigma \cdot (T_p^2 + T_b^2) \cdot (T_p + T_b)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_b - 1} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8}(\text{W/m}^2\text{K}^4) \cdot (343^2 + 313^2) \cdot (343 + 313)\text{K}^3}{\frac{1}{0.95} + \frac{1}{0.95} - 1} = 7.25 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Ο συντελεστής απωλειών από το εμπρόσθιο μέρος του συλλέκτη σύμφωνα με το ηλεκτρικό ισοδύναμο (σχήμα 3.1.β) δίνεται από τη σχέση:

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{c,pg} + h_{r,pg}} + \frac{1}{h_w + h_{r,ga}} \right)^{-1}$$

Για τον υπολογισμό του $h_{c,pg}$ χρησιμοποιούμε τις σχέσεις (2.20.α) και (2.20.β) για φυσική ροή (σύμφωνα με Duffie&Beckman).

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos\beta} \right]^+ \cdot \left[1 - \frac{(\sin 1.8\beta)^{1.6} \cdot 1708}{Ra \cdot \cos\beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos\beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot a} = \frac{9.81(\text{m/s}^2) \cdot 1/324(\text{K})^{-1} \cdot (343 - 305)\text{K} \cdot 0.012^3(\text{m}^3)}{1.83 \cdot 10^{-5}(\text{m}^2/\text{s}) \cdot 2.73 \cdot 10^{-5}(\text{m}^2/\text{s})} = 3979.58$$

Επομένως έχουμε:

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{3.98 \cdot 10^3} \right]^+ \cdot \left[1 - \frac{(\sin 0)^{1.6} \cdot 1708}{3.98 \cdot 10^3 \cdot \cos 0} \right] + \left[\left(\frac{3.98 \cdot 10^3 \cdot \cos 0}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ = 1.94$$

Έτσι έχουμε:

$$Nu = h_{c,pg} \cdot D_h / \kappa \Rightarrow h_{c,pg} = \frac{1.94 \cdot 0.029(\text{W/mK})}{0.012(\text{m})} = 4.69 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Ο συντελεστής απωλειών από το οπίσθιο μέρος του συλλέκτη, U_b , δίνεται από τη σχέση (2.2):

$$U_b = \frac{1}{R_1} = \frac{k_\mu}{L} = 0.66 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Τελικά το U_i είναι:

$$U_i = 7.24 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Ο ολικός συντελεστής απωλειών σε αυτή την περίπτωση σύμφωνα με το ηλεκτρικό ισοδύναμο (σχήμα 3.1.β) δίνεται από τη σχέση (3.19):

$$U_L = \left(\frac{1}{4.69 + 6.65} + \frac{1}{9.5 + 5.3} \right)^{-1} + \left(\left(\frac{1}{24.53^{-1} + 24.53^{-1} + 7.5} \right)^{-1} + \frac{1}{0.66} \right)^{-1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_L = 7.88 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Από τη σχέση (3.20) υπολογίζουμε τον συντελεστή F'

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_{c,pf} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c,fb}} + \frac{1}{h_{r,pb}}}}} = \frac{1}{1 + \frac{7.88}{24.53 + \frac{1}{\frac{1}{24.53} + \frac{1}{7.25}}}} \Rightarrow F' = 0.81$$

Η θερμοχωρητικότητα του συλλέκτη είναι:

$$\frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L \cdot F'} = \frac{0.0588(\text{Kg/s}) \cdot 1009(\text{J/KgK})}{3(\text{m}^2) \cdot 7.88(\text{W/m}^2\text{K}) \cdot 0.79} = 3.176$$

Ο συντελεστής ροής δίδεται από τη σχέση (2.26) και είναι:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \left[1 - e^{-\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p}} \right] = 3.176 \cdot \left[1 - e^{-1/3.176} \right] = 0.86$$

Ο συντελεστής θερμικής απολαβής δίδεται από τη σχέση (2.27) και είναι:

$$F_R = F' \cdot F'' = 0.79 \cdot 0.86 = 0.68$$

Η ωφέλιμη ενέργεια, Q_u , δίδεται από τη σχέση (2.40) και είναι:

$$Q_u = 0.68 \cdot 3(\text{m}^2) [1000(\text{W/m}^2) \cdot 0.83 - 7.88(\text{W/m}^2\text{K}) \cdot (293-288)\text{K}] = 1612.8[\text{W}]$$

Η απόδοση του συλλέκτη δίδεται από τη σχέση (2.41) και είναι:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_T} = \frac{1612.8(\text{W})}{3(\text{m}^2) \cdot 1000(\text{W/m}^2)} = 0.54$$

Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο θα είναι:

$$T_{f,o} = T_{f,i} + \frac{Q_u}{\dot{m} \cdot C_p} = 293\text{K} + \frac{1612.8(\text{W})}{0.0588(\text{Kg/s}) \cdot 1009(\text{J/KgK})} = 320.2\text{K} = 47.2^\circ\text{C}$$

❖ Επίσης για τον υπολογισμό του $T_{f,o}$ χρησιμοποιήσαμε τη σχέση των C. Choudhury και H.P.Garg:

$$T_{f,o} = \frac{(U_5 U_{11} + U_8 U_9) \cdot I(\tau\alpha) + (U_8 U_{10} + U_7 U_{11}) \cdot T_\alpha}{(U_6 U_{11} - U_8 U_{12})} + \frac{(U_8 U_{10} + U_7 U_{11}) \cdot T_\alpha}{(U_6 U_{11} - U_8 U_{12})} \quad (3.22)$$

ενώ η απόδοση δίδεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{I \cdot A_c} \quad (3.23)$$

• Ο υπολογισμός των διαφόρων όρων που περιλαμβάνει η σχέση (3.22) έγινε χρησιμοποιώντας μια ομάδα εξισώσεων οι οποίες είναι συνάρτηση των: h (συντελεστής μεταφοράς θερμότητας), \dot{m} (παροχή μάζας του αέρα), C_p (ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα), (βλέπε ref 12).

❖ Ο D.L. Loveday προτείνει μια σχέση για τον υπολογισμό των ολικών απωλειών, U_L σε επίπεδο συλλέκτη αέρα, με ροή κάτω από την επιλεκτική επιφάνεια, χωρίς κάλυμμα, (βλέπε ref 11).. Η σχέση αυτή τροποποιήθηκε κατάλληλα και εφαρμόστηκε σε συλλέκτη αέρα με κάλυμμα.

Η σχέση που προτείνει ο D.L. Loveday είναι:

$$U_L = \frac{(U_b \cdot U_t) \cdot \left(h_{r,pb} + h_{r,pb} \frac{h_{c,pf}}{h_{c,fb}} + h_{c,pf} + h_{c,fb} \right) + U_t \cdot \left(h_{r,pb} + \frac{h_{c,pf}}{h_{c,fb}} \cdot h_{r,pb} + h_{c,fb} \right) \cdot (1 + U_b \cdot d_f)}{\left(h_{r,pb} + \frac{h_{c,pf} \cdot h_{r,pb}}{h_{c,fb}} + h_{c,pf} + U_b \right) + \left(h_{r,pb} + \frac{h_{c,fb} \cdot h_{r,pb}}{h_{c,pf}} + h_{c,fb} + U_b \right)} \quad (3.24)$$

❖ Ο A. Hachemi προτείνει επίσης μια σχέση για τον υπολογισμό των ολικών απωλειών, U_L , σε επίπεδο συλλέκτη αέρα, (βλέπε ref 9). Αυτή είναι:

$$U_L = \frac{(U_b + U_t) \cdot (h_{c,pf} \cdot h_{c,fb} + h_{c,pf} \cdot h_{r,pb} + h_{c,fb} \cdot h_{r,pb})}{h_{c,pf} \cdot h_{c,fb} + h_{c,pf} \cdot h_{r,pb} + h_{c,fb} \cdot h_{r,pb} + h_{c,pf} \cdot U_b} + \frac{(U_b \cdot U_t) \cdot (h_{c,pf} + h_{c,fb})}{h_{c,pf} \cdot h_{c,fb} + h_{c,pf} \cdot h_{r,pb} + h_{c,fb} \cdot h_{r,pb} + h_{c,pf} \cdot U_b} \quad (3.25)$$

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, h , υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους των Duffie & Beckman και ο συντελεστής απωλειών από το εμπρόσθιο μέρος του συλλέκτη υπολογίζεται από το ηλεκτρικό ισοδύναμο.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 7 που ακολουθεί.

Πίνακας 7 **ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ**

α/α	T_m (αέρα) °C	τ (γυαλιού)	α (χάλκινη επιφάνεια)	F'	U_t W/m ² K	U_L W/m ² K	Q_u W	η	$T_{f,o}$ °C
1	40	0.88	0.95	0.81	7.24	7.88	1612.2	0.54	47.2
2	40	0.88	0.95	0.81	7.24	7.88	1560	0.52	46
3	40	0.88	0.95	0.81	7.24	7.4	1641.5	0.55	47.6
4	40	0.88	0.95	0.81	7.24	8.0	1611.6	0.54	47.2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **“ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”**
ΦΡ. ΚΟΤΣΙΑΝΑΣ - Δ. ΧΟΥΝΤΡΑΣ
3^η ΕΚΔΟΣΗ ΑΘΗΝΑ 1983

2. **“ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ”**
ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ Ε. ΜΟΣΧΑΤΟΣ
ΕΚΔΟΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΟΣ

3. **“ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ”**
Ε. ΒΑΖΑΙΟΥ
ΑΘΗΝΑ 1984

4. **“Solar Engineering of Thermal processes”**
Duffie J. A. and Beckman W. A.
New York: Willey- Interscience, 1980

5. **“Heat transmission”**
W. H. McAdams
International student edition, 3^d Edition

6. **“Introduction to Heat Transfer”**
F. P. Incropera and D. P. De Witt.
3^d Edition

7. **“Basic principles and concepts for passive solar architecture”**
European passive solar handbook, Preliminary edition
Commission of the European Communities
Directorate-General, XII for Science, Research and Development
Brussels, 1986

8. **“Principles of solar engineering”**
F. Kreith and J. Kreider
Washington: 1978

9. **“Technical note comparative study on the thermal performances of solar air heater collectors with selective and nonselective absorber – plate”**
A. Hachemi
Renewable Energy, 17 , 103 – 112, 1999

10. **“ Experimental study of heat transfer and flow friction in solar air heaters with and without selective absorber”**
A. Hachemi,
Renewable Energy, 17, 155 – 168, 1999

11. **“Thermal performance of air – heating solar collectors with thick, poorly conducting absorber plates”**
D. L. Loveday
Solar Energy 41(6), 593 – 602, 1988

12. "Evaluation of jet plate solar air heater"

C. Choudhury and H. P. Garg
Solar Energy, 46(4), 199 – 209,1991

13. "Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications"

S. Aboul – Enein, A. A. El – Sebaï, M. R. I. Ramadan, H.G. El – Gohary
Renewable Energy,.21, 505 – 522, 2000

14. "Optimizing the thermohydraulic performance of flat – plate solar air heaters operating with fixed/variable pumping power"

Adel A. Hegazy, Technical note
Renewable Energy, 18, 283 – 304 ,1999

15. "Optimal thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters"

B. N. Prasad and J.S. Saini
Solar Energy, 47(2), 91 – 96, 1991

16. "Calculation of flat – plate loss coefficients"

S. A. Klein
Solar Energy, 17, 79 – 80, 1975

17. "Heat loss calculation of flat – plate solar collectors"

A. Malhotra, H. P. Garg and A. Palit
Journal of Thermal Engineering, 2(2), 59 – 62,1981

18. "Analysis and performance of flat – plate solar collector arrays"

X. A. Wang and L. G. Wu
Solar Energy, 45(2), 71 – 78, 1990

19. "The application of solar collectors for drying of grain and hay"

Gustafsson, G. and Ekstrom,N.1979

20. "Solar energy applications in agriculture: potential research needs and adoption strategies"

A. Harris, W.L., 1976 Md. Agric. Exp. Stn. Bull. A-184

21. "Solar collectors for low-temperature grain drying"

Kline, G.L., 1977 ASAE-Pap.77-3007
 American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 19 pp.

22. "High efficiency solar air heater"

A. Mohamad
Solar Energy, 60(2), 71-76, 1997

23. "Thermal performance of solar air heaters--experimental correlation"

S. K. Ong
Solar Energy, 55(3), 209-220, 1995

24. "Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure"

S.K. Ong

Solar Energy, 55(2), 93-109, 1995

25. "Agricultural solar air collector made from low – cost plastic packing film"

N.T. Ahmad

Renewable Energy, 23, 663 – 671, 2001

26. "PV-hybrid and thermoelectric collectors"

Gunter Rockendorf, Roland Sillmann, Lars Podlowski and Bernd Litzenburger

Solar Energy, 67, 227-237, 1999

27. "Solar powered cogeneration system for air conditioning and refrigeration"

Selahattin Göktun

SolarEnergy, 24(11), 971-977, 1999

