



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ
ΥΨΗΛΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ**

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Α. ΠΑΓΚΡΑΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ Γ. ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ανδρέα Μπουντουβή για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να αναλάβω αυτή τη διπλωματική εργασία καθώς και τον Δρ. Νίκο Στεφανάκη για την βοήθεια του σε όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τους φίλους μου, για όλη την υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα παθητικής ψύξης μιας φωτοβολταϊκής κυψελίδας υψηλής συγκέντρωσης σε ένα ιδιαίτερα αντίξοο θερμοκρασιακό σενάριο, που ανταποκρίνεται στα ελληνικά δεδομένα. Για την ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε λεπτομερής τρισδιάστατη σχεδίαση του συστήματος της κυψελίδας και της ψύκτρας φυσικής κυκλοφορίας και ακολούθησε θερμική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μεταβάλλοντας την γεωμετρία της ψύκτρας επιτεύχθηκε μια ικανοποιητική θερμοκρασία λειτουργίας για την φωτοβολταϊκή κυψελίδα. Ακόμη πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση διαφοροποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος ψύξης καθώς και την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Τέλος υπολογίστηκε η μηνιαία παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος σε διάστημα ενός έτους. Μέρος των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκαν στο 10ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας (Παράρτημα 1).

ABSTRACT

This thesis examines the ability of passive cooling of a high concentration solar cell under a worst case thermal scenario, that fits the climate conditions in Greece. A detailed 3D modeling was performed for the solar cell and the passive cooling heat sink, followed by a finite element thermal analysis. An acceptable operating temperature was achieved by altering the heat sink geometry. Moreover a parametric analysis was conducted, altering various geometric parameters of the cooling system, as well as the incident solar radiation flux. Finally the annual electrical energy generation of this system is being calculated. Part of the results of the current thesis were included in a related paper at the 10th National Conference for Renewable Energy Sources (Annex 1).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	<i>i</i>
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	<i>ii</i>
ABSTRACT	<i>iii</i>
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	<i>iv</i>
1 ΨΥΞΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ	5
1.1. Εισαγωγή	5
1.2. Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα και ΦΒ Κυψελίδες	5
1.3. Απαιτήση Ψύξης Συγκεντρωτικών Κυψελίδων	12
1.4. Στρατηγικές Ψύξης Συγκεντρωτικών Κυψελίδων	14
1.5. Περιγραφή Συστήματος προς Μελέτη	16
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	17
2.1 Εισαγωγή στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας	17
2.2 Ανάλυση θερμικών αντιστάσεων σε μια ψύκτρα	22
2.3 Ενεργειακή Συμπεριφορά Συστήματος	28
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	29
3.1 Αρχές τρισδιάστατης σχεδίασης	29
3.2 Τρισδιάστατη σχεδίαση του συστήματος	34
3.3 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων	43
3.4 Καθορισμός Πλέγματος	46
3.5 Εφαρμογή οριακών συνθηκών	46
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	52
4.1 Μελέτη Εφαρμογής	52
4.2 Αναζήτηση γεωμετρίας επαρκούς ψύξης	52
4.3 Παραμετρική ανάλυση με μεταβαλλόμενο το μήκος των πτερυγίων	55
4.4 Παραμετρική ανάλυση με μεταβαλλόμενο τον αριθμό των πτερυγίων	56
4.5 Παραμετρική ανάλυση με μεταβαλλόμενη την προσιπτούσα ηλιακή ακτινοβολία	57
4.6 Ενεργειακή προσομοίωση του φβ κελιού	57
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	62

1 ΨΥΞΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ

1.1. Εισαγωγή

Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (concentrating photovoltaics - CPVs) συστήματα λειτουργούν χρησιμοποιώντας ένα οπτικό σύστημα για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό (φβ) κελί. Έτσι, ένα μικρό φωτοβολταϊκό κελί δέχεται ακτινοβολία πολλές φορές μεγαλύτερη από ότι αν λειτουργούσε κάτω από συνθήκες άμεσης ηλιακής έκθεσης. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κελιού αυξάνεται με την αύξηση της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα το φβ κελί να παράγει μεγαλύτερη ισχύ όταν λειτουργεί κάτω από συνθήκες συγκεντρωμένης ακτινοβολίας. Η τεχνολογία των CPVs, εκμεταλλευόμενη αυτό το φαινόμενο, οδηγεί στη μείωση του κόστους της ενεργειακής παραγωγής, αποσβένοντας το κόστος των φβ κελιών, των οπτικών τμημάτων και των συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης (solar tracking), μέσω της υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης. Στην πράξη οι λόγοι συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρονται ως 'ήλιοι' και διαχωρίζουν τα CPVs σε δύο γενικές κατηγορίες: (α) Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά χαμηλής συγκέντρωσης (low concentration photovoltaics - LCPVs) που λειτουργούν μεταξύ 1.25 με 40 ήλιους, και (β) τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά υψηλής συγκέντρωσης (high concentration photovoltaics - HCPVs) που λειτουργούν μεταξύ 250 με 1700 ήλιων. Συστήματα με λόγους συγκέντρωσης μεταξύ των HCPVs και των LCPVs (τα οποία ονομάζονται συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά μέσης συγκέντρωσης MCPV) δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κυρίως λόγω της έως και ανύπαρκτης οικονομικότητάς τους.

1.2. Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα και ΦΒ Κυψελίδες

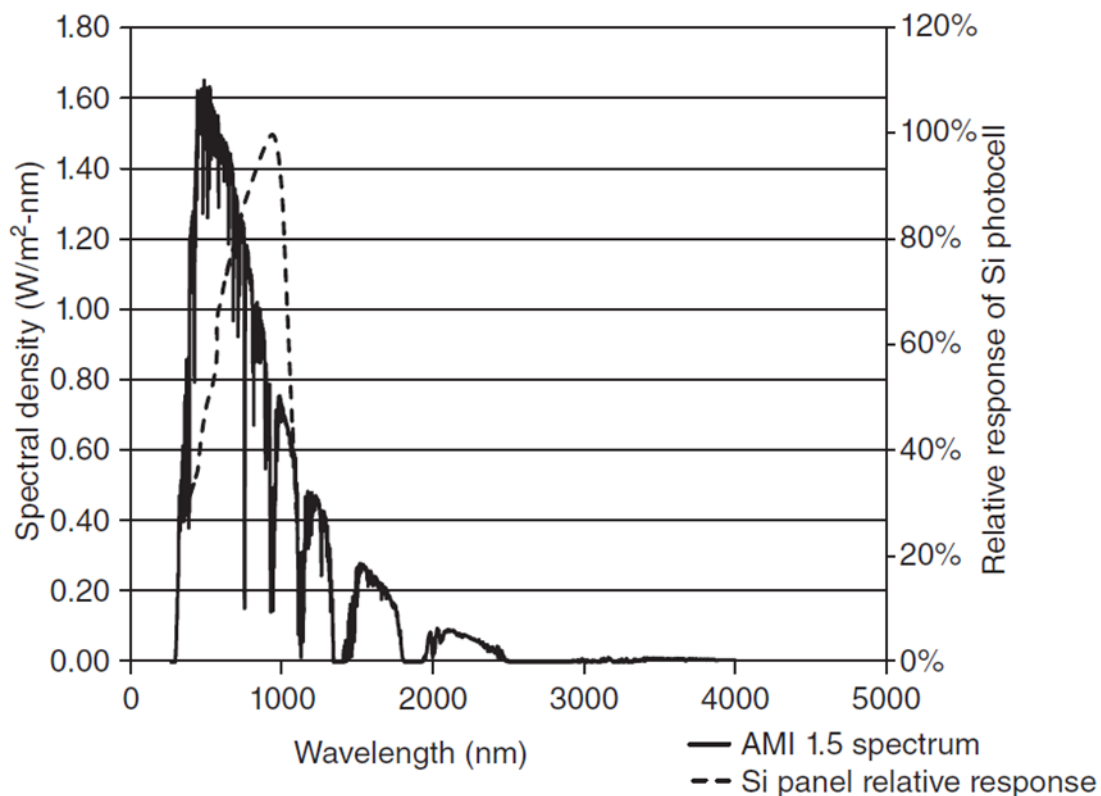
Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό μέσω του φωτοβολταϊκού κελιού, όπως ακριβώς γίνεται και στα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περιλαμβάνουν ημιαγώγιμα υλικά που μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρική ενέργεια με άμεσο τρόπο. Αυτές οι συσκευές κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά στα οποία προστίθενται προσμίξεις που προσφέρουν εύκολα μετακινούμενα ηλεκτρόνια στην κρυσταλλική δομή. Όταν βρίσκονται στην θεμελιώδη τους κατάσταση, τα ηλεκτρόνια αυτά καταλαμβάνουν μία ζώνη ενέργειας που ονομάζεται ζώνη σθένους. Αν ένα από αυτά τα ηλεκτρόνια αποκτήσει αρκετή ενέργεια αναβαθμίζεται η ενεργειακή του στάθμη και εισέρχεται στην ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου της ζώνης αγωγιμότητας ξεπερνά την ενέργεια στην ζώνη σθένους κατά ένα ποσό που ορίζεται από την απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη του κρυσταλλικού υλικού. Η απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη εξαρτάται από το υλικό (πχ πυρίτιο, GaAs, Ge) και από την θερμοκρασία. Προκειμένου να διεγερθεί ένα ηλεκτρόνιο από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, το φωτόνιο θα πρέπει να έχει ενέργεια τουλάχιστον ίση με την απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη. Η ενέργεια του φωτονίου που βρίσκεται σε περίσσεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Τα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας χαρακτηρίζονται από υψηλή κινητικότητα και μπορούν να κατευθυνθούν προς ένα ηλεκτρόδιο, σχηματίζοντας έτσι ένα συνεχές ηλεκτρικό κύκλωμα.

Κρίσιμη για την εξαγωγή των ηλεκτρονίων από το κρυσταλλικό πλέγμα είναι η δομή που δημιουργείται συνδυάζοντας έναν ημιαγωγό n και έναν p τύπου, σε διάταξη διόδου. Χωρίς αυτή τη διάταξη οποιοδήποτε απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο θα γυρνούσε γρήγορα στην ζώνη σθένους, αποδίδοντας την ενέργεια του σε θερμότητα ή ακτινοβολία, μέσω περίπλοκων φαινομένων επανασύνδεσης. Η διεργασία της επανασύνδεσης λαμβάνει χώρα σε όλη την έκταση του κρυσταλλικού πλέγματος, αλλά εμφανίζεται ιδιαίτερα ισχυρή στην επιφάνεια του. Ο σχεδιασμός και η τρόπος παρασκευής της διόδου μπορούν να μειώσουν αλλά όχι και να εξαλείψουν τα φαινόμενα επανασύνδεσης.

Τα φωτόνια, όπως είναι γνωστό, έχουν ενέργεια αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος τους. Φωτόνια με μήκος κύματος μεταξύ 400nm και 470nm έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από φωτόνια με μήκος κύματος μεταξύ 620nm και 750nm και απορροφώνται πιο κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη του ενεργειακού χάσματος έχουν τη δυνατότητα να παράξουν ηλεκτρικό ρεύμα, αποδίδοντας την περισσευούμενη ενέργεια τους σε θερμότητα. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου καθώς και του φαινομένου της επιφανειακής επανασύνδεσης που εμφανίζεται στα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, όσο

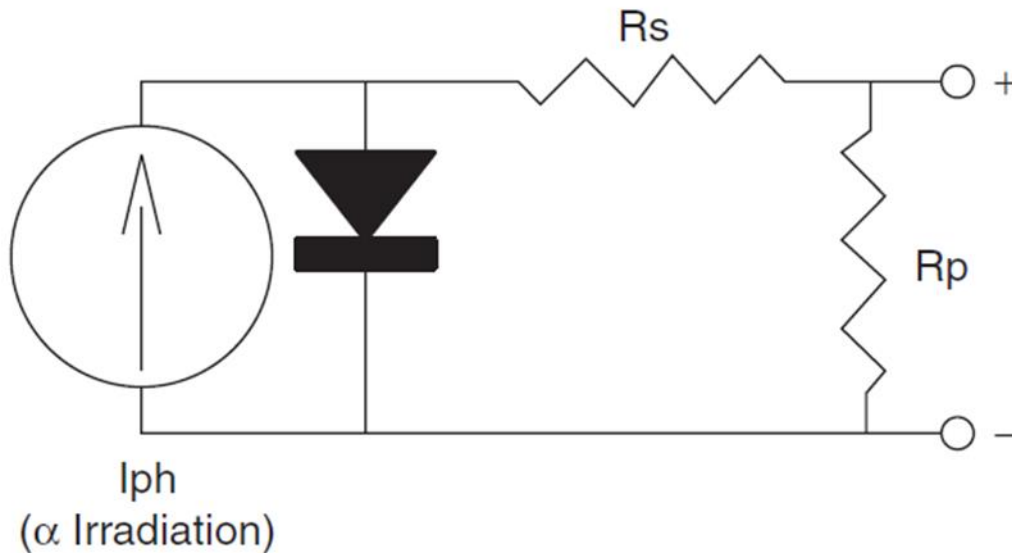
αυξάνεται η ενέργεια του φωτονίου πάνω από την ενέργεια ενεργοποίησης του δεσμευμένου ηλεκτρονίου τόσο μειώνεται η απόδοση της μετατροπής.

Με ανάλογο τρόπο, φωτόνια με ενέργεια μικρότερη του ενεργειακού χάσματος δεν μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, τα φωτόνια αυτά διαπερνούν το υλικό, όπου τελικά απορροφώνται και μετατρέπονται σε θερμική ενέργεια. Λαμβάνοντας υπόψη τους δυο παραπάνω μηχανισμούς, φαίνεται ότι απόδοση της συσκευής παρουσιάζει μέγιστο σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, που εξαρτάται από τη χαρακτηριστική ενέργεια χάσματος. Οι Kurtz και Geisz (2010) [1] αναφέρουν ότι η βέλτιστη τιμή του ενεργειακού χάσματος για το ηλιακό φάσμα είναι προσεγγιστικά ίση με 1.4eV. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) έχει τιμή χάσματος ίση με 1.11eV, που βρίσκεται πολύ κοντά στη βέλτιστη τιμή, κάτι που δικαιολογεί και γιατί το πυρίτιο έχει επικρατήσει στη φωτοβολταϊκή βιομηχανία. Τα χαρακτηριστικά του πυριτίου εμφανίζονται στο Σχήμα 1.1, όπου εμφανίζεται η απόδοση του σε σχέση με το μήκος κύματος του φωτός. Ακόμη στο διάγραμμα φαίνεται το φάσμα του ηλιακού φωτός για AM 1.5. Αυτό αποτελεί ένα πρότυπο φάσμα, που προκύπτει από τροποποίηση του φυσικού φάσματος αφού διαπεράσει 1.5 φορά το βάθος πρότυπης ατμόσφαιρας, που αντιστοιχεί σε κλίση του ήλιου 48° πάνω από τον ορίζοντα (αυτή η κλίση αποτελεί μία λογική μέση τιμή για τη διάρκεια της ημέρας). Όπως διακρίνεται, τα χαρακτηριστικά του πυριτίου το περιορίζουν στη μετατροπή μέρους, και όχι όλου, του φάσματος της ηλιακής ενέργειας, θέτοντας ένα ανώτατο όριο που προσεγγίζει το 27% όπως αποδεικνύει και ο Green (1998) [1].



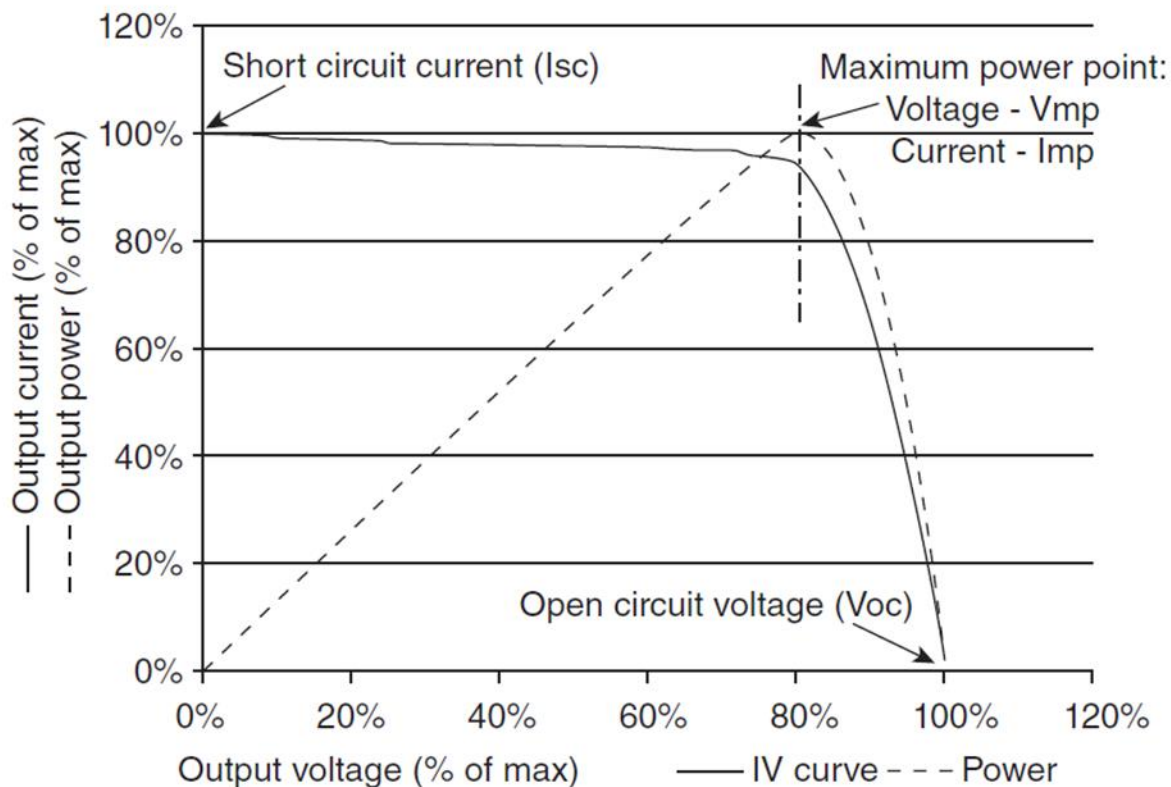
Σχήμα 1.1 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήκος κύματος για AMI 1.5

Σε επίπεδο συσκευής, η φωτοδίοδος μπορεί να μοντελοποιηθεί από το ισόδυναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.2, με την σχέση μεταξύ τάσης και έντασης που φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 1.3 (Καμπύλη IV). Από το αποτέλεσμα των ζευγών I-V μπορεί να εξαχθεί μια καμπύλη ισχύς-έντασης, που κάνει εμφανές ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των συσκευών: για να έχουν την μέγιστη απόδοση, πρέπει να λειτουργούν στην τάση μέγιστης ισχύος τους (V_{mp}). Αυτό το μέγιστο σημείο ισχύος αναζητούν συνεχώς οι μετατροπείς ενέργειας στην περίπτωση ολοκληρωμένων φβ συστημάτων.



Σχήμα 1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

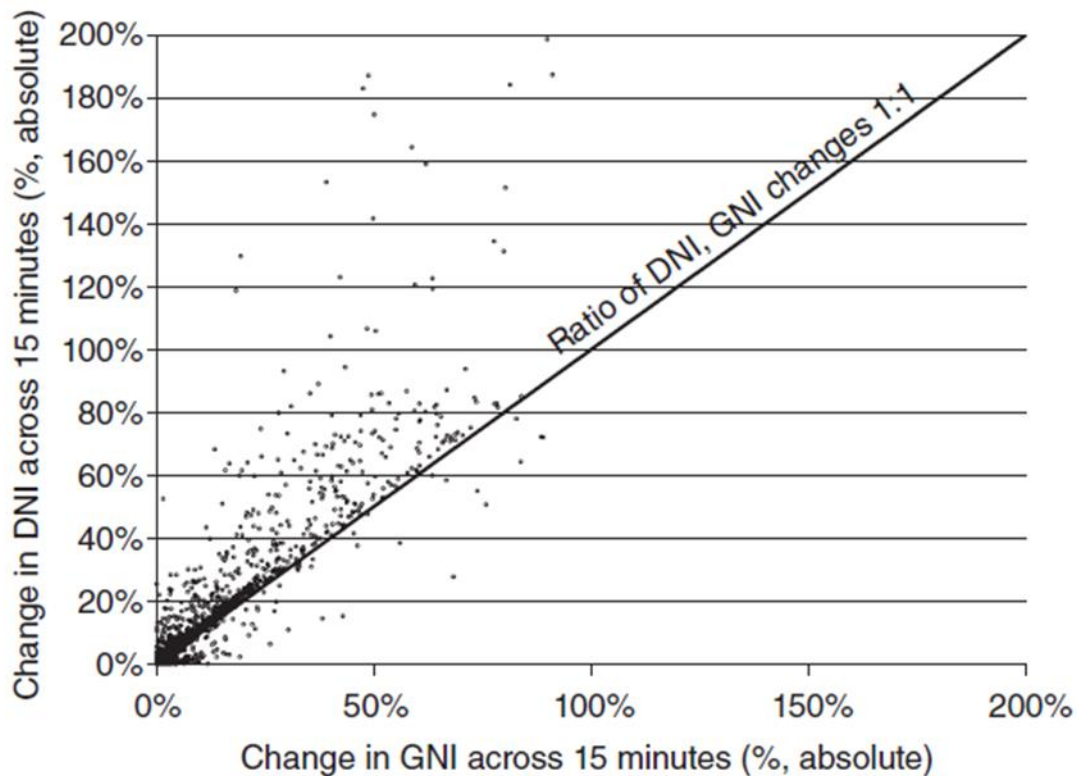
Η ύπαρξη παρασιτικών αντιστάσεων σε σειρά ή σε παραλληλία (οι R_s και R_p στο Σχήμα 1.2) απομακρύνουν την φωτοδίοδο από το ιδανικό σημείο λειτουργίας της. Για την μέτρηση αυτής της απόκλισης από την ιδανικότητα χρησιμοποιείται ο παράγοντας πλήρωσης (fill factor – FF). Το γινόμενο του V_{mp} επί το I_{rs} προς το γινόμενο του V_{oc} με το I_{mp} μας δίνει τον παράγοντα πλήρωσης. Όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο πιο εμφανής είναι η γωνία στο διάγραμμα I-V και τόσο περισσότερο πλησιάζει την ιδανικότητα. Ο FF στην πραγματικότητα ακόμα και για φωτοδιόδους με πολύ χαμηλή R_s και πολύ υψηλή R_p δεν μπορεί να φτάσει την τιμή του 100%. Αυτό οφείλεται αφενός σε διάφορους μηχανισμούς διαρροής στην σύνδεση των ημιαγωγών και αφετέρου σε διάφορες επιμολύνσεις και ατέλειες του κρυσταλλικού υλικού.



Σχήμα 1.3 Καμπύλες IV και ισχύος

Όπως προαναφέρθηκε, τα συγκεντρωτικά συστήματα έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα κοινά φωτοβολταϊκά συστήματα, με την διαφορά ότι τα πάνελ που χρησιμοποιούνται σε αυτά, έχουν συνήθως μεγαλύτερο παράγοντα πλήρωσης από αυτά του πυριτίου.

Η άμεση ακτινοβολία, την οποία αξιοποιούν τα συγκεντρωτικά συστήματα, μεταβάλλεται σε μεγαλύτερο βαθμό, σε σχέση με την συνολική ακτινοβολία, κατά την διάρκεια της ημέρας. Έτσι η μειωμένη γωνία υποδοχής, σε σχέση με τα απλά πάνελ, έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου του συστήματος. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα παρατηρώντας το Σχήμα 1.4, όπου αναπαρίσταται η μεταβολή της άμεσης ακτινοβολίας (DNI) σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή της συνολικής ακτινοβολίας (GNI). Στην πλειοψηφία των μεταβολών της συνολικής ακτινοβολίας παρατηρούμε ότι η άμεση ακτινοβολία επηρεάζεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό.



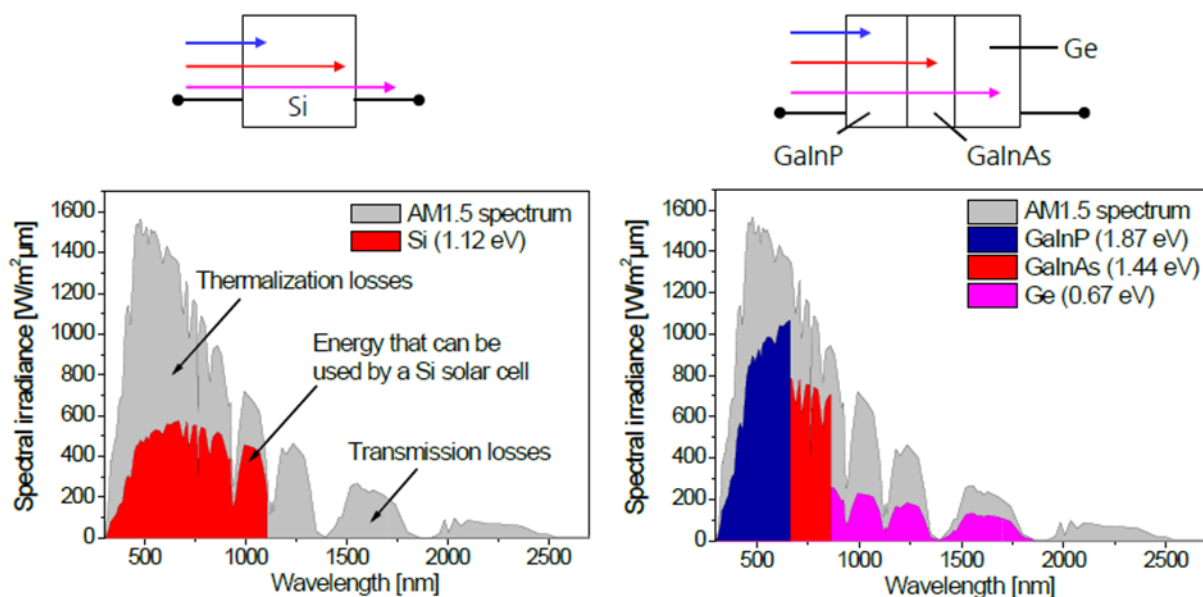
Σχήμα 1.4 Μεταβολή της άμεσης ακτινοβολίας συναρτήσει της μεταβολής της συνολικής ακτινοβολίας.

Όπως όλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα, έτσι και τα συγκεντρωτικά δεν έχουν κάποια εγγενή δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Παράγουν ενέργεια μόνο όταν υπάρχει ήλιος και υποστηρίζονται από άλλα συστήματα ενέργειας όπως το δίκτυο ή κάποια τοπική θερμοηλεκτρική μονάδα. Πρόσφατες έρευνες σε μεγάλης κλίμακας ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζουν ενδιαφέρον ως προς τη βιωσιμότητα τους, ωστόσο στα επόμενα χρόνια συστήματα άμεσης αποθήκευσης ενέργειας ,π.χ. με χρήση υπερπυκνωτών, θα περιορίσουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος της αποθήκευσης.

Καθώς τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν ρυπογόνες μορφές ενέργειας, πρέπει να είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα διαφέρουν από τα συμβατικά σε δύο βασικά στοιχεία. Πρώτον, χρησιμοποιούν μικρότερη ποσότητα φωτοβολταϊκού υλικού. Δεύτερον, στο τέλος ζωής του συστήματος, η πλειοψηφία των εξαρτημάτων που το αποτελούν, όπως το οπτικό σύστημα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, το σύστημα ψύξης και το σύστημα στήριξης και παρακολούθησης του ήλιου, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, κάνοντας τα ανακυκλώσιμα σε πολύ υψηλό βαθμό.

1.2.1. Σύγχρονες φωτοβολταϊκές κυψελίδες

Όπως γίνεται κατανοητό η βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελίδων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της καλύτερης αξιοποίησης του φάσματος των φωτονίων που προσπίπτουν σε αυτές. Για ένα φωτοβολταϊκό κελί που αποτελείται από ένα μόνο ημιαγωγικό υλικό η μέγιστη ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνεται για ένα εύρος του ενεργειακού χάσματος μεταξύ 1.4 και 1.6 eV [2]. Ο ημιαγωγός με το βέλτιστο ενεργειακό χάσμα σε αυτή την περίπτωση είναι το GaAs. Υψηλότερες αποδόσεις μπορούν να επιτευχθούν μόνο με αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αρκετά τμήματα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένας ημιαγωγός με μεγάλο χάσμα για να απορροφήσει τα μικρά μήκη κύματος, ενώ τα μεγαλύτερα μήκη κύματος απορροφώνται από έναν δεύτερο ημιαγωγό με μικρότερο χάσμα. Αυτή η πολυστρωματική διαμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πιο αποδοτικών φωτοβολταϊκών κελιών.

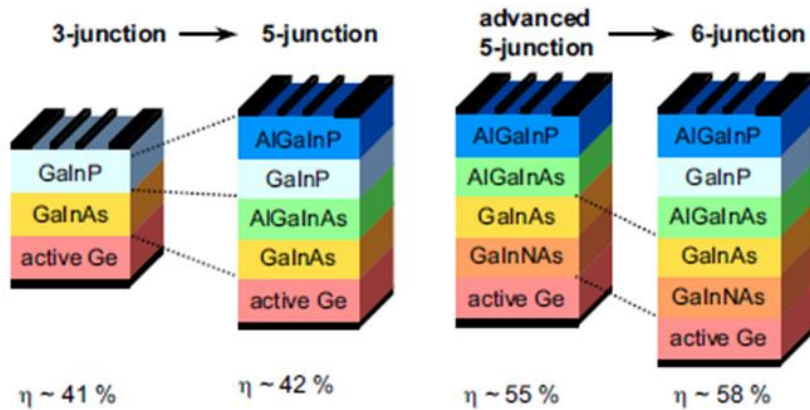


Σχήμα 1.5 Σύγκριση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αξιοποιούν φωτοβολταϊκά κελία τύπου Si και 3-junction III-V

Αυτή η προσέγγιση γίνεται ακόμα πιο ενδιαφέρουσα, αν αυτοί οι τύποι ημιαγωγικών υλικών τοποθετηθούν επιταξιακά στο ίδιο κελί. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται ειδικές δίοδοι για την σειριακή σύνδεση των υπο-κελιών, σχηματίζοντας έτσι ένα κελί που μοιάζει με τα συμβατικά κελία, έχοντας μόνο δυο εξωτερικές ηλεκτρικές συνδέσεις. Το πρόβλημα που εμφανίζονται με αυτά τα κελία είναι ότι η ένταση του ρεύματος περιορίζεται από το υπο-κελί με τη χαμηλότερη ένταση. Ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας βρίσκεται στην κατάλληλη επιλογή των ημιαγωγών, που θα πρέπει να έχουν παρόμοια κρυσταλλική σταθερά. Αυτές οι δύο περιοριστικές συνθήκες μειώνουν τον αριθμό των υποψήφιων υλικών για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού κελιού υψηλής απόδοσης. Μέχρι και σήμερα ο πιο αποδοτική επιλογή συνδυασμού υλικών για πολυστρωματικά κελία 3 βαθμίδων είναι η GaInP/GaInAs/Ge. Στο Σχήμα 1.5 συγκρίνεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που αξιοποιούν κελία αυτής της σύνθεσης με ένα κελί Si.

Καθώς η περεταίρω βελτιστοποίηση των πολυστρωματικών κελιών 3 βαθμίδων δεν είναι εύκολη, δημιουργείται η ανάγκη μιας νέας δομής φωτοβολταϊκών κελιών, που θα περιλαμβάνει παραπάνω από τρεις βαθμίδες. Μια τέτοια πρόταση έχει γίνει από το Ινστιτούτο Fraunhofer ISE, η οποία προτείνει την κατασκευή ενός κελιού 5 βαθμίδων που αποτελείται από τους ημιαγωγούς AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge. Συγκριτικά με το κελί 3 βαθμίδων, το κελί 5 βαθμίδων έχει σημαντικά αυξημένη τάση, αλλά μικρότερη ένταση ρεύματος. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η πορεία εξέλιξης των

πολυστρωματικών φωτοβολταϊκών κελιών, μαζί με τις θεωρητικές τους αποδόσεις, όπως έχουν υπολογιστεί από το πρόγραμμα EtaOpt [3].



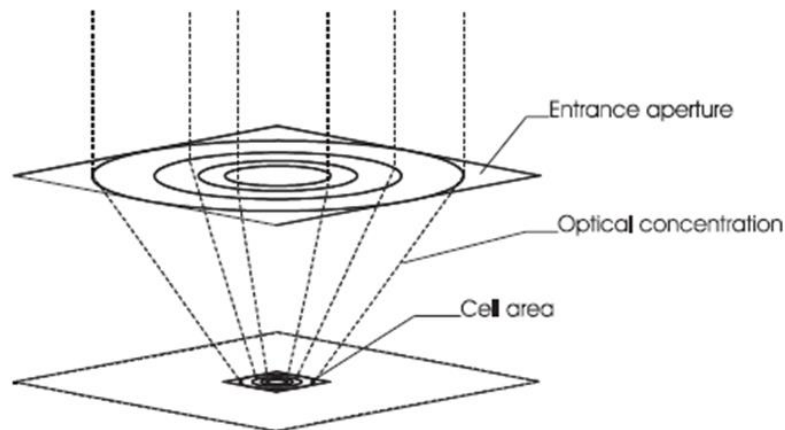
Σχήμα 1.6 Η εξέλιξη των πολυστρωματικών φωτοβολταϊκών κελιών και οι θεωρητικές τους αποδόσεις

1.2.2. Τύποι συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Είναι σκόπιμο να διακριθούν οι διαφορές μεταξύ των διαθέσιμων τύπων συγκεντρωτικών συστημάτων, σύμφωνα με το είδος της γεωμετρίας τους και τον τύπο του συγκεντρωτή [4]. Σε αυτή την εργασία τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίθηκαν σύμφωνα με το είδος της γεωμετρίας τους, καθώς οι απαιτήσεις για την ψύξη τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με αυτή.

Σημειακή Γεωμετρία

Σε συγκεντρωτές μικρού μεγέθους, η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε κάθε κελί ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει πως κάθε φωτοβολταϊκό κελί έχει τόση επιφάνεια διαθέσιμη για το ψυκτικό σύστημα, όσο περίπου και το μέγεθος του συγκεντρωτή, για παράδειγμα στο Σχήμα 1.7 ένα κελί κάτω από συγκέντρωση 50 ήλιων έχει 50 φορές το μέγεθος του σε διαθέσιμη επιφάνεια για να αποβάλει την θερμότητα του.

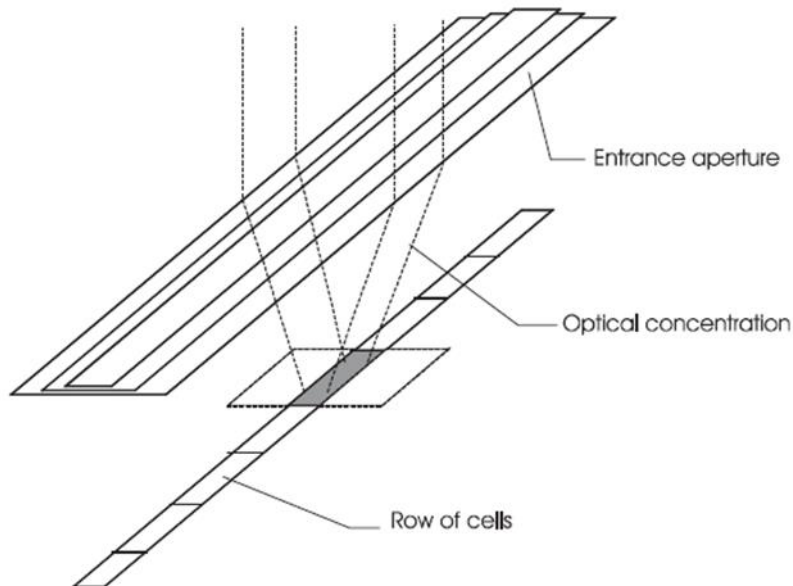


Σχήμα 1.7 Σημειακή γεωμετρία συγκεντρωτικού φβ συστήματος

Έτσι, αυτή η γεωμετρία επιτρέπει την παθητική ψύξη ακόμη και σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Τα συστήματα με μονά κελία συνήθως χρησιμοποιούν διάφορους τύπους φακών για την συγκέντρωση. Μία άλλη εκδοχή είναι η χρήση ενός ανακλαστικού συγκεντρωτή που συσσωρεύει την ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό κελί δια μέσω ενός οπτικού ομογενοποιητή.

Γραμμική γεωμετρία

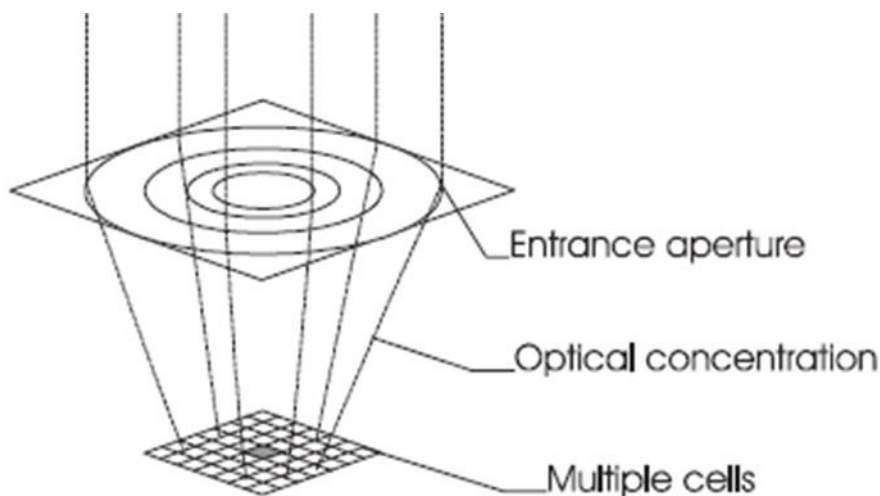
Τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν παραβολικά ανακλαστικά κάτοπτρα ή γραμμικούς φακούς τύπου Fresnel για να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μία γραμμική συστοιχία φωτοβολταϊκών κελιών. Με αυτή την διάταξη τα κελιά έχουν περιορισμένο χώρο για αποβολή θερμότητας καθώς οι δύο πλευρές τους βρίσκονται σε επαφή με γειτονικά κελιά όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Έτσι οι διαθέσιμες περιοχές για αποβολή θερμότητας βρίσκονται στο πίσω μέρος και στις δύο πλαϊνές πλευρές τους.



Σχήμα 1.8 Γραμμική γεωμετρία συγκεντρωτικού φβ συστήματος

Γεωμετρία πυκνής διάταξης

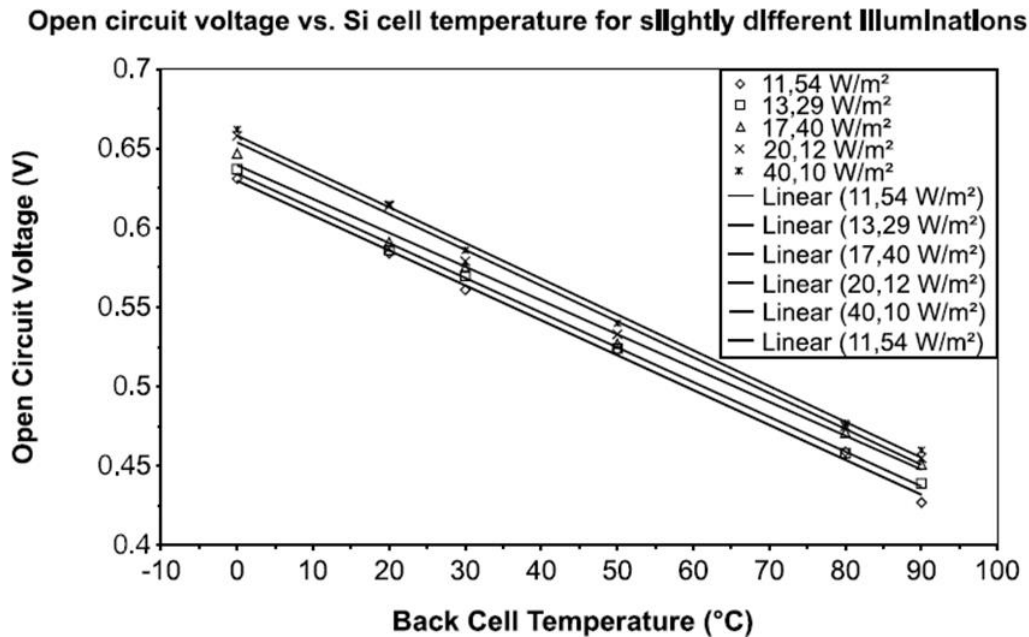
Σε μεγαλύτερα συστήματα σημειακής εστίασης, όπως σε παραβολικά πιάτα και ηλιοστάτες, ο δέκτης συνήθως αποτελείται από πολλά κελιά τοποθετημένα πολύ κοντά μεταξύ τους. Σε αυτά τα συστήματα είτε ο δέκτης τοποθετείται μακρύτερα από το εστιακό σημείο είτε χρησιμοποιείται ένας οπτικός ομογενοποιητής, για μεγαλύτερη ομοιογένεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το πρόβλημα της ψύξης σε αυτή την γεωμετρία είναι εντονότερο σε σχέση με τις δύο προαναφερθείς γεωμετρίες καθώς, αν εξαιρεθούν τα ακριανά κελιά, η μόνη διαθέσιμη επιφάνεια για την αποβολή της θερμότητας βρίσκεται στο πίσω μέρος της διάταξης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.9. Αυτό σημαίνει πως η παθητική ψύξη αυτής της γεωμετρίας δεν είναι εφικτή για συνήθη επίπεδα συγκέντρωσης.



Σχήμα 1.9 Γεωμετρία πυκνής διάταξης συγκεντρωτικού φβ συστήματος

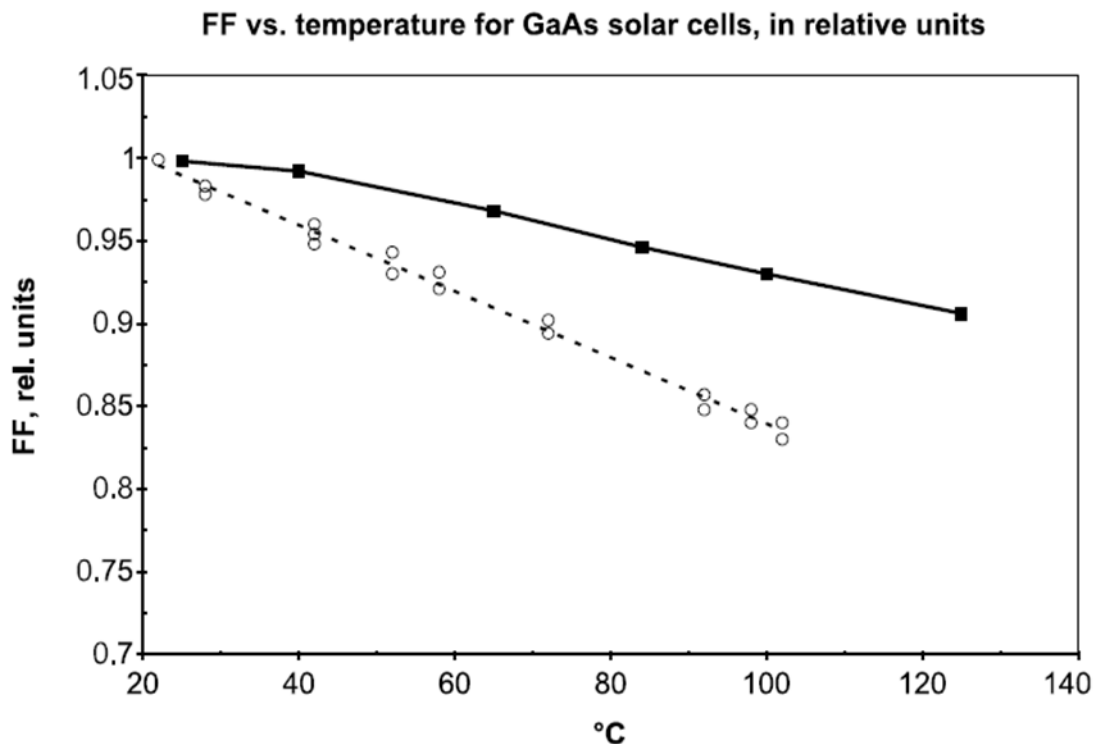
1.3. Απαίτηση Ψύξης Συγκεντρωτικών Κυψελίδων

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) ενός φωτοβολταϊκού κελιού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, σύμφωνα με το οποίο υπάρχει ένα όριο στην απόδοση της μετατροπής ενέργειας από μία πηγή σε καθορισμένη θερμοκρασία, σε έναν δέκτη με πεπερασμένη θερμοκρασία. Ακολουθώντας την μείωση του V_{oc} , η απόδοση του κελιού μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, για μία δεδομένη ένταση ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 1.10 φαίνεται η συμπεριφορά του V_{oc} για κελιά πυριτίου ενός ήλιου σε σχέση με την θερμοκρασία, για ελαφρώς διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας. Η τιμή αυτή εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την διαδικασία παραγωγής του κελιού και από τις ιδιότητες του ημιαγωγού. Ωστόσο η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται γενικά για κάθε είδος ημιαγωγού.



Σχήμα 1.10 Σχέση V_{oc} – Θερμοκρασίας για κελιά πυριτίου

Ο παράγοντας πλήρωσης (FF) του κελιού μειώνεται και αυτός με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η μεταβολή, για ένα κελί τύπου GaAs, φαίνεται στο Σχήμα 1.11



Σχήμα 1.11 Σχέση Παράγοντα πλήρωσης – Θερμοκρασίας για κελιά GaAs

Πρέπει να σημειωθεί πως η θερμοκρασία του κελιού δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την μάζα του. Η μπροστινή βαθμίδα βρίσκεται συνήθως στην πιο ακραία κατάσταση αφενός γιατί βρίσκεται πιο μακριά από την ψυκτική επιφάνεια και αφετέρου γιατί τα φωτόνια με τη μεγαλύτερη ενέργεια απορροφώνται στα πρώτα μη της επιφάνειας του κελιού. Αυτά τα φωτόνια φέρουν ένα μεγάλο ποσό περίσσειας ενέργειας, όσον αφορά την ενέργεια χάσματος, που μετατρέπεται σε θερμότητα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Έτσι, η μείωση της τάσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας του κελιού, από ότι θα περίμενε κανείς από ένα απλό μοντέλο ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας.

Ταυτόχρονα όμως η αύξηση της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας βελτιώνει τη θερμική αγωγιμότητα, περιορίζοντας έτσι την αρνητική επίδραση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, τα HCPV ηλιακά κελιά πυριτίου της εταιρίας Amonix έχουν μια ευαισθησία θερμοκρασίας-τάσης περίπου $-1.78\text{mV} / ^\circ\text{C}$ σε 1 στον ήλιο και $-1.37\text{mV} / ^\circ\text{C}$ και σε 250 ήλιους [4], ενώ για κελιά GaAs είναι $-2.4\text{mV} / ^\circ\text{C}$ και $-1.12\text{mV} / ^\circ\text{C}$ αντίστοιχα.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που σχετίζεται με τα φωτοβολταϊκά κελιά υψηλής συγκέντρωσης είναι η μηχανική καταπόνηση που προκύπτει από την μεταβολή της θερμοκρασίας τους. Η αιτία του προβλήματος εντοπίζεται στο γεγονός ότι το κελί αποτελείται από αρκετά διαφορετικά υλικά, που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και έχουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος, η θερμοκρασία του δέκτη, ενώ ελέγχεται από το σύστημα ψύξης, μεταβάλλεται το λιγότερο λόγω του κύκλου ημέρας/νύχτα. Έτσι οι διάφορες στρώσεις του φωτοβολταϊκού κελιού μεταβάλλονται συνεχώς σε διαστάσεις προκαλώντας συνεχόμενη συσσώρευση και εκτόνωση τάσεων.

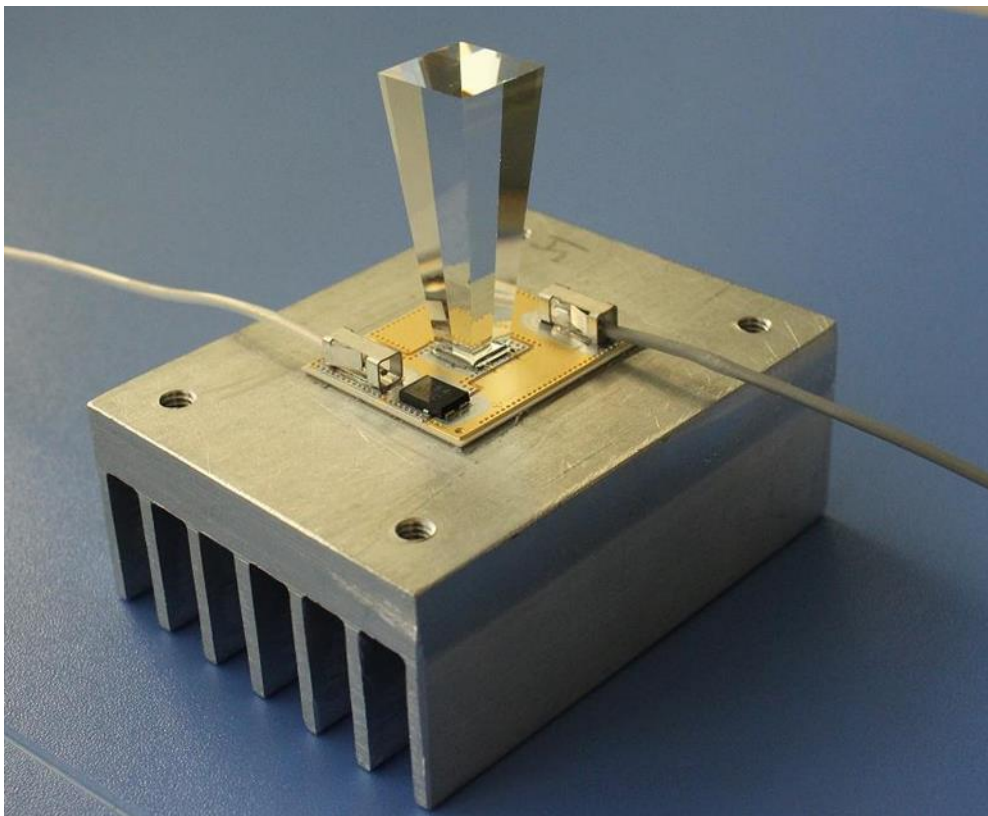
Η συσσώρευση κρίσιμων τάσεων μπορεί να οδηγήσει σε άμεση αστοχία υλικού σε εύθραυστα εξαρτήματα, είτε σε έμμεση αστοχία λόγω της κυκλικής αυξομείωσης υπο-κρίσιμων τάσεων, που προκαλούν κόπωση του υλικού. Η πρώτη κατηγορία προβλημάτων εμφανίζεται σε εξαρτήματα που δεν έχουν τη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης, όπως για παράδειγμα το γυαλί στην μπροστινή επιφάνεια του κελιού. Καθώς το γυαλί είναι γνωστό για την μικρή αντοχή του στις θερμο-μηχανικές καταπονήσεις και για τον σχετικά μεγάλο συντελεστή θερμικής διαστολής του, είναι υποχρεωτική η αποφυγή έκθεσης του σε μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές (πχ αποφυγή της επαφής του με ψυχρά εξαρτήματα και κάτω από μεγάλες

περιοχές μερικής σκίασης). Ακόμη θα πρέπει να υπάρχουν κενά (πιθανόν γεμισμένα με κάποια μαλακή ρητίνη) που να επιτρέπουν την διαστολή του γυαλιού.

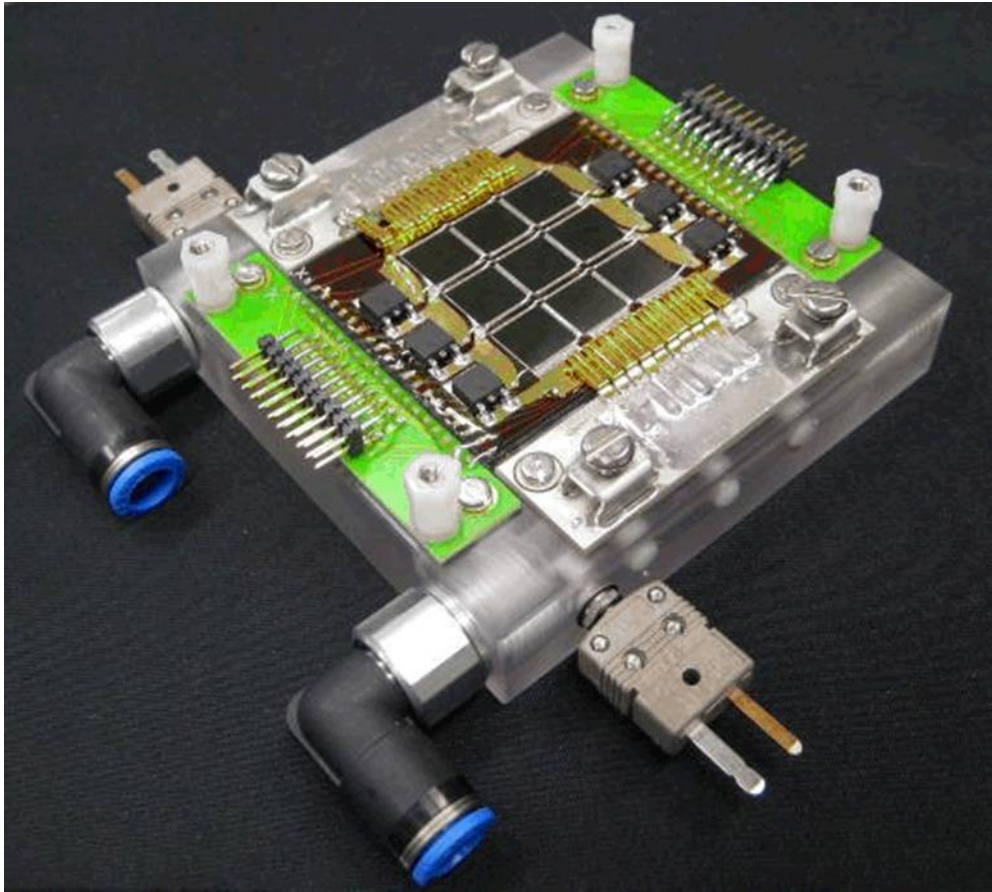
Η αναπόφευκτη κυκλική εναλλαγή της θερμοκρασίας εφιστά την προσοχή σε προβλήματα που αφορούν τη κόπωση κάποιων εξαρτημάτων του φωτοβολταϊκού κελιού. Η κόπωση συχνά δημιουργεί και επεκτείνει μικρο-ρωγμές και κενά, κάτι το οποίο αποτελεί γενικό πρόβλημα κατά το σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Τα πιο σημαντικά προβλήματα εντοπίζονται στο σημείο συγκόλλησης του κελιού με το υπόστρωμα του (PCB).

1.4. Στρατηγικές Ψύξης Συγκεντρωτικών Κυψελίδων

Η ψύξη των φωτοβολταϊκών κελιών αποτελεί ένα από τα κύρια προβλήματα σχεδιασμού στα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα, και αυτό γιατί μόνο ένα μικρό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κελί μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η υπόλοιπη μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα αυτή μπορεί να απομακρυνθεί από το φωτοβολταϊκό κελί με χρήση ενός παθητικού ή ενεργητικού συστήματος ψύξης. Στα παθητικά συστήματα ψύξης (Σχήμα 1.12), η θερμότητα απομακρύνεται μέσω φυσικής συναγωγής, ενώ στα ενεργητικά συστήματα (Σχήμα 1.13) μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής. Καθώς τα παθητικά συστήματα είναι απλά, αξιόπιστα, δεν χρειάζονται συντήρηση και δεν καταναλώνουν ενέργεια, συνήθως προτιμούνται από τα ενεργητικά. Παρόλα αυτά, όταν η θερμότητα που πρέπει να απομακρυνθεί γίνεται σημαντική, για παράδειγμα όταν έχουμε κελιά σε πυκνή διάταξη και σε μεγάλη ηλιακή συγκέντρωση, η αποδοτική απομάκρυνση της γίνεται με ενεργητικά συστήματα.



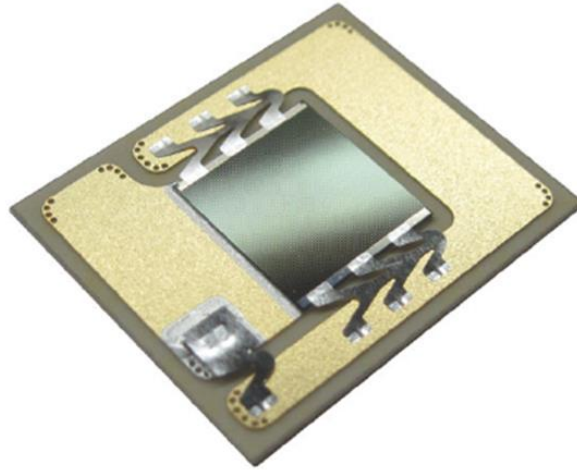
Σχήμα 1.12 Φωτοβολταϊκή κυψελίδα με ομογενοποιητή τοποθετημένη σε παθητικό σύστημα ψύξης



Σχήμα 1.13 Συστοιχία φωτοβολταϊκών κυψελίδων τοποθετημένες σε βάση ενεργητικού συστήματος ψύξης

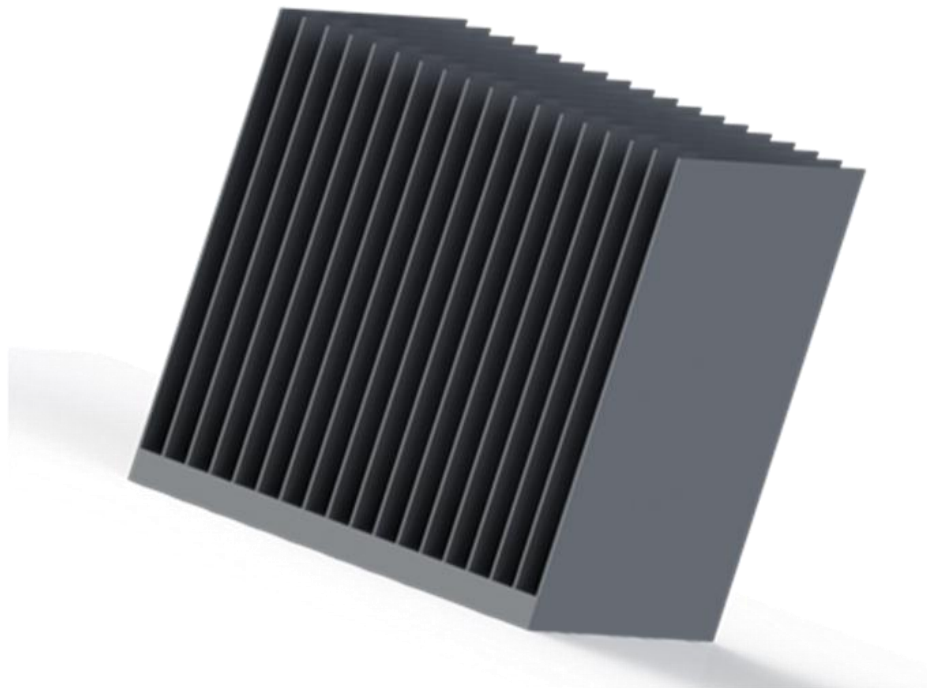
1.5. Περιγραφή Συστήματος προς Μελέτη

Στην εργασία αυτή, έγινε προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού κελιού υψηλής συγκέντρωσης **CCA 100 C3MJ** της εταιρείας **Spectrolab**, κάτω από συνθήκες συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Το φωτοβολταϊκό κελί εικονίζεται στο Σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14 Η φωτοβολταϊκή κυψελίδα υψηλής συγκέντρωσης **CCA 100 C3MJ** της εταιρείας **Spectrolab**

Για την ψύξη αυτού του κελιού χρησιμοποιήθηκε μια κοινή μεταλλική ψύκτρα φυσικής κυκλοφορίας (Σχήμα 1.15) που παραμετροποιήθηκε κατάλληλα για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός της ψύκτρας έγινε σύμφωνα με το πλέον αντίξοο σενάριο έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, που ανταποκρίνεται στις ελληνικές κλιματολογικές συνθήκες.



Σχήμα 1.15 Ψύκτρα φυσικής κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκε

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας

Θερμότητα είναι η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος (ή μεταξύ δύο συστημάτων), από τη θερμότερη προς της ψυχρότερη περιοχή, εξαιτίας της μεταξύ τους θερμοκρασιακής διαφοράς. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα τείνει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, με αποκατάσταση μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας σε όλες τις περιοχές του, με την προϋπόθεση βέβαια ότι δεν έχουμε κάποια παραγωγή θερμότητας στο σύστημα αυτό. Στην περίπτωση ύπαρξης σταθερής πηγής θερμότητας, το σύστημα έρχεται σε ισορροπία έχοντας μία θερμοκρασιακή κατανομή. Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας διακρίνονται σε τρεις βασικούς : αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία [5].

2.1.1 Αγωγή

Ο όρος αγωγή ή διάχυση θερμότητας χρησιμοποιείται όταν η θερμοκρασία μεταφέρεται σε ένα υλικό λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς χωρίς να υπάρχει μακροσκοπική μετακίνηση της μάζας του υλικού, παρόλο που τα μόρια κινούνται σύμφωνα με τη θεωρία της μοριακής δομής της ύλης.

Νόμος Fourier

Παρατηρείται πειραματικά ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογος του πάχους του υλικού μέσα από το οποίο πραγματοποιείται η μεταφορά. Η βασική μαθηματική σχέση που συνδέει την ροή θερμότητας με την βαθμίδα θερμοκρασίας διέπεται από τον νόμο του Fourier για την αγωγή και σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων έχει την ακόλουθη μορφή:

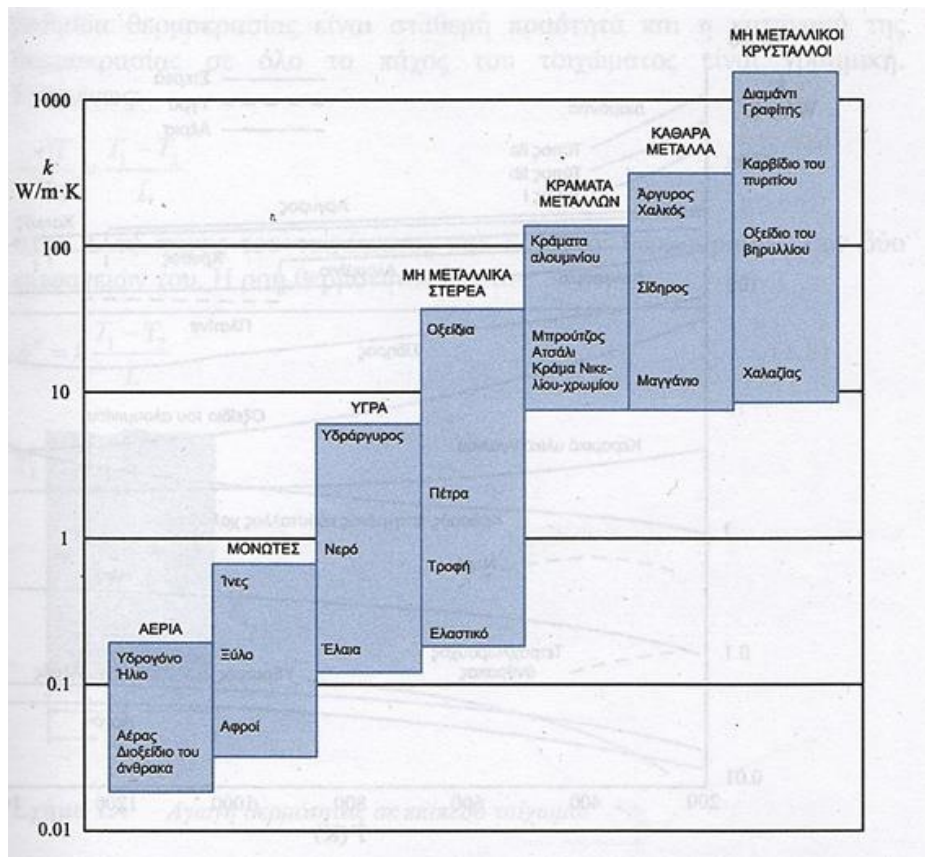
$$\frac{dq''}{dt} = -k \left[\mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής αναλογίας k στην εξίσωση Fourier είναι χαρακτηριστική θερμοφυσική ιδιότητα του υλικού και ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Το αρνητικό πρόσημο εμφανίζεται επειδή σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, η θερμότητα άγεται από την περιοχή των υψηλών στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών, δηλαδή κατά την διεύθυνση της αρνητικής θερμοκρασιακής βαθμίδας.

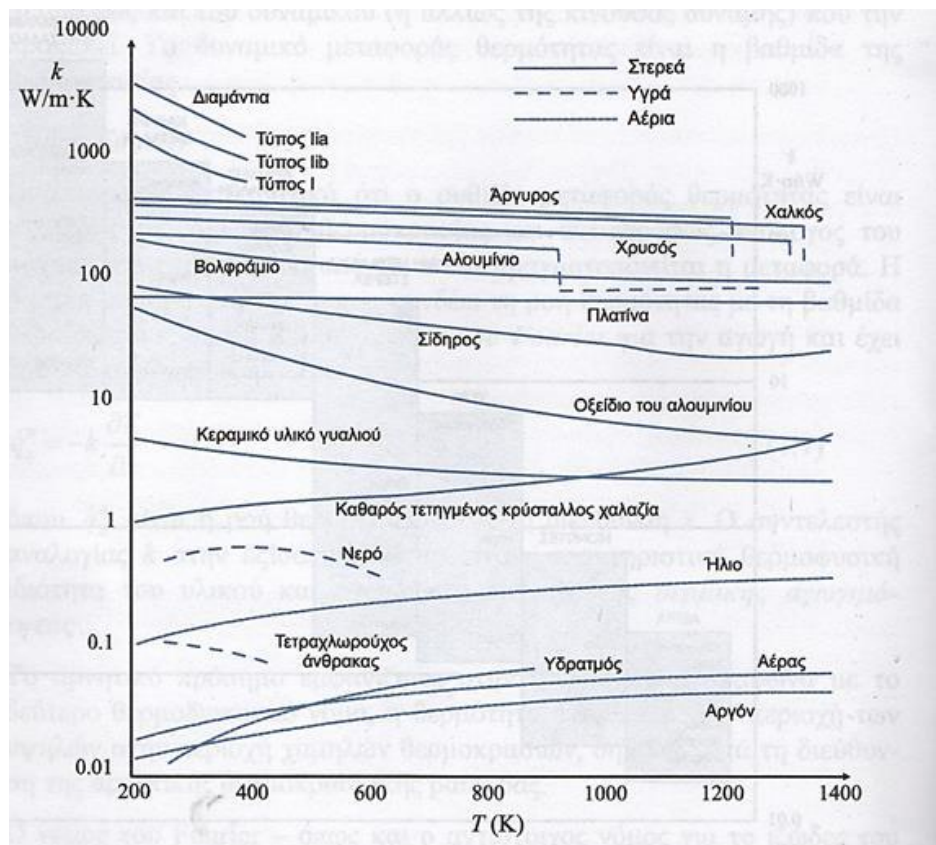
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει μονάδες (στο σύστημα SI) W/mK. Η τιμή του k μπορεί για αέρια σε χαμηλές πιέσεις μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κινητική θεωρία των αερίων. Για αέρια σε υψηλότερες πιέσεις και για υγρά, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις μικρότερης ακρίβειας. Σε πρακτικούς υπολογισμούς χρησιμοποιούνται συνήθως πειραματικά μετρημένες τιμές. Στο Σχήμα 2.1 δίνονται τα εύρη τιμών του k για διάφορους τύπους υλικών.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υλικών μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Η μεταβολή σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών είναι σημαντική για μερικά υλικά και αμελητέα για άλλα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Για τις θερμικές εφαρμογές που εμφανίζονται στις περισσότερες εφαρμογές και για τα συνηθισμένα υλικά, μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί ότι η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι σταθερή.



Σχήμα 2.1 Εύρος τιμών του συντελεστή αγωγιμότητας διαφόρων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου



Σχήμα 2.2 Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων στερεών, υγρών και αερίων με την θερμοκρασία

2.1.2 Συναγωγή

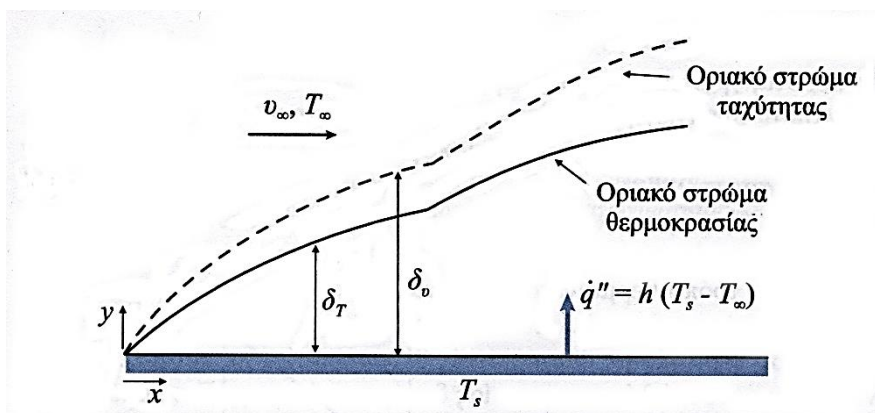
Στα ρευστά η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται και με τον μηχανισμό της συναγωγής λόγω της κίνησης τους. Συναγωγή εμφανίζεται όταν ένα ρευστό ρέει λόγω επιβολής εξωτερικών αιτιών (εξαναγκασμένη κυκλοφορία), αλλά και ακόμα και όταν ένα ρευστό θερμαίνεται (ή ψύχεται) όντας «ακίνητο» σε ένα χώρο. Στην δεύτερη περίπτωση, το ρευστό που έρχεται σε επαφή με τα θερμά τοιχώματα ή, που κατά οποιοδήποτε τρόπο θερμαίνεται, εμφανίζει άνοδο της θερμοκρασίας του και κατά συνέπεια διαστέλλεται. Προκαλείται έτσι διαφορά πυκνότητας ανάμεσα σε περιοχές με διαφορετικές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την κίνηση του ρευστού λόγω παρουσίας δυνάμεων άνωσης. Για παράδειγμα, όταν θερμαίνεται νερό σε ένα δοχείο, οι μάζες του υγρού που είναι στον πυθμένα θερμαίνονται πρώτες, κινούνται προς τα πάνω ενώ ταυτόχρονα ψυχρές μάζες παίρνουν την θέση τους πάνω στην θερμαινόμενη επιφάνεια. Η κίνηση αυτή του ρευστού, που οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας, ονομάζεται φυσική κυκλοφορία.

Σε ένα ρευστό, στο οποίο αναπτύσσονται θερμοκρασιακές διαφορές εμφανίζεται πάντοτε μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, εκτός αν ο χώρος που καταλαμβάνει είναι τόσο περιορισμένος ώστε να μην επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση του, όπως π.χ. όταν το ρευστό βρίσκεται στους πόρους ενός στερεού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά είναι πορώδη και παγιδεύουν αέρα μέσα στους πόρους τους. Ο αέρας έχει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τα στερεά υλικά και για τον λόγο αυτό το υλικό εμφανίζεται ως δυσθερμαγωγό.

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται πολύ συχνά στην πράξη είναι η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και του κινούμενου ρευστού που την περιβάλλει. Η μεταφορά θερμότητας μέσα στο ρευστό πραγματοποιείται τότε και με μηχανισμό συναγωγής και με μηχανισμό αγωγής (ο μηχανισμός αγωγής είναι ιδιαίτερα σημαντικός στερεά στρώματα ρευστού που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια και έχουν μικρή ταχύτητα). Είναι όμως κοινή πρακτική το να χρησιμοποιείται ο όρος συναγωγή και για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ επιφάνειας και ρευστού. Η περίπτωση αυτή θα αναλυθεί στην συνέχεια.

Οριακό στρώμα ταχύτητας και θερμοκρασίας

Έστω η οριζόντια, θερμή επιφάνεια του Σχήματος 2.3 πάνω από την οποία κινείται ρεύμα αέρα με ταχύτητα u_∞ και θερμοκρασία T_∞ , μικρότερης της θερμοκρασίας της στερεής επιφάνειας T_s . Το στρώμα του αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια (στην θέση $y = 0$) έχει ταχύτητα μηδέν και μπορεί να θεωρηθεί ότι η θερμοκρασία του είναι η ίδια με την θερμοκρασία της επιφάνειας. Εξαιτίας των ιξωδών δυνάμεων που εμφανίζονται στον αέρα, αναπτύσσεται ένα οριακό στρώμα ταχύτητας, πάχους δ_v , πάνω από το οποίο η ταχύτητα παραμένει ίση με u_∞ . Το πάχος του οριακού στρώματος δεν είναι σταθερό αλλά αυξάνεται κατά μήκος της πλάκας (στη διεύθυνση x).



Σχήμα 2.3 Ανάπτυξη οριακού στρώματος θερμοκρασίας και ταχύτητας κατά τη ροή ρευστού πάνω από θερμαινόμενη επιφάνεια

Θερμότητα μεταφέρεται από την επιφάνεια προς το πρώτο (ακίνητο) στρώμα αέρα με αγωγή, μηχανισμός που επικρατεί στα στρώματα κοντά στην επιφάνεια. Καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια, η ταχύτητα γίνεται σημαντική και η θερμότητα μεταφέρεται λόγω κίνησης του αέρα. Ταυτόχρονα, οι δυνάμεις ιξώδους εξασθενούν και ο αέρας κινείται πιο ελεύθερα. Έτσι, ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή, δηλαδή μάζες θερμού αέρα φεύγουν από την περιοχή υψηλών θερμοκρασιών κοντά στην επιφάνεια και μεταφέρουν την θερμική τους ενέργεια στη μάζα του αέρα που βρίσκεται μακριά από την επιφάνεια.

Η θερμοκρασία του αέρα πλησιάζει την οριακή της τιμή T_∞ σε μικρή σχετικά απόσταση από την επιφάνεια. Αναπτύσσεται δηλαδή ένα οριακό στρώμα θερμοκρασίας αντίστοιχο με το οριακό στρώμα ταχύτητας. Το πάχος δ_T του οριακού στρώματος θερμοκρασίας δεν είναι γενικά ίδιο με το πάχος του οριακού στρώματος ταχύτητας.

Αν είναι γνωστή η κατανομή της θερμοκρασίας, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την βαθμίδα θερμοκρασίας στη θέση $y = 0$ (δηλαδή στη θέση όπου ο μόνος μηχανισμός είναι η αγωγή και ισχύει ο νόμος Fourier). Η κατανομή της θερμοκρασίας όμως, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ροής του ρευστού (γεωμετρία, ταχύτητα, ιξώδες, πυκνότητα). Εξαρτάται επιπλέον από τις ιδιότητες του ρευστού που έχουν σχέση με την μεταφορά θερμότητας, δηλαδή από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και από την ειδική θερμότητα. Επομένως, στην επίλυση των προβλημάτων συναγωγής θερμότητας θα πρέπει παράλληλα να αναλυθεί και το πρόβλημα ροής, το οποίο επιδέχεται αυστηρή μαθηματική επίλυση μόνο σε ορισμένες απλές περιπτώσεις (π.χ. στρωτή ροή, απλή γεωμετρία).

Νόμος ψύξης του Newton

Ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες των μηχανισμών και την πολυπλοκότητα των φαινομένων, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του δυναμικού, δηλαδή της διαφοράς θερμοκρασίας $T_s - T_\infty$ από τη σχέση :

$$\frac{dq''}{dt} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Ο παράγων αναλογίας h ονομάζεται συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, ή για συντομία συντελεστής συναγωγής.

Συντελεστής συναγωγής

Ο συντελεστής συναγωγής έχει μονάδες (στο διεθνές σύστημα SI) W/m^2K . Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής (ταχύτητα, γεωμετρία) και από τις ιδιότητες του ρευστού (αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα, ιξώδες και πυκνότητα). Ο ορισμός του σε απλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει με αυστηρά μαθηματική ανάλυση των βασικών εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας. Σε πιο πολύπλοκα προβλήματα χρησιμοποιούνται ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν βασιστεί σε πειραματικά δεδομένα.

Μια μεταβολή της θερμοκρασίας της επιφάνειας ή της θερμοκρασίας του ρευστού επηρεάζει τις τιμές των ιδιοτήτων και πολλές φορές (π.χ. στη φυσική κυκλοφορία) το πεδίο της ροής. Κατά συνέπεια ο συντελεστής συναγωγής εξαρτάται από την θερμοκρασία και έτσι μια αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας $T_s - T_\infty$ δεν θα προκαλέσει μια απολύτως ανάλογη αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Όμως, όπως και στην περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, επιλέγεται μια γραμμική σχέση μεταξύ του ρυθμού μεταφοράς και του δυναμικού για να γίνει εφικτή η αναλυτική επίλυση των προβλημάτων. Το πρόβλημα της μη-γραμμικότητας παρακάμπτεται με την επιλογή μιας μέσης τιμής για το συντελεστή μεταφοράς h .

Ακόμα και στην περίπτωση που η διαφορά θερμοκρασίας παραμένει σταθερή η ανάπτυξη του οριακού στρώματος έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της θερμοκρασιακής βαθμίδας και, επομένως, της ροής θερμότητας και του συντελεστή συναγωγής, κατά μήκος της επιφάνειας. Η (2.2) έχει εφαρμογή σε κάθε θέση x της πλάκας και ορίζει τον τοπικό συντελεστή συναγωγής. Η ίδια εξίσωση, όμως, μπορεί να

εφαρμοστεί σε όλη την επιφάνεια όταν τα $\frac{dq''}{dt}$ και h αντιπροσωπεύουν τη μέση ροή θερμότητας και το μέσο συντελεστή συναγωγής στην επιφάνεια. Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από επιφάνεια εμβαδού A στο ρευστό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{dq}{dt} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Πολλές φορές οι συνθήκες του προβλήματος είναι τέτοιες που δεν επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό του h . Έστω ότι ζητείται ο συντελεστής μεταφοράς συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια ενός τοίχου στον ατμοσφαιρικό αέρα. Είναι γνωστή η σχέση που υπάρχει μεταξύ του h και της ταχύτητας του αέρα, αλλά δεν είναι γνωστή η ταχύτητα του αέρα, η οποία μεταβάλλεται κάθε στιγμή. Στις περιπτώσεις αυτές, χαρακτηριστικές τιμές έχουν μετρηθεί κάτω από παρόμοιες συνθήκες, και μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία δίνοντας συχνά ρεαλιστικότερα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς. Τυπικές τιμές της τάξης μεγέθους του συντελεστή συναγωγής σε πρακτικές εφαρμογές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγής

Πεδίο ροής	H (W/m ² K)
Φυσική κυκλοφορία – Αέριο	2 – 25
Φυσική κυκλοφορία – Υγρό	10 – 1000
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία – Αέριο	25 – 250
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία – Υγρό	50 – 20000
Βρασμός και συμπύκνωση	2500 - 100000

2.1.3 Ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται και απορροφάται από όλα τα στερεά σώματα, σε όποια θερμοκρασία και αν βρίσκονται. Ακτινοβολία επίσης εκπέμπουν και ακτινοβολούν τα υγρά και ορισμένα αέρια. Η μέγιστη θερμική ισχύς που είναι δυνατό να ακτινοβολεί ένα σώμα ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τον νόμο των Stefan – Boltzman :

$$\frac{dq''}{dt} = \sigma T_s^4 \quad (2.4)$$

Και η ολική θερμική ισχύς που εκπέμπει μια επιφάνεια σε εμβαδόν A

$$\frac{dq}{dt} = A\sigma T_s^4 \quad (2.5)$$

Όπου T_s η απόλυτη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος και σ η σταθερά των Stefan – Boltzman ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

Ένα σώμα που εκπέμπει την μέγιστη δυνατή θερμική ισχύ, ονομάζεται μέλαν σώμα. Η θερμική ισχύς που ακτινοβολεί μια επιφάνεια είναι συνήθως μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος και δίνεται από την σχέση :

$$\frac{dq''}{dt} = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (2.6)$$

Όπου ε είναι ένας συντελεστής, γνωστός και ως συντελεστής εκπομπής, που μπορεί να παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και εκφράζει την απόδοση σε θερμική εκπομπή της επιφάνειας σε σχέση με την εκπομπή του μέλανος σώματος.

Συνήθως στις εφαρμογές δεν ενδιαφέρει ο ρυθμός εκπομπής αλλά ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ακτινοβολίας που εκπέμπει το σώμα και εκείνης που απορροφά. Για τον υπολογισμό της θερμότητας που ανταλλάσσεται με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, εκτός από τους συντελεστές εκπομπής και απορρόφησης της κάθε επιφάνειας, η σχετική θέση των δύο επιφανειών που καθορίζει το ποσοστό της θερμότητας που ακτινοβολείται από μια επιφάνεια με εμβαδόν A_1 και που προσπίπτει πάνω σε άλλη επιφάνεια με εμβαδόν A_2 και το αντίστροφο. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από την απόσταση και τον προσανατολισμό των δύο επιφανειών. Για την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο επιφανειών με εμβαδά A_1 και A_2 , και με συντελεστές εκπομπής ε_1 και ε_2 αντίστοιχα, ισχύει η ακόλουθη σχέση :

$$\frac{dq_{12}}{dt} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.7)$$

Ο συντελεστής F_{12} , που δείχνει ποιο ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπει η μία επιφάνεια απορροφάται από την άλλη, δίνεται (για τον χώρο δύο επιφανειών) από την σχέση :

$$\frac{1}{A_1 F_{12}} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} \quad (2.8)$$

Όπου F_{1-2} είναι ο γεωμετρικός συντελεστής, που εκφράζει το ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας της επιφάνειας A_1 που προσπίπτει στην A_2 και εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του συστήματος.

Μια περίπτωση που εμφανίζεται συχνά στην πράξη είναι η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ μιας μικρής επιφάνειας με εμβαδόν A και θερμοκρασία T_s και μιας μεγαλύτερης ισοθερμοκρασιακής επιφάνειας που περιβάλλει πλήρως την πρώτη. Η περιβάλλουσα επιφάνεια μπορεί να είναι π.χ. τα τοιχώματα του χώρου όπου βρίσκεται η επιφάνεια A , η θερμοκρασία των οποίων T_{sur} είναι διαφορετική της T_s . Στην ειδική αυτή περίπτωση η ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια απορροφάται τελικά εξ ολοκλήρου από το περιβάλλον. Το περιβάλλον λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ως μέλαν σώμα που απορροφά όλη την ενέργεια που δέχεται ($\varepsilon_2 = 1$). Επειδή, επιπλέον όλη η θερμότητα που εκπέμπει η επιφάνεια προσπίπτει στο περιβάλλον έπεται ότι $F_{12} = 1$. Με αντικατάσταση στην (2.8) προκύπτει ότι $F_{12} = \varepsilon_1 = \varepsilon$ και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια στο περιβάλλον δίνεται από την σχέση :

$$\frac{dq}{dt} = A \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.9)$$

2.2 Ανάλυση θερμικών αντιστάσεων σε μια ψύκτρα

Οι ψύκτρες μπορούν να περιγραφούν ως θερμικές αντιστάσεις, οι οποίες μπορούν να έχουν αρκετά περίπλοκη μοντελοποίηση. Για μία απλή αναλυτική προσέγγιση, όπου δεν περιλαμβάνονται παραπάνω από μία πηγές θερμότητας, η μονοδιάστατη ανάλυση του μοντέλου θερμικών αντιστάσεων είναι αρκετά εύχρηστη [6].

Σε αυτό το σύστημα αντιστάσεων σε σειρά, η συνολική αντίσταση R μπορεί να αναλυθεί σε τρεις θερμικές αντιστάσεις R_{sa} , R_{cs} και R_{jc} .

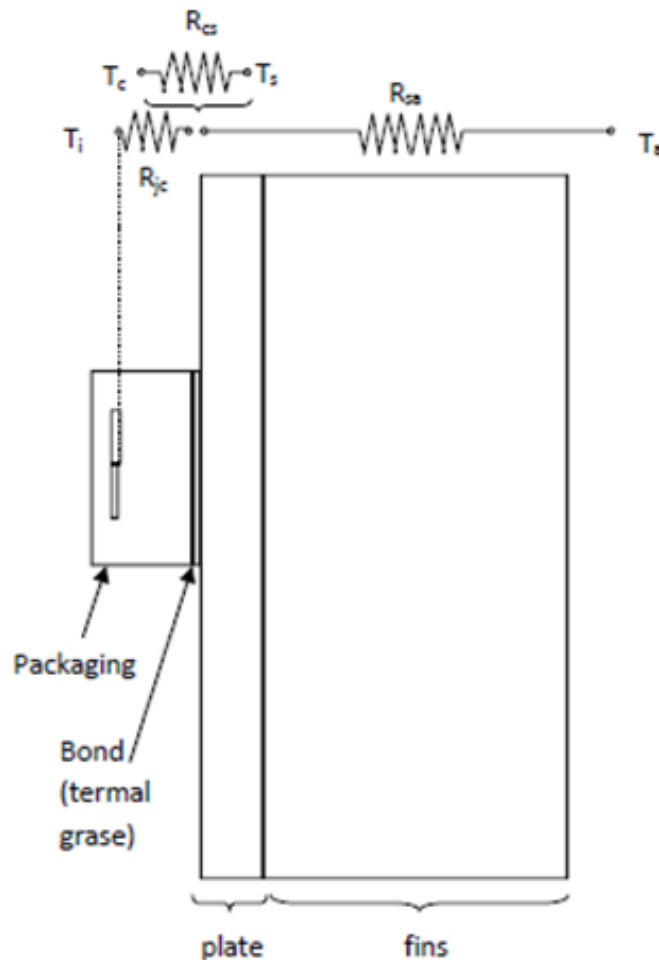
$$R = R_{sa} + R_{cs} + R_{jc} \quad (2.10)$$

Η R_{jc} είναι η αντίσταση μεταξύ της επιφάνειας της συσκευής και του στρώματος του ημιαγωγού. Η αντίσταση αυτή συνήθως δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρία.

Η R_{cs} είναι η αντίσταση μεταξύ της συσκευής και της επιφάνειας της ψύκτρας. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από παράγοντες όπως η μέθοδος συναρμολόγησης, η τραχύτητα των επιφανειών καθώς και ο τύπος της

θερμοαγωγίμης πάστας που τοποθετείται. Συνήθως έχει πάρα πολύ μικρή τιμή και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στα περισσότερα μοντέλα.

Η R_{sa} είναι η αντίσταση μεταξύ της επιφάνειας της ψύκτρας που έρχεται σε επαφή με την συσκευή, και του περιβάλλοντος. Αποτελεί δηλαδή την θερμική αντίσταση της ψύκτρας και περιλαμβάνει τις αντιστάσεις αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Η αγωγή και η ακτινοβολία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και με την συναγωγή, για τον υπολογισμό της οποίας απαιτούνται ημιεμπειρικές σχέσεις που μπορούν να διαφέρουν κατά πολύ ανάλογα τον συγγραφέα και τις συνθήκες ροής. Οι αντιστάσεις αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Θερμικές αντιστάσεις R_{sa} , R_{cs} και R_{jc}

2.2.1 Θερμική αντίσταση ψύκτρας

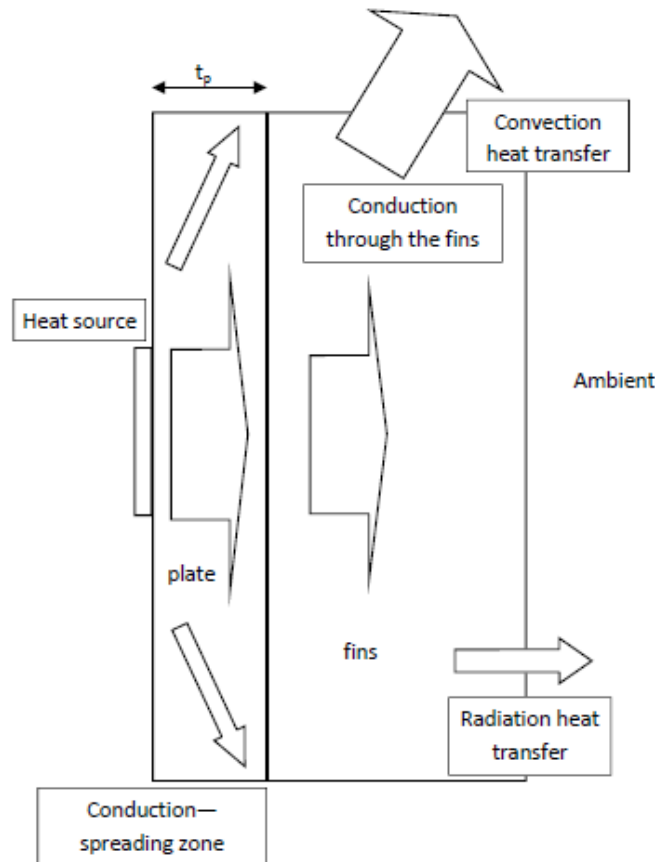
Η ψύκτρα μπορεί να αναλυθεί σε τρεις επιμέρους θερμικές αντιστάσεις

$$R_{sa} = R_{bf} + R_{sp} + R_{fa} \quad (2.11)$$

Η R_{bf} είναι η αντίσταση λόγω της περιορισμένης αγωγής μιας επίπεδης επιφάνειας όταν μια ομοιόμορφη θερμική ροή εφαρμόζεται κάθετα σε μία επιφάνεια.

Η R_{sp} είναι η αντίσταση λόγω της διάχυσης της θερμότητας. Όταν μια ροή θερμότητας περνάει από πηγή θερμότητας $S1$ σε μία επιφάνεια απαγωγής $S2$ και $S2 > S1$, τότε η ροή θερμότητας παύει να είναι αυστηρά κάθετη, και έτσι εμφανίζεται μια αντίσταση διάχυσης.

Η R_{fa} είναι αντίσταση μεταξύ της βάσης της ψύκτρας και του περιβάλλοντος. Η θερμότητα αποβάλλεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Τα πτερύγια έχουν και αυτά μία θερμική αντίσταση αγωγής. Οι ροές αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Ροές θερμότητας σε μια συνήθη ψύκτρα

2.2.2 Αντίσταση αγωγής της πλάκας, R_{bf}

Η αντίσταση αυτή μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση 12

$$R_{bf} = \frac{t_p}{k A} \quad (2.12)$$

όπου το k είναι η αγωγιμότητα της πλάκας ($W/k m$), A το εμβαδόν της επιφάνειας αγωγής (m^2), και t_p το πάχος της πλάκας (m).

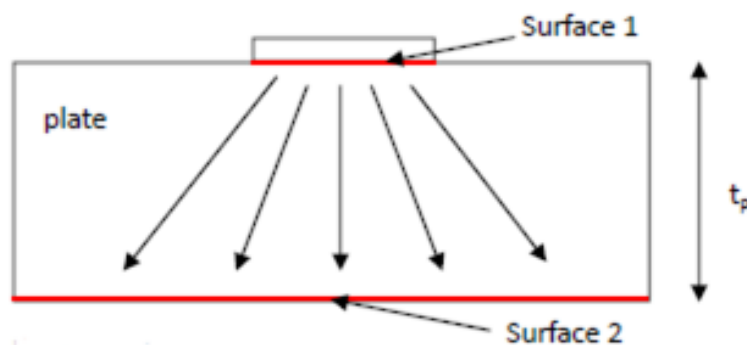
2.2.3 Αντίσταση λόγω διάχυσης : R_{sp}

Η αντίσταση R_{sp} εμφανίζεται λόγω της διάχυσης της θερμότητας κατά το πάχος της πλάκας. Η πλάκα έχει δύο πλευρές. Στην μία πλευρά υπάρχει η πηγή θερμότητας, και στην άλλη τα πτερύγια που αποβάλλουν την θερμότητα. Συνήθως η επιφάνεια της πηγής είναι μικρότερη από την επιφάνεια της πλάκας. Έτσι η διεύθυνση της θερμότητας παύει να είναι κάθετη προς την πλάκα, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται αυτή η αντίσταση διάχυσης (Σχήμα 2.6).

Σύμφωνα με τους Yovanovich και Antonetti [6] η αντίσταση διάχυσης όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της βάσης της ψύκτρας υπολογίζεται ως :

$$R_{sp} = \frac{1 - 1.410\varepsilon + 0.344\varepsilon^3 + 0.043\varepsilon^5 + 0.034\varepsilon^7}{4ka} \quad (2.13)$$

Όπου ε , ο λόγος της επιφάνειας 1 προς την επιφάνεια 2, k η αγωγιμότητα της πλάκας (W/mK) και a τετραγωνική ρίζα του εμβαδού της επιφάνειας 1: $a = \sqrt{\text{επιφάνεια 1}}$.



Σχήμα 2.6 Διάχυση θερμότητας στην βάση της ψύκτρας

2.2.4 Η αντίσταση R_{fa}

Η αντίσταση που εμφανίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια που στηρίζονται τα πτερύγια και στο περιβάλλον ονομάζεται R_{fa} . Αυτή η αντίσταση περιλαμβάνει μεταφορά θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία και μπορεί να υπολογιστεί πολύ απλά από τον νόμο ψύξης του Newton :

$$q = h A (T_s - T_{amb}) \quad (2.14)$$

Όπου q είναι η ροή θερμότητας (W), h ο συντελεστής συναγωγής (W/km²), A η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας (m²), T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας (K) και T_{amb} θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K).

$$R_{fa} = \frac{q}{(T_s - T_{amb})} = \frac{1}{h A} \quad (2.15)$$

Αυτή η έκφραση όμως δεν περιλαμβάνει τις αντιστάσεις λόγω αγωγής των πτερυγίων και της ακτινοβολίας. Έτσι απαιτείται η παραλλαγμένη έκδοση της εξίσωσης (14) που περιλαμβάνει όλα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας.

$$q = (h_c + h_r)(A_p + n A_f)(T_s - T_{amb}) \quad (2.16)$$

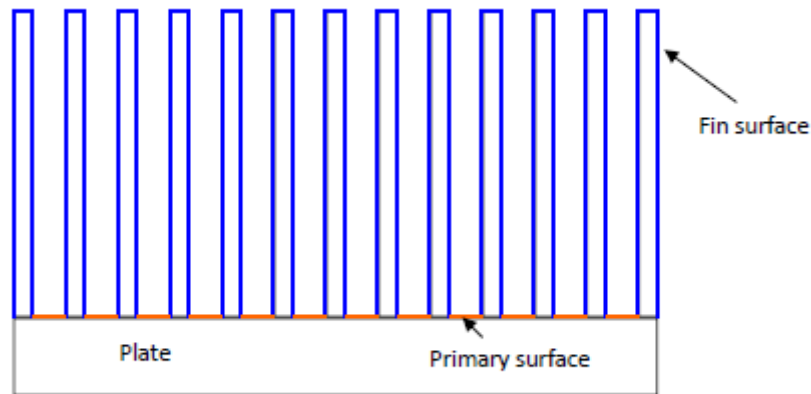
Όπου q είναι η ροή θερμότητας (W), h_c ο συντελεστής συναγωγής (W/km²), h_r ο ισοδύναμος συντελεστής ακτινοβολίας (W/km²), A_p η πρωτογενής επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας (m²), A_f η προεκταμένη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας (m²), n ο συντελεστής απόδοσης των πτερυγίων, T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας (K) και T_{amb} θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K).

Όλοι οι συντελεστές και οι μεταβλητές θα αναλυθούν παρακάτω.

2.2.4.1 Συντελεστής αγωγής πτερυγίου : $(A_p + n A_f)$

Τα πτερύγια έχουν μια πεπερασμένη θερμική αγωγιμότητα. Αυτό σημαίνει πως η θερμοκρασία τους δεν είναι σταθερή κατά μήκος της επιφάνειας τους. Ωστόσο στην εξίσωση (16) η θερμοκρασία T_s είναι μια σταθερή μεταβλητή και όχι μια μεταβλητή της μορφής $T_s(x)$. Για να αντισταθμιστεί λοιπόν η θερμοκρασιακή μεταβολή κατά μήκος των πτερυγίων συμπεριλαμβάνεται ο συντελεστής απόδοσης τους στην εξίσωση (16).

Ο συντελεστής αυτός επηρεάζει την επιφάνεια A_f του πτερυγίου, χωρίς όμως να επηρεάζει την πρωτογενή επιφάνεια A_p , η οποία παραμένει στην αρχική αναμενόμενη θερμοκρασία T_s .



Σχήμα 2.7 Επιφάνειες σε ψύκτρα με παράλληλα πτερύγια

Ανάλυση συντελεστή απόδοσης των πτερυγίων

Από τον νόμο του Fourier

$$q_x = -k A \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

Και από το ενεργειακό ισοζύγιο

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{dq}{dt} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

Συνεπάγεται

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h dA_s}{k dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (2.19)$$

Για ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο πτερύγιο το εμβαδό A_c είναι σταθερό άρα η εξίσωση (19) γίνεται

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \left(\frac{P h}{A_c k} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (2.20)$$

Και αντικαθιστώντας τα

$$\theta(x) = T(x) - T_\infty \text{ και } m = \sqrt{\frac{P h}{A_c k}} \quad (2.21)$$

Προκύπτει η εξίσωση 2^{ου} βαθμού

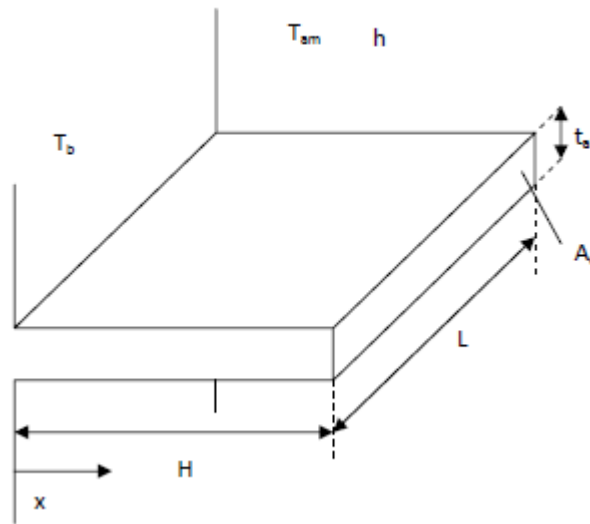
$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m\theta = 0 \quad (2.22)$$

Και με οριακές συνθήκες για αδιαβατικό άκρο ($x=H$) και σταθερή θερμοκρασία βάσης T_b

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=H} = 0 \text{ και } \theta_b = T_b - T_\infty \quad (2.23)$$

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης (22) είναι

$$\theta(x) = \frac{\cosh[m(H-x)]}{\cosh(mH)} \theta_b \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.8 Ορθογώνιο παραλληλόγραμμο πτερυγίο

Όπου H το ύψος του πτερυγίου (m).

Η απαγωγή θερμότητας από την βάση του πτερυγίου είναι

$$q_b = kA \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} \quad (2.25)$$

Και αντικαθιστώντας με την εξίσωση (24)

$$q_b = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \tanh(mH) \quad (2.26)$$

Ο συντελεστής απόδοσης του πτερυγίου είναι ο λόγος της μέγιστης απαγωγής θερμότητας που θα μπορούσε να αποβάλλει το ιδανικό πτερύγιο προς την θερμότητα που απαγάγει το πραγματικό πτερύγιο. Η μέγιστη θερμική ισχύς που μπορεί να απάνει ένα ιδανικό πτερύγιο υπολογίζεται από τον νόμο ψύξης του Newton

$$q_{max} = hA_f(T_b - T_{amb}) = hA_f \theta_b \quad (2.27)$$

Από τις εξισώσεις (26) και (27) προκύπτει ο συντελεστής απόδοσης του πτερυγίου

$$n = \frac{q_b}{q_{max}} = \frac{\tanh(mH)}{mH} \quad (2.28)$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει επίσης και για πτερύγια με μη αδιαβατικό άκρο αντικαθιστώντας στην εξίσωση (28) την παράμετρο H με το H_c

$$H_c = H + \frac{t_{ab}}{2} \quad (2.29)$$

2.3 Ενεργειακή Συμπεριφορά Συστήματος

2.3.1 Ενέργεια στην Επιφάνεια Εισόδου του Συστήματος Συγκέντρωσης

Τα σημειακά συγκεντρωτικά συστήματα πρέπει να παρακολουθούν χρονικά την πορεία του ήλιου στον ουράνιο θόλο, ενώ συγκεντρώνουν μόνο την άμεση (beam) συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί σε ωριαία βάση, E , μέσω της εξίσωσης:

$$E = \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_b(\omega) d\omega \cdot R_b(\omega) d\omega \quad (2.30)$$

όπου, ω είναι η ωριαία γωνία του ήλιου σε μοίρες, I_b η άμεση ακτινοβολία, R_b γεωμετρικός λόγος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την οριζόντια ακτινοβολία.

Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των ανωτέρω μεγεθών παρατίθεται στο βιβλίο των Duffie και Beckman [7] και προαπαιτεί τη γνώση της συνολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, η οποία είναι ευρέως διαθέσιμη στα αρχεία των μετεωρολογικών σταθμών. Στην παρούσα μελέτη, έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες μηνιαίες τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας από τα αρχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την περιοχή της Αθήνας ($37^\circ 58'B$, $23^\circ 43'E$) [8].

2.3.2 Παραγόμενη Ενέργεια από τη Φωτοβολταϊκή Κυψελίδα

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της ΦΒ κυψελίδας ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_{PV} = I_T \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot n_{PV} \cdot (1 - \lambda) \quad (2.31)$$

όπου, α_1 και α_2 είναι οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή αντίστοιχα, λ ένας αδιάστατος συντελεστής απωλειών της ΦΒ κυψελίδας συμπεριλαμβανομένων των απωλειών από τις συρματώσεις, των απωλειών από την σκόνη και τις αστοχίες του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου.

Η μέση απόδοση της συγκεντρωτικής κυψελίδας n_{PV} , είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της, T_c :

$$n_{PV} = n_{ref} \cdot [1 - \beta_p \cdot (T_c - T_{ref})] \quad (2.32)$$

όπου, n_{ref} είναι η απόδοση της κυψελίδας σε θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} ($= 25^\circ C$) και σε έκθεση ακτινοβολίας $50W/cm^2$, και β_p είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας της κυψελίδας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $n_{ref} = 40\%$ και $\beta_p = 0.06\%/^\circ C$ [9].

Επειδή η ενεργειακή προσομοίωση θα εκτελεσθεί σε ωριαία βάση, θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση που πρότεινε ο Erbs και οι συνεργάτες του [7] για την αναγωγή δεδομένων μέσης-μηνιαίας ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{a,d}$ σε μέσες-μηνιαίες ωριαίες τιμές $T_{a,h}$.

$$T_{a,h} = T_{a,d} + (25.8 \cdot K_T - 5,21) \cdot [0.4632 \cos(t - 3.805) + 0.0984 \cos(2t - 0.360) + 0.0168 \cos(3t - 0.822) + 0.0138 \cos(4t - 3.513)] \quad (2.33)$$

$$t = \frac{2\pi \cdot (h - 1)}{24}, \quad \begin{array}{l} h = 1 \rightarrow 1:00 \\ h = 24 \rightarrow 24:00 \end{array} \quad (2.34)$$

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Αρχές τρισδιάστατης σχεδίασης

3.1.1 Παραμετρική στερεά μοντελοποίηση

Στην Στερεά Μοντελοποίηση (Solid Modeling) [10],[11],[12] πραγματοποιείται αναπαράσταση των αντικειμένων με κλειστούς όγκους. Κατά την στερεά μοντελοποίηση μπορούμε να κατατάξουμε ένα σημείο του χώρου ως εσωτερικό, εξωτερικό ή επάνω στο στερεό. Οι λειτουργίες δημιουργίας στερεού μοντέλου είναι διαφορετικές από αυτές που εφαρμόζονται στα μοντέλα ακμών ή στα μοντέλα επιφανειών. Τα στερεά μοντέλα μας παρέχουν πλήρη και έγκυρη αναπαράσταση των αντικειμένων, που επιτυγχάνεται με την καταχώρηση τόσο των γεωμετρικών στοιχείων όσο και των πληροφοριών τοπολογίας. Τα γεωμετρικά στοιχεία είναι κοινά με τα συστήματα επιφανειών. Τα στοιχεία τοπολογίας είναι οι κορυφές, ακμές, βρόγχοι, έδρες, κελύφη και στερεά, που αποτελούν ένα αντικείμενο. Στην βάση δεδομένων τοπολογίας καταχωρούνται οι πληροφορίες που αφορούν τις σχέσεις (σύνδεση και γειτνίαση) μεταξύ αυτών των στοιχείων.

Στην Παραμετρική Μοντελοποίηση (Parametric Modeling) οι διαστάσεις αποτελούν τις παραμέτρους του μοντέλου. Σε κάθε διάσταση που απαιτείται για τον ορισμό του μοντέλου αντιστοιχεί και μια πραγματική τιμή, η οποία όταν αλλάξει τότε μεταβάλλεται και η γεωμετρία του μοντέλου. Κατά την παραμετρική μοντελοποίηση ο χρήστης αρχικά ορίζει την τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου και ακολούθως το σύστημα υποθέτει (ή ζητάει να οριστούν) οι παράμετροι που είναι απαραίτητοι για να ελέγξει το μέγεθος, τον προσανατολισμό και την θέση κάθε μορφολογικού χαρακτηριστικού, καθώς επίσης και τις λογικές σχέσεις μεταξύ διαστάσεων και μορφολογικών χαρακτηριστικών. Με τις διαστάσεις που έχει μετρήσει μπορεί να δημιουργήσει την μορφή του αντικειμένου. Αν ο χρήστης ορίσει νέες τιμές στις διάφορες διαστάσεις τότε το σύστημα αναδημιουργεί τη νέα μορφή του αντικειμένου. Το σύστημα ελέγχει εσωτερικά τις νέες τιμές των διαστάσεων για να επαληθεύσει ότι οι τιμές είναι έγκυρες με την αρχική τοπολογία ή ότι δεν αναιρούν άλλες τιμές και στη συνέχεια αναδημιουργεί το μοντέλο.

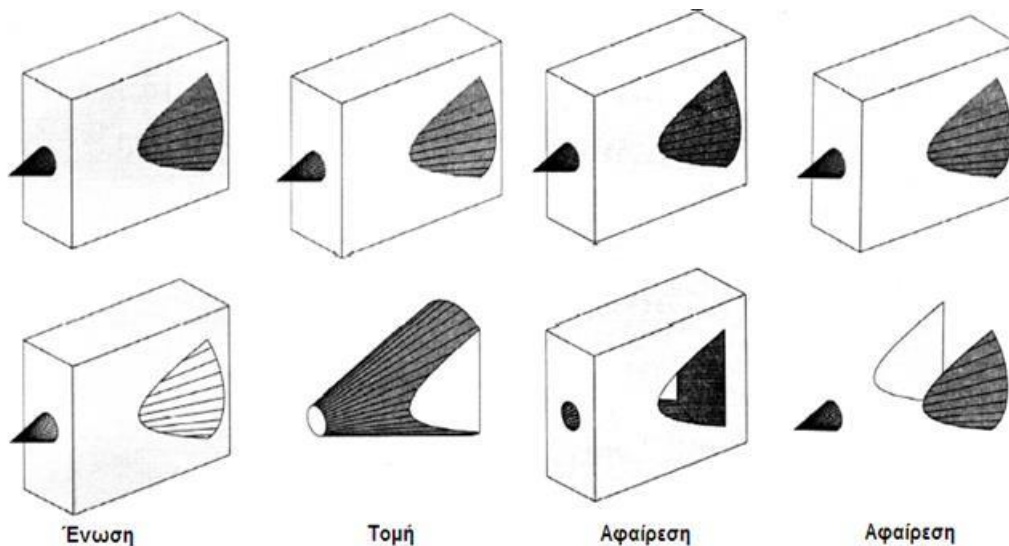
Βασικό στοιχείο των σύγχρονων συστημάτων στερεάς μοντελοποίησης είναι η σχεδίαση με μορφολογικά χαρακτηριστικά (features) τα οποία αντιπροσωπεύουν μια ανωτέρου επιπέδου απεικόνιση ομάδας γεωμετρικών στοιχείων και ιδιοτήτων του στερεού. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν περιορίζουν την πληροφόρηση που καταχωρούν στα γεωμετρικά στοιχεία μόνο, αλλά περιλαμβάνουν και πρόσθετη πληροφόρηση που είναι απαραίτητη για την εκάστοτε εφαρμογή, πχ. ανοχές διαστάσεων και μορφής για μελέτη κατεργασιών. Κάθε γεωμετρικό στοιχείο που προστίθεται στο μοντέλο ορίζεται ως ένα νέο μορφολογικό χαρακτηριστικό.

3.1.2 Βασικές Λειτουργίες Συστημάτων Στερεάς Μοντελοποίησης

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι λειτουργίες δημιουργίας στερεών μοντέλων σε συστήματα παραμετρικής στερεάς μοντελοποίησης. Οι λειτουργίες αυτές θα χρησιμοποιηθούν κατά την ανάπτυξη του στερεού μοντέλου τόσο της ψύκτρας όσο και της κυψελίδας.

3.1.2.1 Λειτουργία στοιχειωδών στερεών

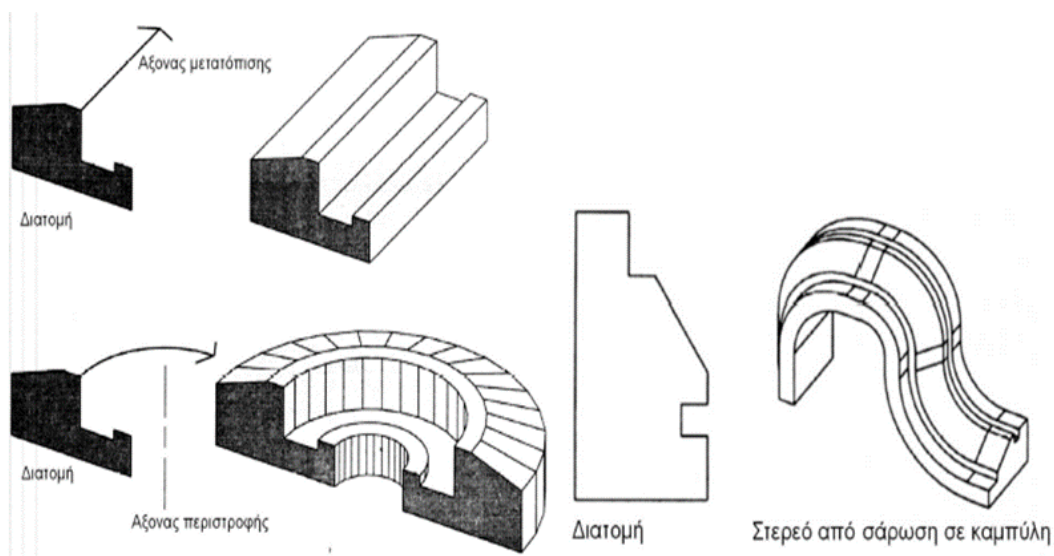
Με την λειτουργία αυτή γίνεται χρήση των βασικά στερεών (ορθογώνιο, κύλινδρος, σφαίρα, κώνος, κτλ.) για την δημιουργία του τελικού στερεού. Ο χρήστης ανακαλεί τον τύπο του στερεού από τη βάση και δίνει τις επιθυμητές διαστάσεις. Τα στοιχειώδη στερεά, ή τα ενδιάμεσα στερεά που δημιουργούνται, μπορούν να συνδυαστούν και με λειτουργίες συνόλων: Ένωση, Τομή και Αφαίρεση (Σχήμα 3.1). Η μέθοδος αυτή αποτελεί και την πρώτη ολοκληρωμένη μέθοδο καταχώρησης τοπολογίας Constructive Solid Geometry (CSG). Οι λειτουργίες συνόλων εκτελούνται μόνο όταν υπάρχει κοινός όγκος, ή επαφή μεταξύ των δύο στερεών. Στις άλλες περιπτώσεις (διακριτά στερεά) οι λειτουργίες δεν έχουν φυσική σημασία.



Σχήμα 3.1 Βασικές λειτουργίες συνόλων στην στερεά μοντελοποίηση

3.1.2.2 Λειτουργίες σάρωσης

Η περισσότερο χρησιμοποιούμενη εντολή σε σύστημα στερεάς μοντελοποίησης είναι η λειτουργία της σάρωσης. Η λειτουργία της σάρωσης υφίσταται και στα μοντέλα ακμών και επιφανειών. Στα στερεά μοντέλα μια κλειστή διατομή (γεννήτρια) μετακινείται (σάρωση) κατά μήκος μιας ευθείας – γραμμική σάρωση (extrude), ή περιστρέφεται γύρω από άξονα– περιστροφική σάρωση (revolve), ή μετακινείται κατά μήκος καμπύλης στο χώρο (sweep) (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 Η λειτουργία της σάρωσης, γραμμική, περιστροφική, καμπύλης



Σχήμα 3.3 Διάφορες Επιλογές κατά την Σάρωση

Το είδος της διατομής και της καμπύλης που επιτρέπεται ποικίλει ανάλογα με το λογισμικό. Το μήκος σάρωσης δεν προσδιορίζεται αναγκαστικά από το χρήστη, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί από το σύστημα. Τυπικές επιλογές είναι οι: Blind, Through All, Up to Next, Up to Surface, Offset from Surface, Offset from Surface Reversed, Mid Plane, Up to Vertex. Από την σάρωση μπορεί να προκύψει ένα γεμάτο στερεό ή ένα λεπτό στερεό (thin solid) και η εξωτερική επιφάνεια μπορεί να είναι κάθετη ή να είναι κεκλιμένη με ορισμένη γωνία κλίσης (draft angle) (Σχήμα 3.3).

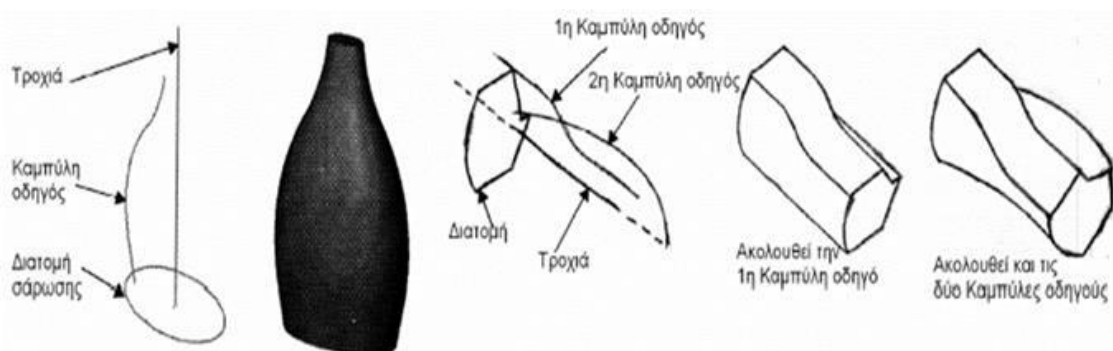
3.1.2.3 Λειτουργία σχεδιαστικού

Στα συστήματα παραμετρικής μοντελοποίησης η σχεδίαση της διατομής και της καμπύλης σάρωσης γίνεται με τη βοήθεια του εργαλείου σχεδιαστικού (Sketcher). Το εργαλείο αυτό αποτελεί από μόνο του ένα σύστημα ελεύθερης σχεδίασης. Η χρήση του οδηγεί στην δημιουργία μιας διατομής (profile). Η διατομή αυτή δημιουργείται σε ένα επίπεδο σχεδίασης, που μπορεί να είναι ένα από τα επίπεδα του συστήματος συντεταγμένων, ή η έδρα ενός στερεού, ή ένα άλλο βοηθητικό επίπεδο που ορίζεται για το σκοπό αυτό. Η γραμμική σάρωση γίνεται κάθετα στο επίπεδο σχεδίασης, προς τη μία κατεύθυνση του επιπέδου ή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στην σχεδίαση μιας διατομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ευθύγραμμα τμήματα, ορθογώνια, τόξα, κύκλους, ελλείψεις και splines. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει φιλέτο μεταξύ δύο στοιχείων (κυκλικό, ελλειπτικό, σπάσιμο), να αποκόψει στην τομή ή να τα επεκτείνει μέχρι την τομή τους τα διάφορα γεωμετρικά στοιχεία, ή να δημιουργήσει ένα άλλο σε απόσταση από ένα υπάρχον. Τέλος είναι εφικτή η αντιγραφή, η μετακίνηση και ο κατοπτρισμός τμημάτων.

Η απόδοση των διαστάσεων είναι άμεση και ακολουθεί τους κανονισμούς σχεδίασης των διαστάσεων. Οι διαστάσεις μπορεί να είναι ανεξάρτητες τιμές ή να σχετίζονται μεταξύ τους, τόσο στο ίδιο το σχήμα όσο και με τρίτες διαστάσεις σε άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των περισσότερων σχεδιαστικών προγραμμάτων είναι η αναγνώριση ορισμένων σχεδιαστικών περιορισμών στο σχέδιο. Το σύστημα αναγνωρίζει άμεσα πλησιέστερα σημεία, κάθετες και οριζόντιες γραμμές, παράλληλες, εφαπτόμενες ευθείες, ομόκεντρους κύκλους και τόξα, κλπ.

3.1.2.4 Λειτουργία σάρωσης διατομής κατά μήκος καμπύλης

Με το εργαλείο αυτό δημιουργούνται στερεά μοντέλα με την οδήγηση της διατομής κατά μήκος μιας καμπύλης τροχιάς (sweep). Μπορεί επιπλέον να οριστούν καμπύλες οδηγοί κατά μήκος της καμπύλης τροχιάς, που καθορίζουν την μορφή της διατομής κατά μήκος της τροχιάς. Η ακριβής σειρά ορισμού της τροχιάς, καμπύλης οδηγού και διατομής, καθώς επίσης και οι περιορισμοί που πρέπει να πληρούνται εξαρτώνται από το εκάστοτε σύστημα.

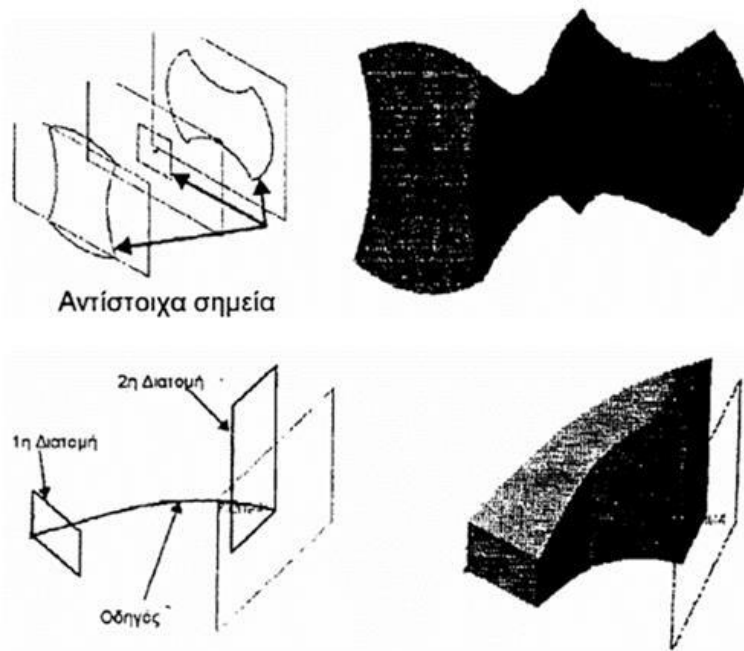


Σχήμα 3.4 Η λειτουργία της σάρωσης με χρήση τροχιάς και καμπύλης οδηγού

3.1.2.5 Λειτουργία σάρωσης διατομών στον χώρο

Με το εργαλείο αυτό δημιουργούνται στερεά μοντέλα με την οδήγηση δύο ή περισσότερων διατομών στο χώρο (loft). Είναι δυνατό πλέον των διατομών να υπάρχει και καμπύλη οδηγό. Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τις αρχικές και τις τελικές εφαπτόμενες συνθήκες που επιβάλλονται στις ακραίες διατομές.

Η λειτουργία αυτή είναι ίδια με την αντίστοιχη στην επιφανειακή μοντελοποίηση μόνο που εδώ προκύπτει ένα κλειστό στερεό ενώ στην επιφανειακή μοντελοποίηση το αποτέλεσμα είναι σωληνοειδές (τα άκρα είναι ανοικτά).

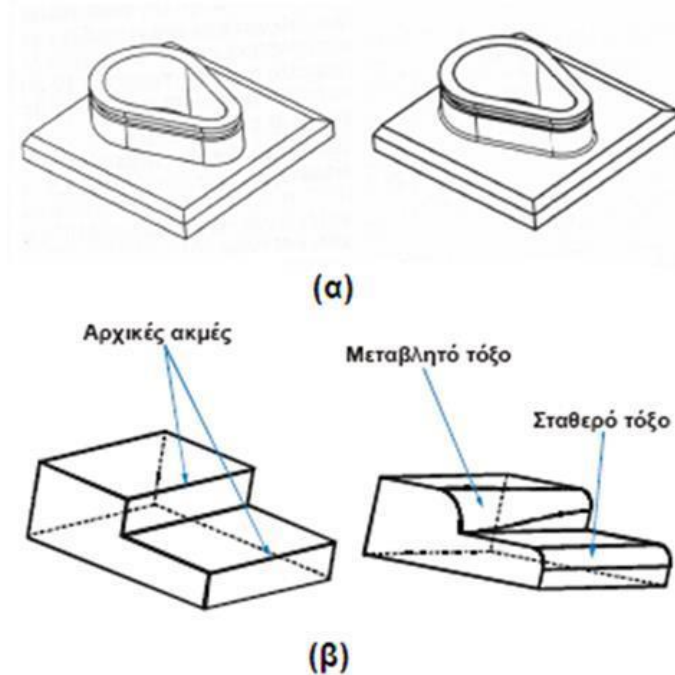


Σχήμα 3.5 Προσαρμογή στερεού σε διατομές

3.1.2.6 Λειτουργία δημιουργίας κελύφους

Με τη λειτουργία δημιουργίας κελύφους (shell) δημιουργούνται λεπτά τοιχώματα σε υπάρχον στερεό. Το πάχος του εξαρτήματος μπορεί να είναι διαφορετικό σε ορισμένα από τα τοιχώματα αν και συνήθως είναι σταθερό. Τα εξαρτήματα αυτά δεν πρέπει να συγχέονται με αυτά που γίνονται από επίπεδο έλασμα και για τα οποία στην στερεά μοντελοποίηση υφίσταται ξεχωριστό πρόγραμμα μοντελοποίησης που προσομοιάζει τις αντίστοιχες λειτουργίες διαμόρφωσης.

3.1.2.7 Φιλέτα και σπασίματα



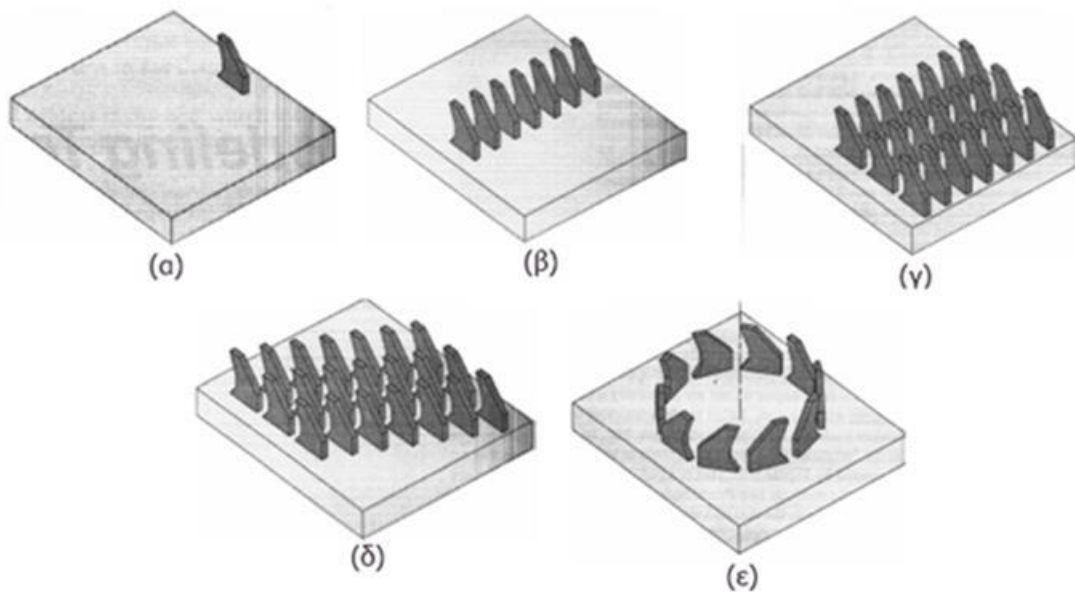
Σχήμα 3.6 Η λειτουργία της στρογγύλευσης, (α) στην επαφή της βάσης με την καμπύλη προεξοχή, (β) σταθερής και μεταβλητής ακτίνας στρογγύλευσης.

Η λειτουργία δημιουργίας φιλέτου (fillet) δημιουργεί στρογγύλευση σε μια ακμή ή κορυφή του εξαρτήματος. Γίνεται με δύο τρόπους με λοξοτομή ή με στρογγύλευση. Η λοξοτομή σε κωνικές ακμές ονομάζεται chamfering, ενώ σε ευθύγραμμες ονομάζεται bevelling. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε κωνική επιφάνεια, ενώ στην δεύτερη επίπεδη. Η στρογγύλευση σε εσωτερικές ακμές καλείται fillet ενώ σε εξωτερικές γωνίες ακμές καλείται round, Στα περισσότερα συστήματα CAD οι διακρίσεις αυτές δεν γίνονται και όλα καλούνται chamfers και fillets αντίστοιχα). Η στρογγύλευση μπορεί να είναι σταθερής (Σχήμα 3.6α) ή μεταβλητής ακτίνας και εφαρμόζεται σε έδρα, σε ακμή (Σχήμα 3.6β). Η λειτουργία του σπασίματος εφαρμόζεται σε ακμή ή σε κορυφή.

3.1.2.8 Διαχείριση τοπολογικών χαρακτηριστικών

Σε ένα σύστημα παραμετρικής σχεδίασης όλο το μοντέλο ορίζεται από μια σειρά από μορφολογικά χαρακτηριστικά (features). Ορισμένα από αυτά μπορούν να συνδεθούν με μια ορισμένη κατεργασία ή σειρά κατεργασιών για την δημιουργία τους, πχ. Εσοχές (rockets), αυλάκια (slots), οπές διαφόρων ειδών (holes, counterbores countersinks), πτερύγια (ribs), κλπ. που είναι σταθερά ή ορίζονται από το χρήστη.

Τυπική λειτουργία που εφαρμόζεται στα χαρακτηριστικά είναι η αντιγραφή και ο κατοπτρισμός. Στην πρώτη περίπτωση τα αντίγραφα μπορούν να διαταχθούν σε pattern, προς μία κατεύθυνση, προς δύο κατευθύνσεις σε μορφή πίνακα ή σε γενικευμένη μορφή ή σε κυκλική διάταξη (Σχήμα 3.7). Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 3.7β) απαιτείται η απόσταση μεταξύ των στοιχείων και ο αριθμός τους, στην δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 3.7γ) η απόσταση και ο αριθμός των στοιχείων στις δύο κάθετες κατευθύνσεις, στην Τρίτη περίπτωση (Σχήμα 3.7δ) η απόσταση και ο αριθμός των στοιχείων στις δύο μη κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις. Στην ακτινική διάταξη (Σχήμα 3.7ε) απαιτείται η θέση του άξονα, η μεταξύ τους γωνιακή απόσταση και ο αριθμός των στοιχείων της διάταξης. Στον κατοπτρισμό απαιτείται να προσδιοριστεί το επίπεδο κατοπτρισμού, ενώ στην απλή αντιγραφή η απόσταση μεταξύ των στοιχείων.



Σχήμα 3.7 Η λειτουργία της σάρωσης με χρήση τροχιάς και καμπύλης οδηγού

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα προτέρηματα των συστημάτων παραμετρικής μοντελοποίησης σε σχέση με τα κλασικά συστήματα. Τα βασικά προτερήματα της σχεδίασης με μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

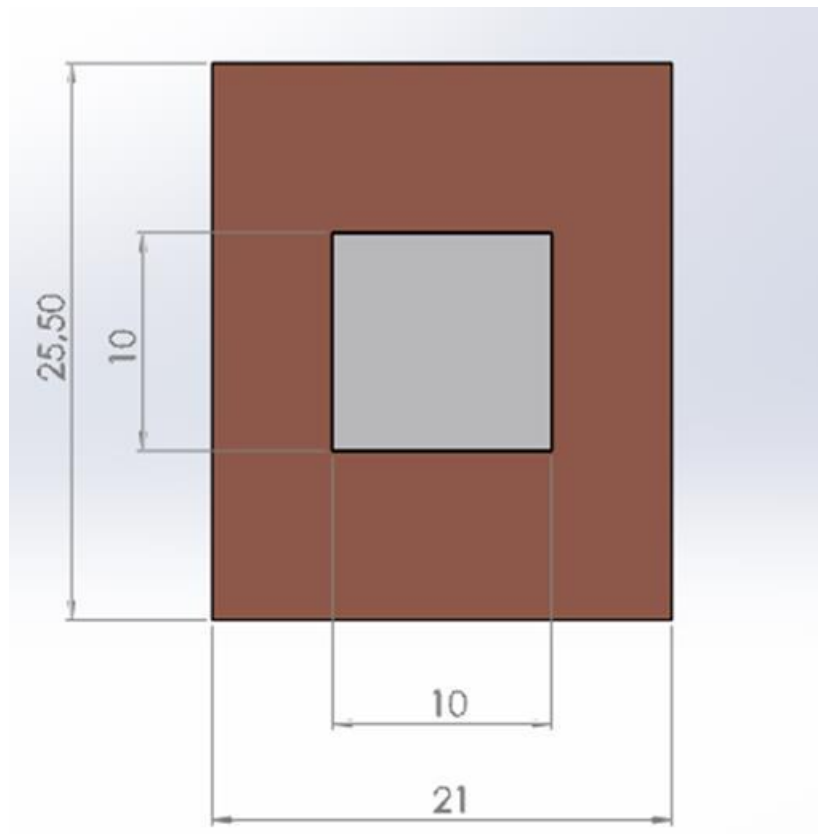
- Η Εισαγωγή "έξυπνης" παραμετρικής γεωμετρίας στο μοντέλο χωρίς να απαιτείται η δημιουργία ενδιάμεσης γεωμετρίας για την κατασκευή
- Ο συσχετισμός πολλών πληροφοριών προς ορισμένα τμήματα του μοντέλου
- Η δημιουργία χαρακτηριστικών που είναι μοναδικά στις ειδικές σχεδιαστικές απαιτήσεις.
- Τα Στοιχεία των χαρακτηριστικών μεταφέρονται εύκολα σε άλλες εφαρμογές.
- Πολλές φορές όταν αλλαγές που επιφέρονται στο μοντέλο επηρεάζουν ορισμένους περιορισμούς που έχει ένα χαρακτηριστικό, τότε ο σχεδιαστής ειδοποιείται για τις αλλαγές αυτές.

Το σύστημα διατηρεί επίσης το δένδρο διαχείρισης των μορφολογικών χαρακτηριστικών, και μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αλλαγές στο μοντέλο αλλάζοντας την θέση των δύο μορφολογικών χαρακτηριστικών στο δένδρο.

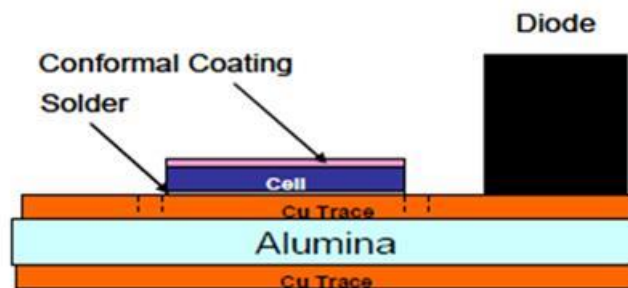
3.2 Τρισδιάστατη σχεδίαση του συστήματος

3.2.1 Τρισδιάστατη σχεδίαση κυψελίδας

Για την τρισδιάστατη σχεδίαση της κυψελίδας έπρεπε πρώτα να γίνει γνωστή η γεωμετρία της. Τις πληροφορίες αυτές τις αντλήσαμε από το datasheet [13,14] της κατασκευάστριας εταιρίας Spectrolab. Στο Σχήμα 3.9 διακρίνουμε τα επιμέρους στρώματα τα οποία αποτελούν την κυψελίδα και στον Πίνακα 3.1 μας δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τα πάχη των στρωμάτων αυτών καθώς και τα υλικά που την αποτελούν.



Σχήμα 3.8 Κάτοψη της κυψελίδας



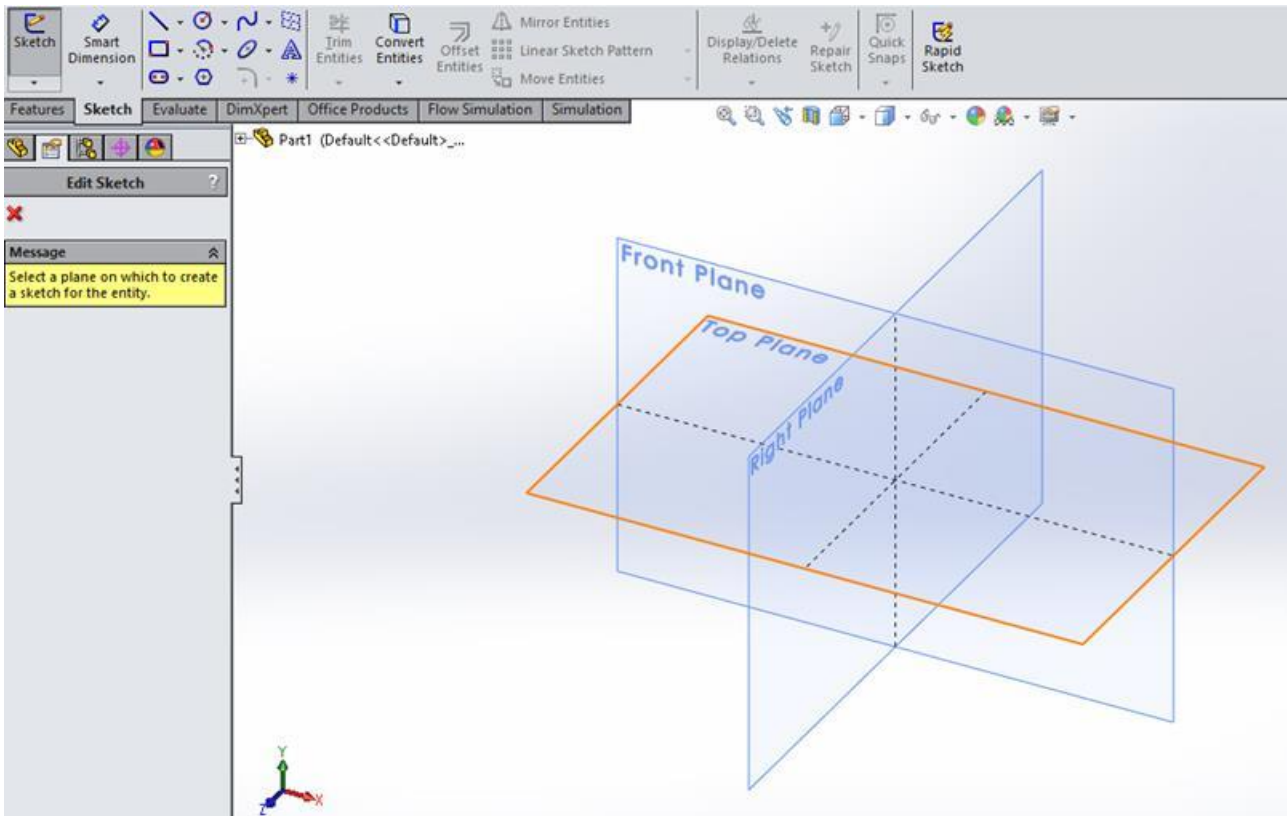
Σχήμα 3.9 Πλάγια όψη της κυψελίδας

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες κα πάχη των υλικών που αποτελούν την κυψελίδα.

Υλικό	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Πάχος (μm)
Conformal Coating	0.18	50
Solar Cell	60	200
Sn95Ag5 Solder	37.8	50
Copper	385	406 (2x 203)
Alumina (96% Al ₂ O ₃)	25	381

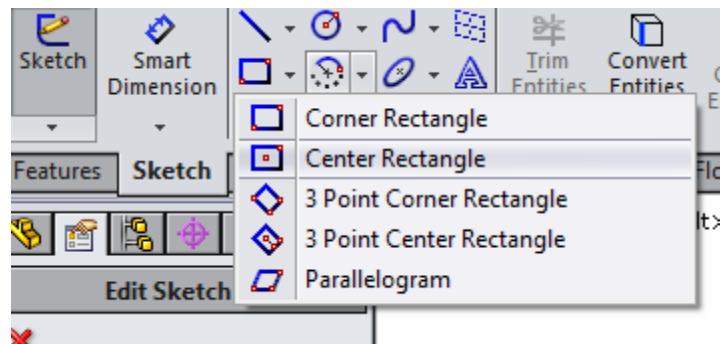
Καθώς οι διαστάσεις έχουν καθοριστεί αρχίζει ο σχεδιασμός της κυψελίδας. Για κάθε στρώμα, αρχικά γίνεται σχεδίαση ενός ορθογώνιου παραλληλογράμμου που στην συνέχεια γίνεται extrude στο επιθυμητό πάχος.

Αρχικά επιλέγεται μέσα από το πεδίο sketch ένα από τα τρία επίπεδα στο οποίο θα γίνει η σχεδίαση (Σχήμα 3.10)



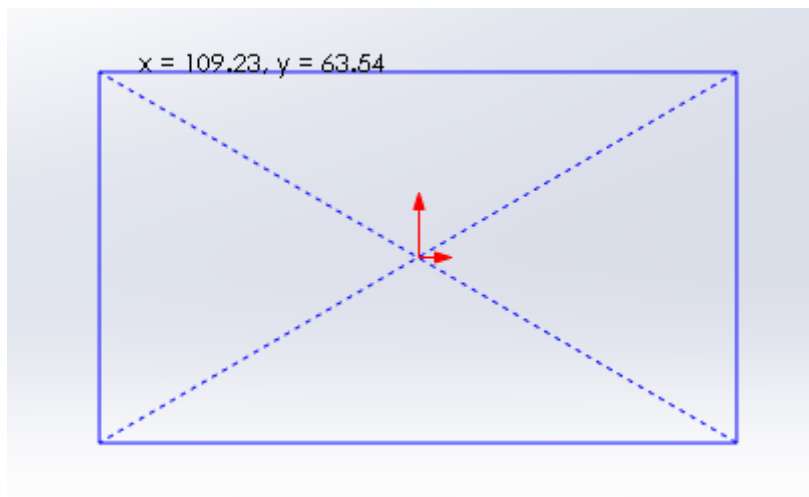
Σχήμα 3.10 Επιλογή επιπέδου σχεδίασης

Στη συνέχεια επιλέγεται το Center Rectangle (Σχήμα 3.11).



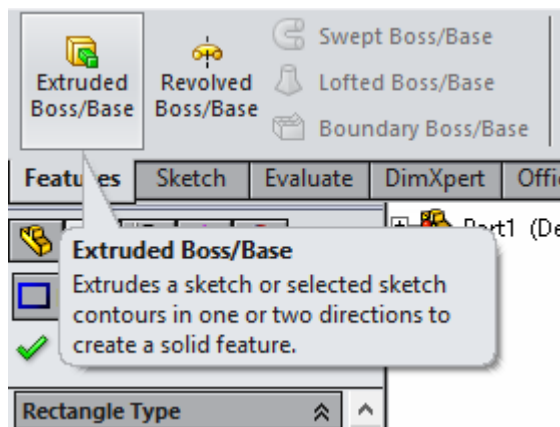
Σχήμα 3.11 Επιλογή Center Rectangle

Και εισάγονται οι διαστάσεις του μήκους και του πλάτους του εκάστοτε τμήματος της κυψελίδας (Σχήμα 3.12)



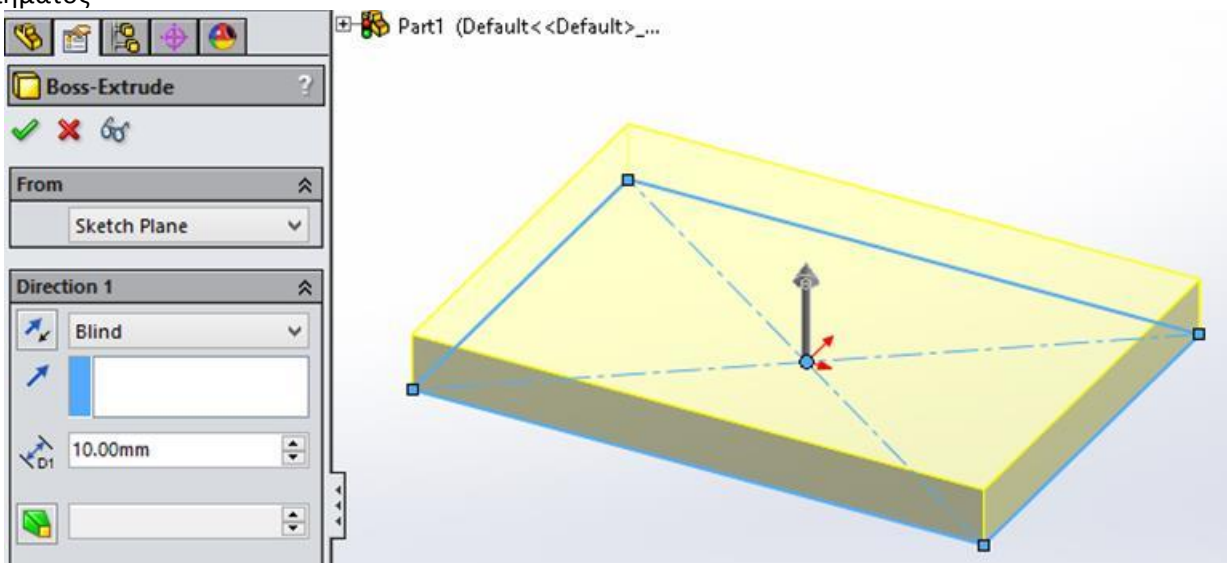
Σχήμα 3.12 Εισαγωγή διαστάσεων

Στη συνέχεια στο μενού features γίνεται η επιλογή της εντολής Extruded Boss/Base (Σχήμα 3.13)



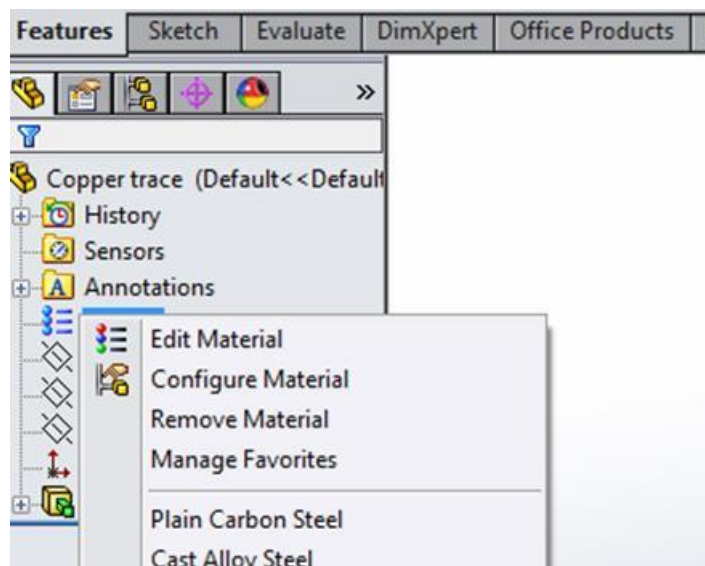
Σχήμα 3.13 Επιλογή της εντολής Extruded Boss/Base

Και η το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο αποκτά την τρίτη διάσταση του, δηλαδή το πάχος του εκάστοτε τμήματος



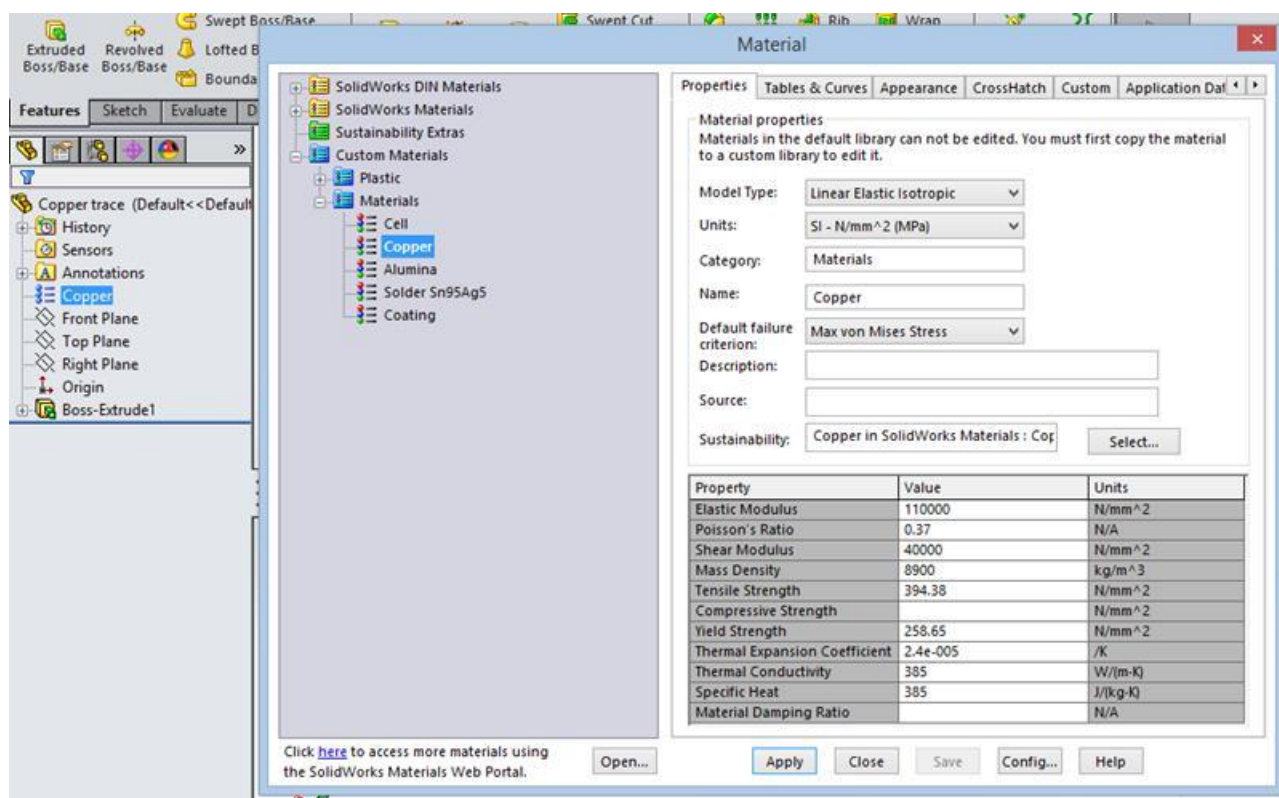
Σχήμα 3.14 Εισαγωγή της διάστασης του πάχους

Στη συνέχεια με δεξί κλικ στην επιλογή materials στην αριστερή στήλη, επιλέγουμε το υπο-μενού Edit Material (Σχήμα 3.15)



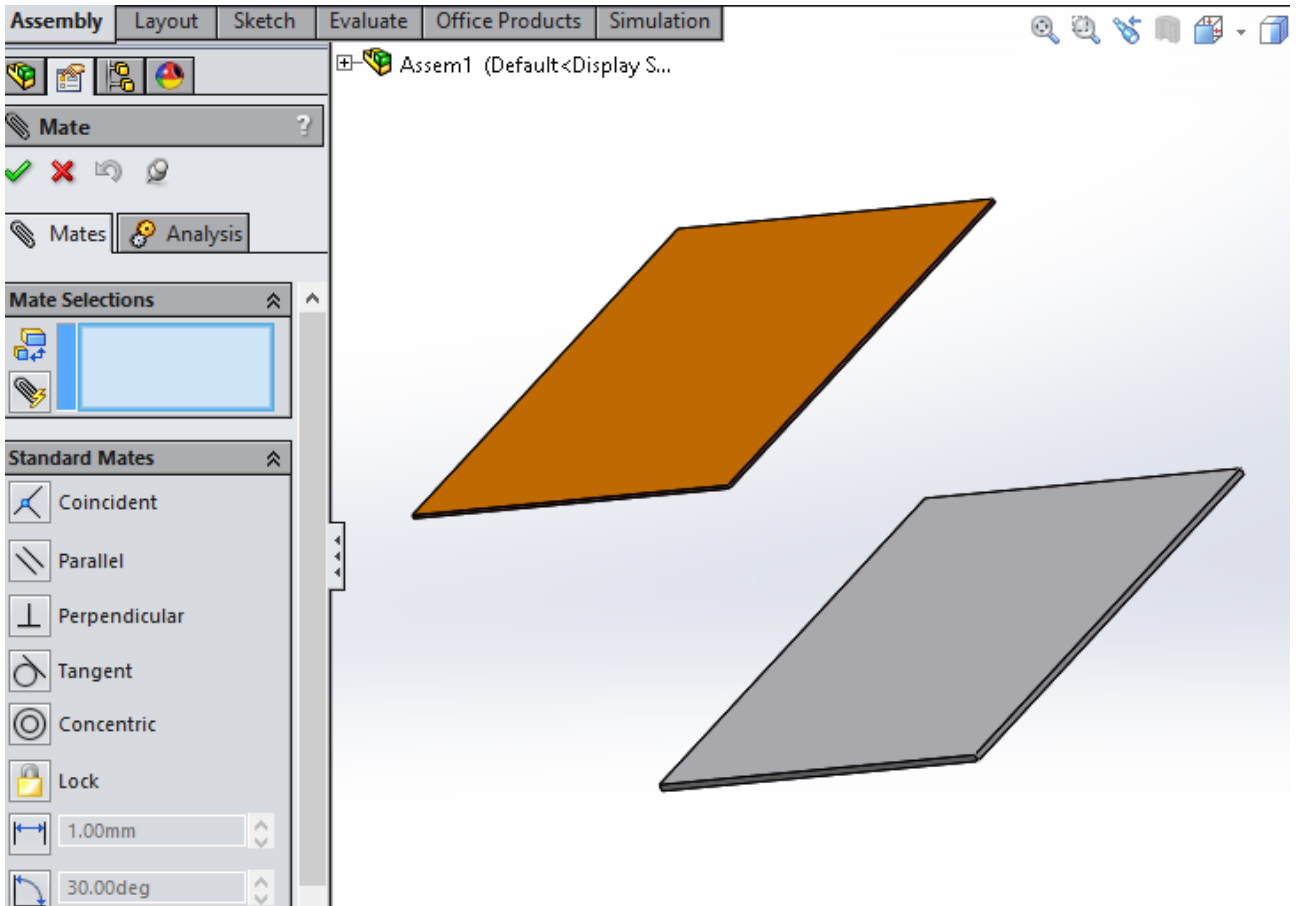
Σχήμα 3.15 Επιλογή υπο-μενού Edit Material

Και καθορίζουμε τις ιδιότητες του υλικού που μας αφορούν είτε χειροκίνητα, είτε μέσω της βιβλιοθήκης υλικών του Solidworks (Σχήμα 3.16)

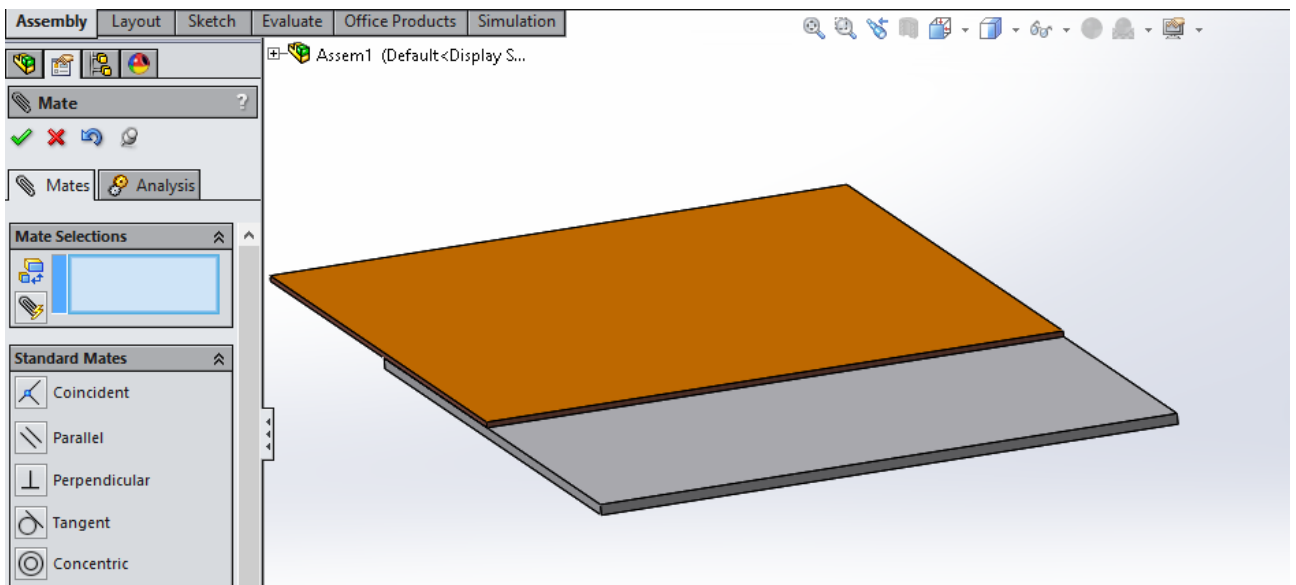


Σχήμα 3.16 Καθορισμός υλικού και ιδιοτήτων

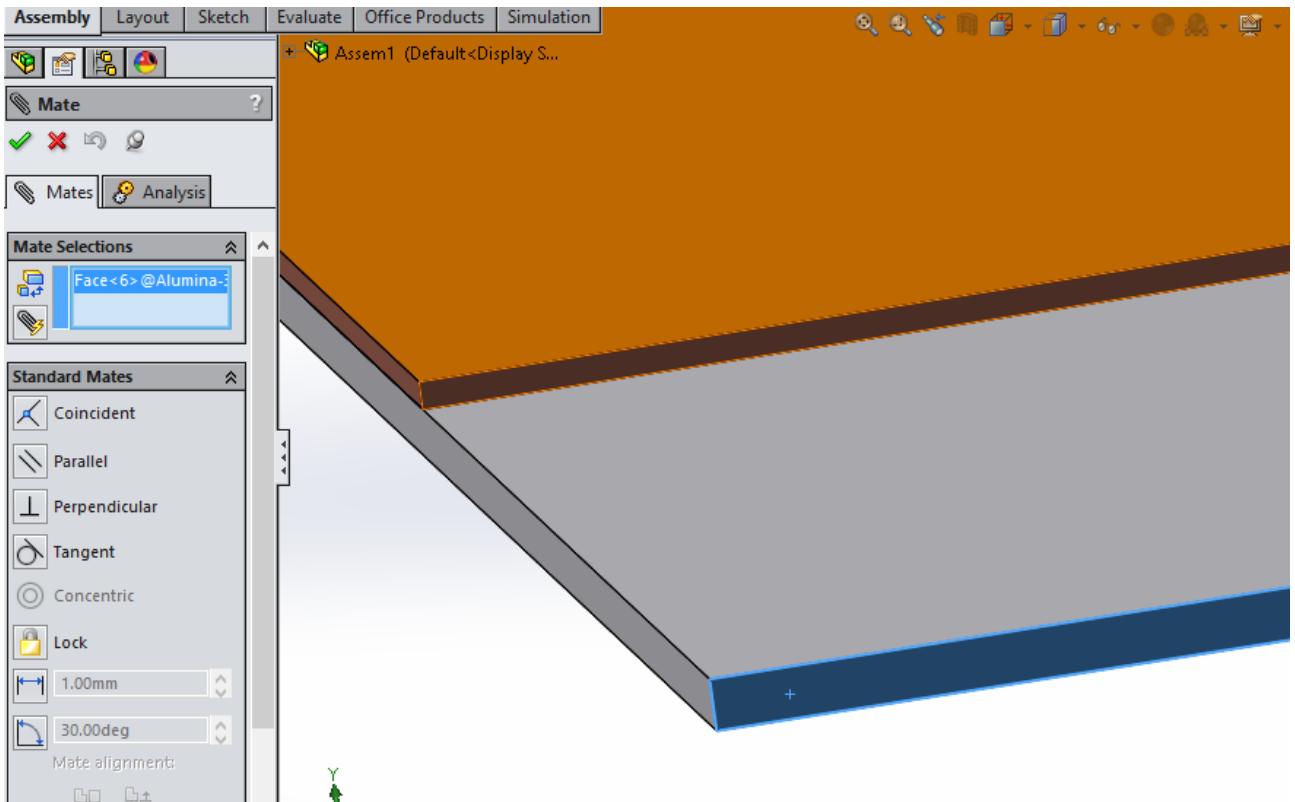
Αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή για κάθε ένα από τα επιμέρους στρώματα της κυψελίδας, εισάγουμε όλα τα τμήματα της κυψελίδας στο Solidworks και μέσω του μενού Assembly και στη συνέχεια της εντολής mate, επιλέγονται οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, και έτσι ορίζεται η σχέση μεταξύ των τμημάτων της κυψελίδας στο χώρο.



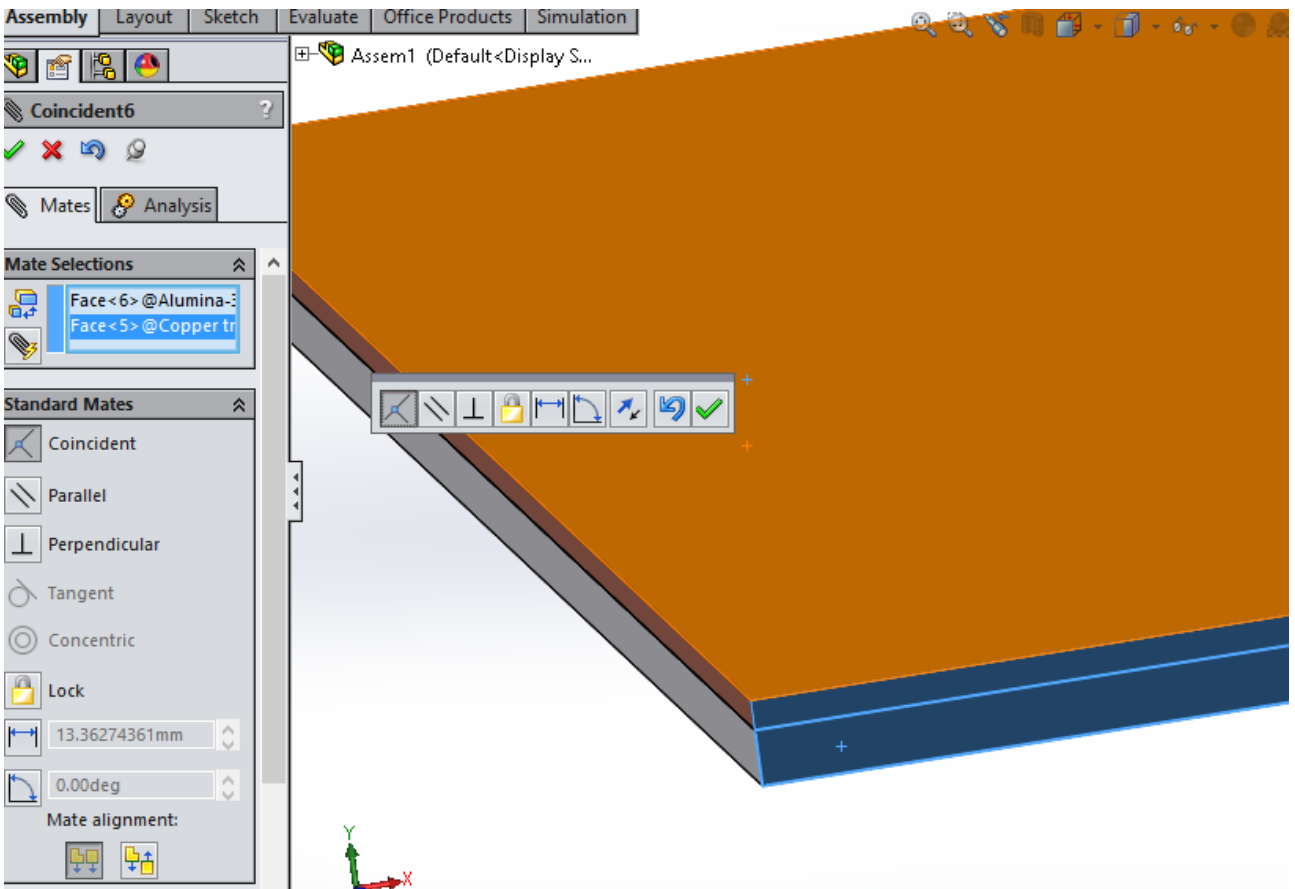
Σχήμα 3.17 Εισαγωγή δυο τμημάτων της κυψελίδας



Σχήμα 3.18 Ορισμός των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή



Σχήμα 3.19 Ορισμός επιφανειών που βρίσκονται σε παραλληλία και επαφή



Σχήμα 3.20 Τελική προσαρμογή των στοιχείων

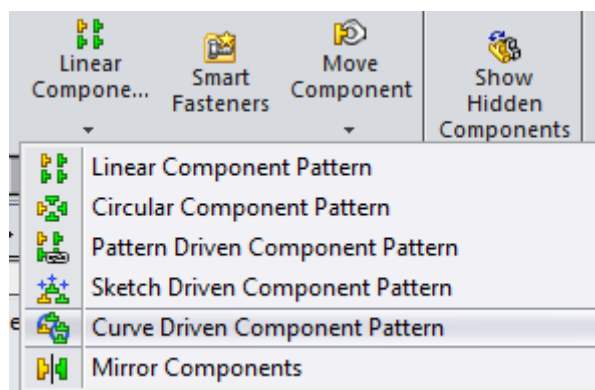
3.2.2 Τρισδιάστατη σχεδίαση συστήματος παθητικής ψύξης

Για τον καθορισμό της γεωμετρίας της ψύκτρας ο σχεδιασμός ξεκίνησε από ένα έτοιμο σχέδιο ψύκτρας φυσικής κυκλοφορίας με παράλληλες πλάκες πτερυγίων, το οποίο χρησιμοποιείται για την ψύξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Έχοντας ως γνώμονα το σχέδιο αυτό, κατασκευάσαμε μια ταυτόσημη ψύκτρα, στην οποία όμως κάθε διάσταση είναι πλήρως παραμετροποιήσιμη. Για το υλικό της ψύκτρας επιλέχθηκε το κράμα αλουμινίου 6063, καθώς αποτελεί ένα κοινό υλικό για την κατασκευή ψυκτρών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων χάρη στην καλή θερμική αγωγιμότητά του (218 W/mK) [15].

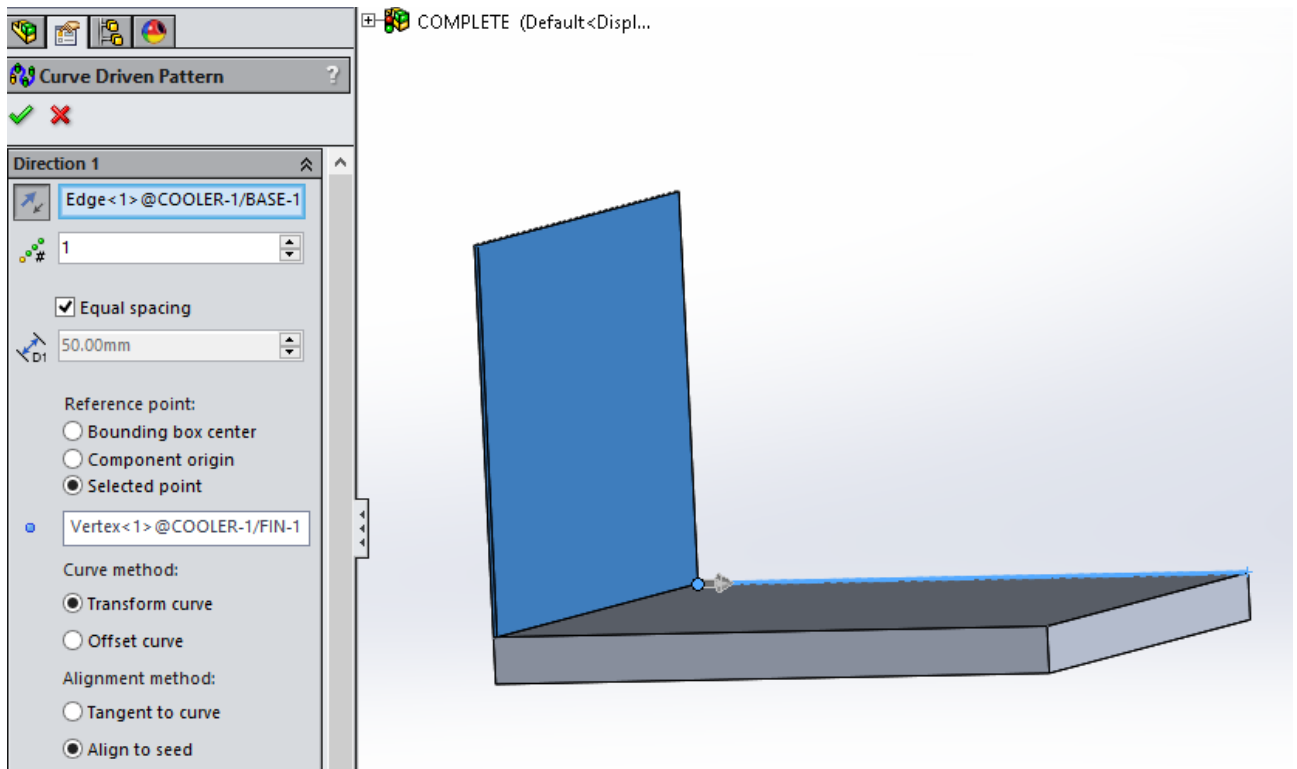


Σχήμα 3.21 Πρότυπη ψύκτρα φυσικής κυκλοφορίας

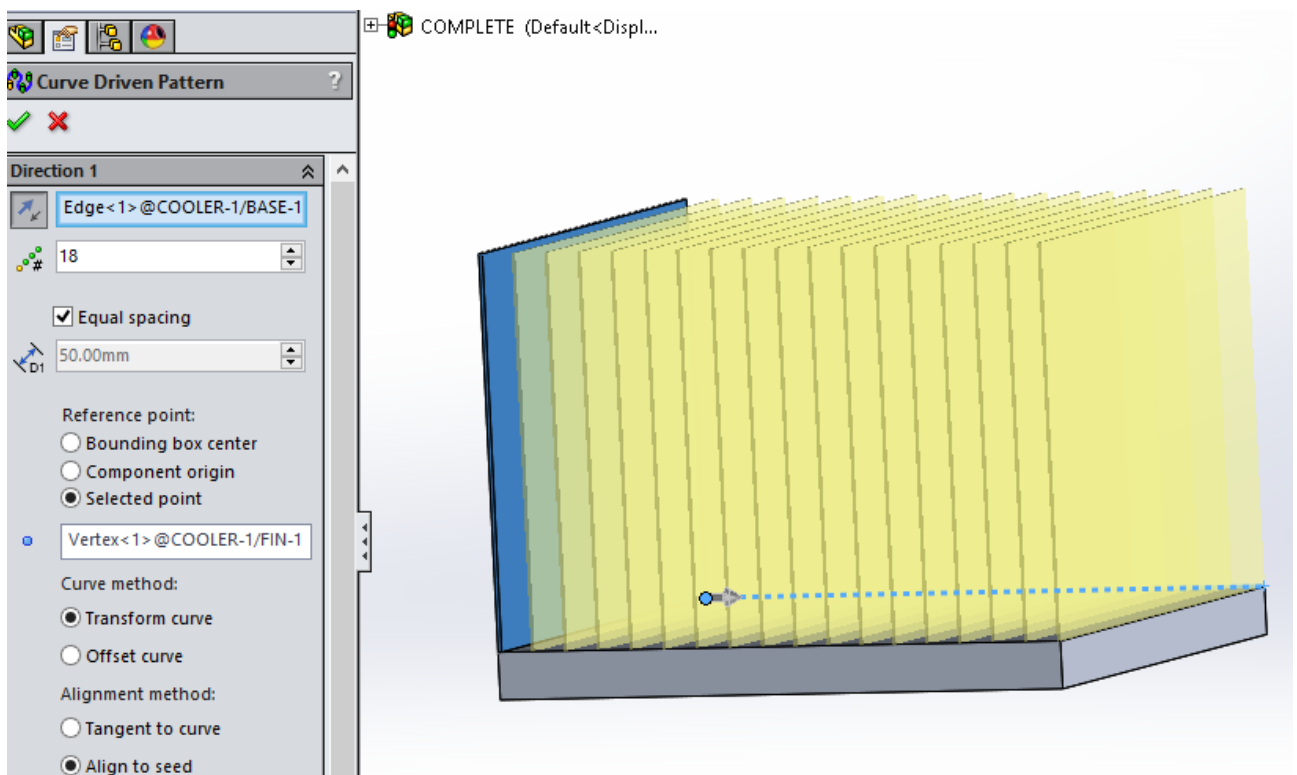
Η λογική σχεδίασης της ψύκτρας φυσικής κυκλοφορίας συμπίπτει με την σχεδίαση της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Έτσι αρχικά σχεδιάστηκε η βάση της ψύκτρας ως ένα τετράγωνο το οποίο στην συνέχεια απέκτησε την διάσταση του πάχους με την εντολή extrude. Το ίδιο έγινε και για τα πτερύγια, με μόνη διαφορά την χρήση της εντολής Curve Driven Pattern από το μενού Assembly που επέτρεψε την χρήση της σχεδίασης ενός μόνο πτερυγίου και στην συνέχεια την κλωνοποίηση του κατά μήκος της επιφάνειας της βάσης. Η διαδικασία «κλωνοποίησης του πτερυγίου παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.22-3.25.



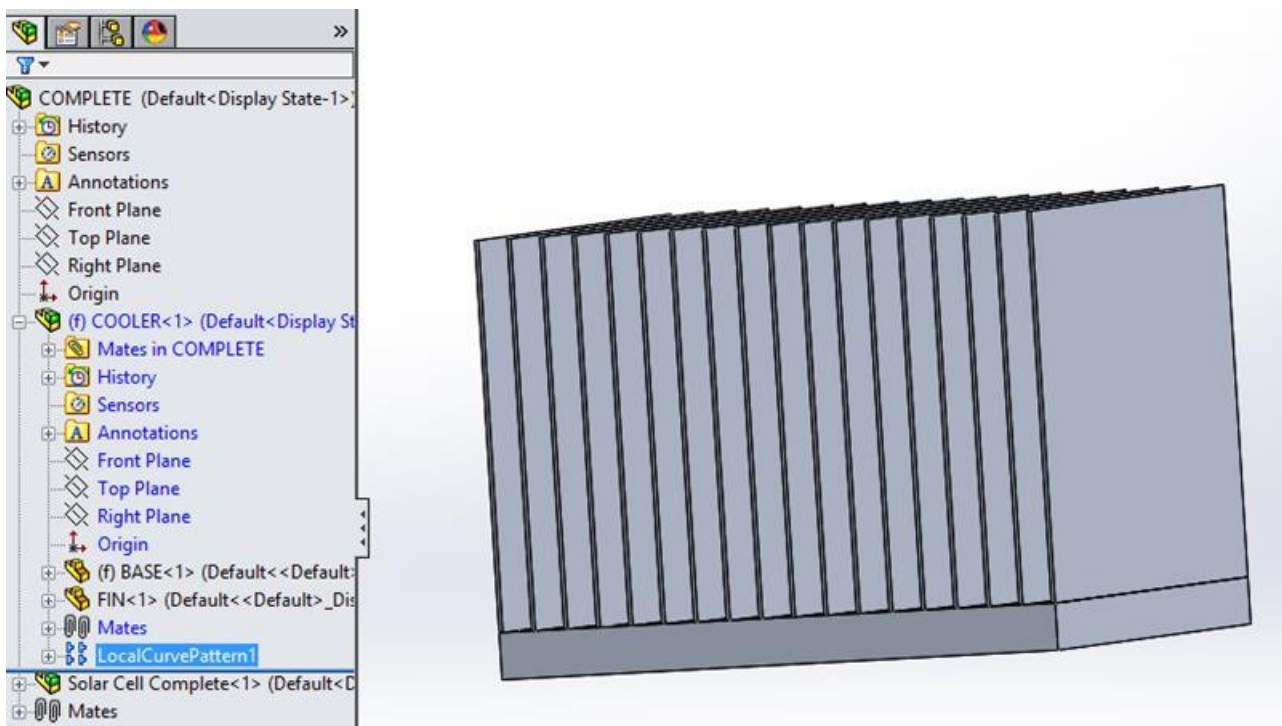
Σχήμα 3.22 Επιλογή της διάταξης Curve Driven Pattern



Σχήμα 3.23 Ορισμός του τμήματος (δηλαδή του περυγίου) που θα κλωνοποιηθεί



Σχήμα 3.24 Ορισμός αριθμού περυγιών και συνθηκών τοποθέτησης τους



Σχήμα 3.25 Τελικό αποτέλεσμα δημιουργίας των περυγιών

Στη συνέχεια και εδώ εισάχθηκε το υλικό της ψύκτρας, με τον ίδιο τρόπο που οριστήκαν τα υλικά στα επιμέρους τμήματα της κυψελίδας.

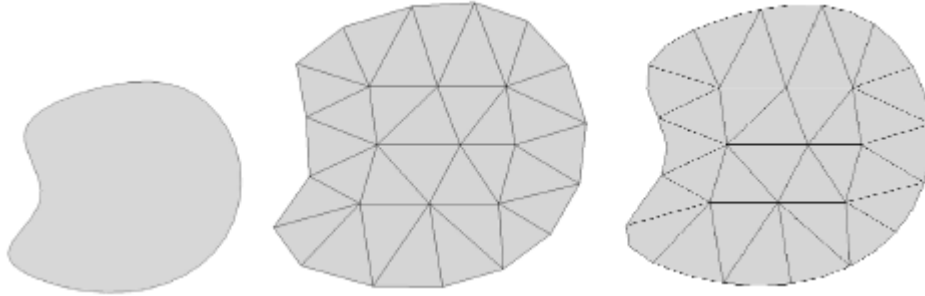
3.3 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis ή FEM) αναπτύχθηκε ταχύτατα ως το πιο εύχρηστο εργαλείο αριθμητικής ανάλυσης για μηχανικούς και εφαρμοσμένους μαθηματικούς λόγω των φυσικών προτερημάτων της σε σχέση με προηγούμενες προσεγγίσεις [16]. Το κύριο προτέρημα της είναι η ικανότητα εφαρμογής της σε ακανόνιστα σχήματα όλων των διαστάσεων. Το σχήμα μπορεί να αποτελείται από διαφορετικά υλικά, τα οποία μπορούν να είναι ανομοιογενή ή και ανισοτροπικά. Ο τρόπος με τον οποίο το σχήμα στηρίζεται μπορεί να ποικίλει, όπως και οι εφαρμοζόμενες πηγές (δυνάμεις, πιέσεις, ροές θερμότητας κλπ.). Η FEM προσφέρει μια πρότυπη διαδικασία μετατροπής των κυβερνόντων ενεργειακών αρχών ή των κυβερνόντων διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύστημα εξισώσεων πινάκων που μπορούν να λυθούν προσεγγιστικά. Για γραμμικά προβλήματα, οι λύσεις μπορούν να βρεθούν ταχύτατα και με μεγάλη ακρίβεια. Έχοντας αποκτήσει μια προσεγγιστική λύση, η FEM προσφέρει επιπλέον πρότυπες διαδικασίες για περαιτέρω επεξεργασία (post-processing). Μέσω της επεξεργασίας αυτής προκύπτει χρωματική απεικόνιση της λύσης και σχετικά γραφήματα. Επιπλέον, μπορούν να αναδειχτούν τα σημεία όπου οι εκτιμώμενοι συντελεστές σφάλματος είναι μεγάλοι, και άρα τα σημεία όπου η μελέτη χρειάζεται βελτίωση. Πράγματι, οι προσαρμοζόμενες διαδικασίες επιτρέπουν την αυτόματη επιδιόρθωση και επανα-επίλυση, προκειμένου να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας του χρήστη. Παρόλα αυτά, πολύ ακριβείς επιλύσεις μοντέλων που βασίζονται σε λανθασμένες υποθέσεις παραμένουν λανθασμένες.

Όταν μια FEM εφαρμόζεται σε ένα συγκεκριμένο πεδίο ανάλυσης (όπως ανάλυση τάσεων, θερμική ανάλυση, ή ανάλυση δονήσεων) συχνά αναφέρεται ως ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis ή FEA). Η FEA αποτελεί το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο εργαλείο ανάλυσης τάσεων και στατικής. Συχνά πολλαπλά πεδία μελέτης συσχετίζονται. Για παράδειγμα, η ανομοιογενής κατανομή θερμοκρασίας προκαλεί μη προφανή στατικά φορτία σε στερεά στοιχεία. Επομένως, είναι σύνηθες να πραγματοποιείται μια θερμική FEA για την ανάκτηση της θερμοκρασιακής κατανομής που στην συνέχεια θα αποτελέσει είσοδο δεδομένων για την ανάλυση τάσεων με FEA. Η FEA μπορεί να λάβει ως δεδομένα εσόδου και από άλλα εργαλεία όπως για παράδειγμα από δυναμικά συστήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

3.3.1 Βασικοί ολοκληρωτικοί σχηματισμοί

Η βασική ιδέα πίσω από την FEM έγκειται στην αντικατάσταση οποιουδήποτε περίπλοκου σχήματος με ένα άθροισμα από πολύ απλά σχήματα (όπως τρίγωνα) που συνδυάζονται κατάλληλα παράγοντας το πρωτότυπο κομμάτι. Τα μικρά και πιο απλά σχήματα καλούνται πεπερασμένα στοιχεία καθώς κάθε ένα από αυτά καταλαμβάνει ένα μικρό αλλά πεπερασμένο υπο-τομέα του πρωτότυπου κομματιού. Ένα πολύ απλό παράδειγμα αυτής της διαιρετικής και προσθετικής διαδικασίας αποτελεί ο υπολογισμός του εμβαδού του ακανόνιστου σχήματος του Σχήματος 3.26.



Σχήμα 3.26 Μια επιφάνεια στην οποία έχει δημιουργηθεί πλέγμα με γραμμικά και τρίγωνα με παραβολικές πλευρές

Θεωρητικά, εάν γνωρίζαμε τις εξισώσεις των καμπυλών που ορίζουν το σχήμα, θα μπορούσαμε να τις ολοκληρώσουμε για να υπολογίσουμε το εμβαδόν της επιφάνειας. Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να διαιρέσουμε την περιοχή σε τρίγωνα (δηλαδή να καλύψουμε το σχήμα με ένα πλέγμα) και να αθροίσουμε τις περιοχές από τα μεμονωμένα τρίγωνα.

$$A = \sum_{e=1}^n A^e = \sum_{e=1}^n \int_{A^e} dA \quad (3.1)$$

Τώρα, υπάρχουν μερικές επιλογές για τον τύπο των τριγώνων. Θα μπορούσαμε να επιλέξουμε τρίγωνα με ίσιες πλευρές (γραμμικά τρίγωνα), ή τρίγωνα που οι πλευρές τους είναι παραβολικές, κλπ. Η περιοχή με τα γραμμικά τρίγωνα μπορεί να αναπαρασταθεί από μία απλή αλγεβρική έκφραση.

$$A^e = [x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)] \quad (3.2)$$

με γεωμετρικό κέντρο το

$$x_{cg}^e = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, y_{cg}^e = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \quad (3.3)$$

Όπως φαίνεται η χρήση απλών τριγώνων δίνει μία πολύ καλή προσέγγιση της επιφάνειας, αλλά παράλληλα δημιουργεί και γεωμετρικά σφάλματα κατά μήκος της συνοριακής καμπύλης. Το γεωμετρικό σφάλμα προκύπτει από την αντικατάσταση της συνοριακής καμπύλης από μία σειρά από ευθύγραμμα τμήματα. Το σφάλμα αυτό μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας τον αριθμό των γραμμικών τριγώνων, κάτι το οποίο όμως αυξάνει το υπολογιστικό κόστος. Τα τρίγωνα με παραβολικές πλευρές δίνουν μικρότερο γεωμετρικό σφάλμα, αλλά για τον ίδιο αριθμό τριγώνων απαιτούν περισσότερους υπολογισμούς καθώς το εμβαδόν τους υπολογίζεται μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης.

Το εμβαδό είναι ένα βαθμωτό μέγεθος, και έτσι μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας απλά τα επιμέρους εμβαδά των στοιχείων που αποτελούν την επιφάνεια. Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να αθροιστούν και άλλα φυσικά μεγέθη, όπως η θερμική ενέργεια, η κινητική ενέργεια και το μηχανικό έργο.

3.3.2 Θερμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας μια ισοδύναμη θεμελιώδη ολοκληρωτική μορφή η οποία ολοκληρώνεται σε ένα πλέγμα που προσεγγίζει τον όγκο και την επιφάνεια του σώματος που μας ενδιαφέρει. Το πλέγμα αποτελείται από στοιχεία συνδεδεμένα με κόμβους. Σε μία θερμική ανάλυση υπάρχει μια ταυτόχρονη εξίσωση για κάθε κόμβο. Η άγνωστη μεταβλητή σε κάθε κόμβο είναι η θερμοκρασία. Σε μία τυπική θερμική ανάλυση το πλέγμα περιλαμβάνει 20.000 με 100.000 κόμβους, άρα και τόσες θερμοκρασιακές εξισώσεις. Τους περιορισμούς αποτελούν καθορισμένες θερμοκρασίες (ή συνθήκες συναγωγής καθώς περιλαμβάνουν την καθορισμένη θερμοκρασία του ρευστού). Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η θερμική ροή που απαιτείται για την διατήρηση της καθορισμένης θερμοκρασίας. Όλες οι υπόλοιπες συνθήκες προσθέτουν φορτία ή όρους πηγών. Η προεπιλεγμένη συνοριακή συνθήκη προκύπτει από μία πλήρως μονωμένη επιφάνεια, η οποία αποτελεί έναν όρο μηδενικής πηγής.

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{ug} \\ K_{gu} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_u \\ T_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_g \\ F_u \end{Bmatrix}$$

Όπου το T_g αντιπροσωπεύει την δεδομένη θερμοκρασία του κόμβου, το F_g την γνωστή προκύπτουσα θερμική ισχύ του κόμβου (ροή θερμότητας) στον κόμβο. Αυτό το σύστημα εξισώσεων λύνεται για άγνωστο το T_u . Οι θερμικές αντιδράσεις, F_u , στους δεδομένους θερμοκρασιακούς κόμβους αναπαριστούν την ολική θερμική ροή που απαιτείται για να διατηρηθούν οι δεδομένες θερμοκρασίες T_g . Για ένα γραμμικό στοιχείο αγωγής η παραπάνω εξίσωση γίνεται.

$$k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

Όπου το $k \equiv k_x A / L$ μπορεί να ερμηνευτεί ως η «θερμική ακαμψία» της ράβδου με μήκος L , επιφάνεια A , και θερμική αγωγιμότητα k_x . Σε αυτή την περίπτωση το T ανταποκρίνεται σε μια κομβική θερμοκρασία, και το F στην θερμική ισχύ που προκύπτει από τις διάφορες πηγές θερμότητας. Τα αντικείμενα θερμικού φορτίου για μία ανάλυση μόνιμης κατάστασης δίνονται στον Πίνακα 3.4

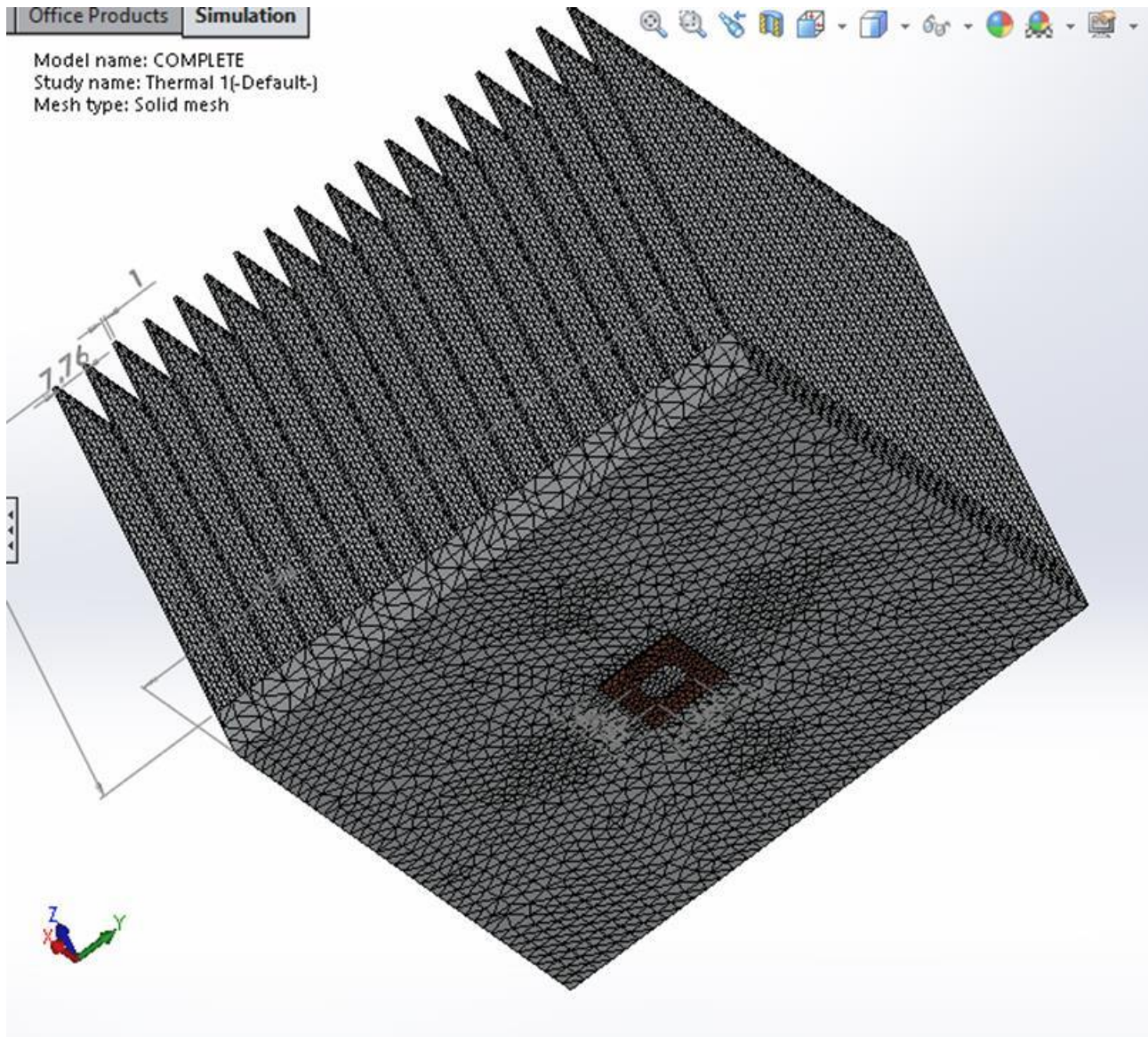
Πίνακας 3.2 Φορτία για θερμική ανάλυση μόνιμης κατάστασης

Τύπος φορτιού	Γεωμετρία	Απαιτούμενη είσοδος
Συναγωγή	Επιφάνειες	Συντελεστής διεπιφάνειας και φαινόμενη θερμοκρασία
Ροή θερμότητας	Επιφάνειες	Τιμή της ροής θερμότητας
Θερμική ισχύς	Σημεία, Ακμές, Επιφάνειες, Σώματα	Τιμή της θερμικής ισχύος (ρυθμός της παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου επί τον όγκο που εφαρμόζεται)
Αδιαβατικό	Επιφάνειες	Καμία. Αποτελεί το default φορτίο για κάθε επιφάνεια που δεν υπόκειται σε ένα από τα παραπάνω φορτία.
Ακτινοβολία	Επιφάνειες	Θερμοκρασία του περιβάλλοντος, συντελεστής ακτινοβολίας, παράγοντας θέασης

Έχοντας καθορίσει όλους του περιορισμούς, τα φορτία, και τις ιδιότητες των σωμάτων μπορεί να ξεκινήσει το «τρέξιμο» της θερμικής ανάλυσης και στη συνέχεια η επεξεργασία και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

3.4 Καθορισμός Πλέγματος

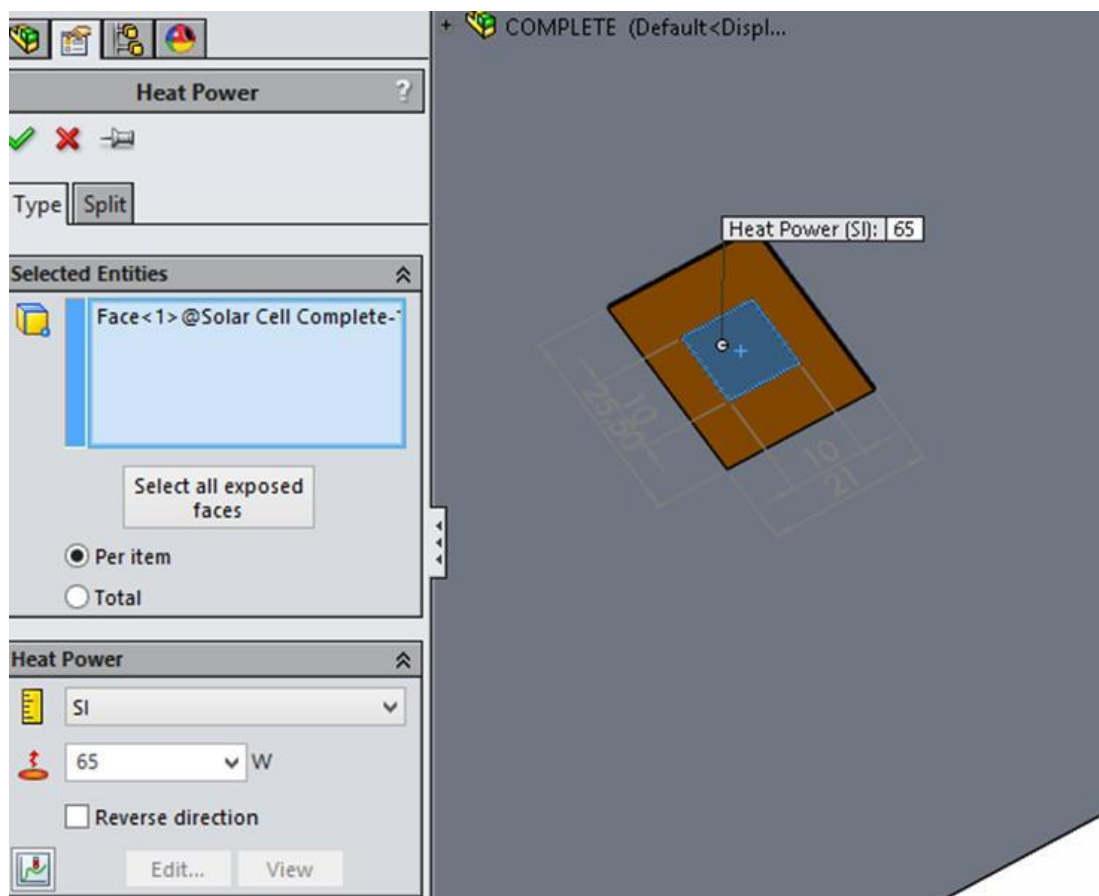
Μετά την ολοκληρωμένη τρισδιάστατη σχεδίαση του συστήματος, έπρεπε να δημιουργηθεί το πλέγμα επίλυσης καθώς και να καθοριστούν οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Το πλέγμα δημιουργήθηκε αυτοματοποιημένα από το Solidworks, ορίζοντας απλά το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων που απαιτούνται για την συγκεκριμένη γεωμετρία. Το ελάχιστο μέγεθος στοιχείου ορίστηκε, ώστε να μπορούν να επιλυθούν οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας ακόμα και για τα λεπτά στρώματα που αποτελούν την κυψελίδα.



Σχήμα 3.27 Το πλέγμα του συστήματος

3.5 Εφαρμογή οριακών συνθηκών

Στη συνέχεια ορίζονται οι οριακές συνθήκες του συστήματος. Ως πηγή ακτινοβολίας επιλέχθηκε το Heat Power από το μενού Thermal Loads στο Simulation Tab. Εκεί ορίστηκε και η επιφάνεια εφαρμογής της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή η επιφάνεια της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη κυψελίδα είναι 100W όπου με συντελεστή απόδοσης 35% τελικά καταλήγουμε σε 65W θερμικής ισχύος που παράγονται στην κυψελίδα.



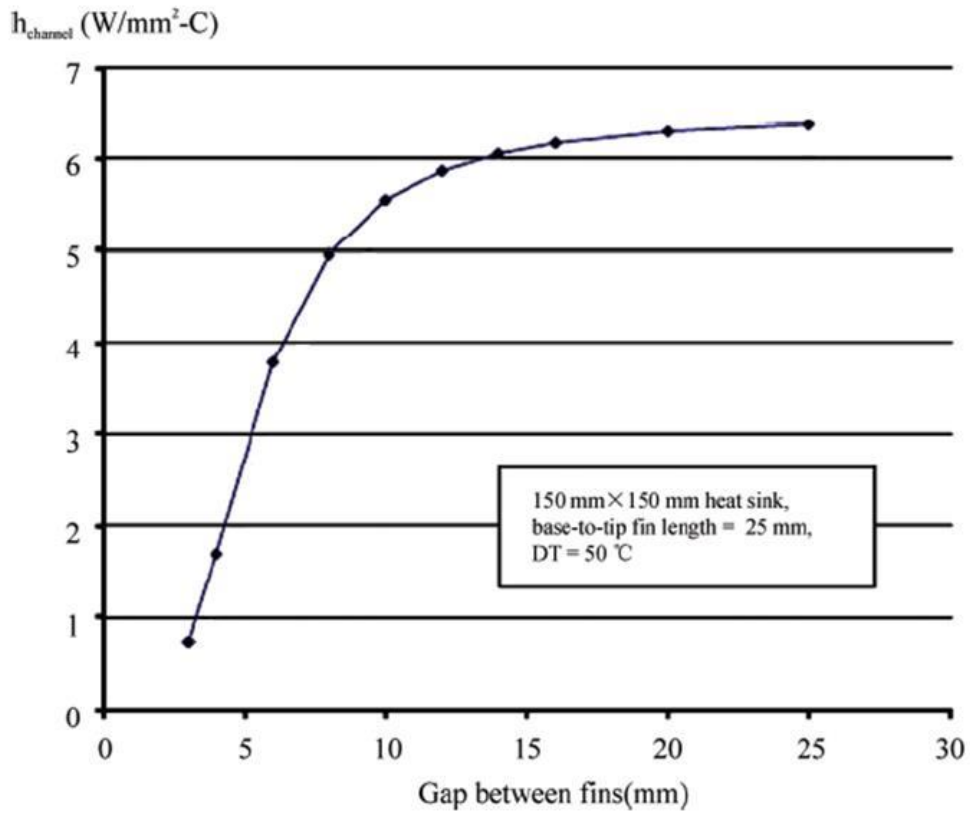
Σχήμα 3.28 Εφαρμογή της ηλιακής ακτινοβολίας στην φωτοβολταϊκή κυψελίδα

Στην συνέχεια ορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες που αφορούν την συναγωγή. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν όλες οι εξωτερικές επιφάνειες διαχωριζόμενες σε δύο ομάδες ανάλογα με τον συντελεστή συναγωγής τους, τις επιφάνειες που βρίσκονται ανάμεσα στα πτερυγία και όλες τις απομείναντες. Για τον συντελεστή συναγωγής αρχικά έγινε μια εκτίμηση βάσει του Σχήματος 3.29 από την εργασία των H.R.Gogayeshi και F.Ampofo [17] που μελέτησαν την μεταφορά θερμότητας μέσω φυσικής κυκλοφορίας, για μια ψύκτρα διαστάσεων βάσης 150x150 mm με μήκος πτερυγίων 25mm και με μέση θερμοκρασιακή διαφορά ψύκτρας-περιβάλλοντος 50° C.

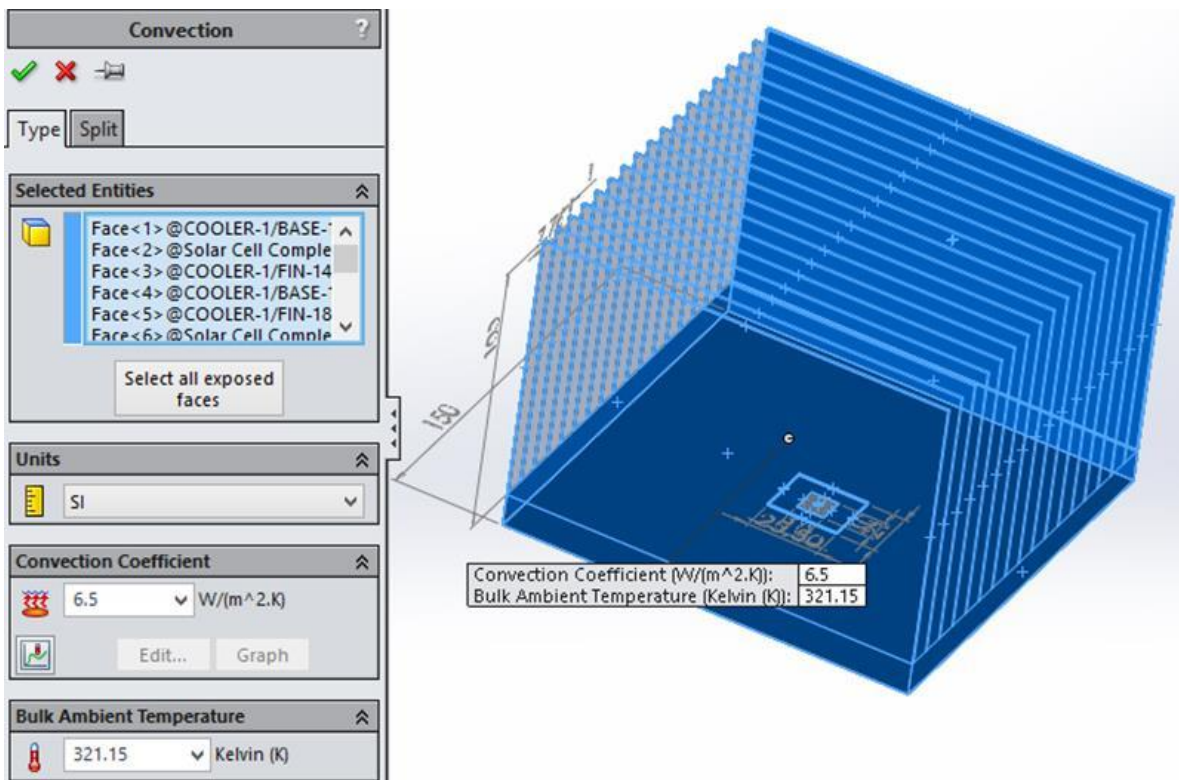
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες που επιλέχθηκαν για όλες τις προσομοιώσεις είναι 48°C για την θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς και μηδενική ταχύτητα αέρα, ώστε να ανταποκρίνεται στο πλέον αντίξοο θερμοκρασιακό σενάριο που έχει καταγραφεί ποτέ για την Ελλάδα ([10/07/1977, Αθήνα](#)). Η θερμοκρασία αυτή, αποτελεί παράλληλα και την μέγιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία σε ολόκληρη την Ευρώπη [18].

Στο Σχήμα 3.29 φαίνεται από πειραματικά δεδομένα η συσχέτιση μεταξύ του μέσου συντελεστή συναγωγής και του διάκενου μεταξύ των πτερυγίων. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν μία πολύ καλή πρώτη προσέγγιση καθώς αναφέρονται σε ψύκτρα ορθογώνιων παραλληλόγραμμων πτερυγίων, παρομοίων διαστάσεων βάσης και μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς αέρα-επιφάνειας παρόμοιας με αυτή που αναμένουμε. Έτσι για την αρχική ψύκτρα ο μέσος συντελεστής συναγωγής για τις επιφάνειες εσωτερικά των πτερυγίων που επιλέχθηκε ήταν $h_{channel} = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Από το Σχήμα 3.29 ακόμη παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συναγωγής για διάκενο μεγαλύτερο των 25mm τείνει σε μια οριακή τιμή, περίπου στα $h_{external} = 6.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε για όλες τις επιφάνειες του συστήματος που δεν βρίσκονται ανάμεσα από τα πτερυγία.

Για τον ορισμό της συναγωγής στο Solidworks επιλέγεται το Convection από το μενού Thermal Loads και στην συνέχεια επιλέγονται οι επιφάνειες εφαρμογής της συναγωγής, ο συντελεστής συναγωγής καθώς και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.30.



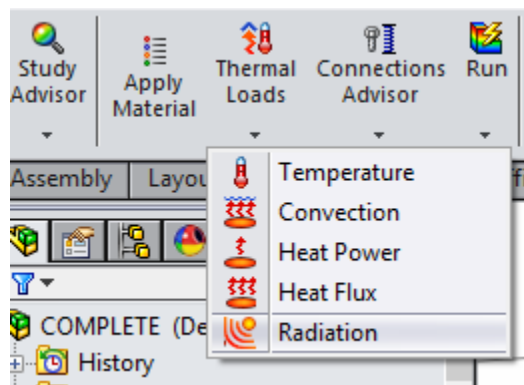
Σχήμα 3.29 Σχέση συντελεστή συναγωγής και διάκενου μεταξύ των πτερυγίων



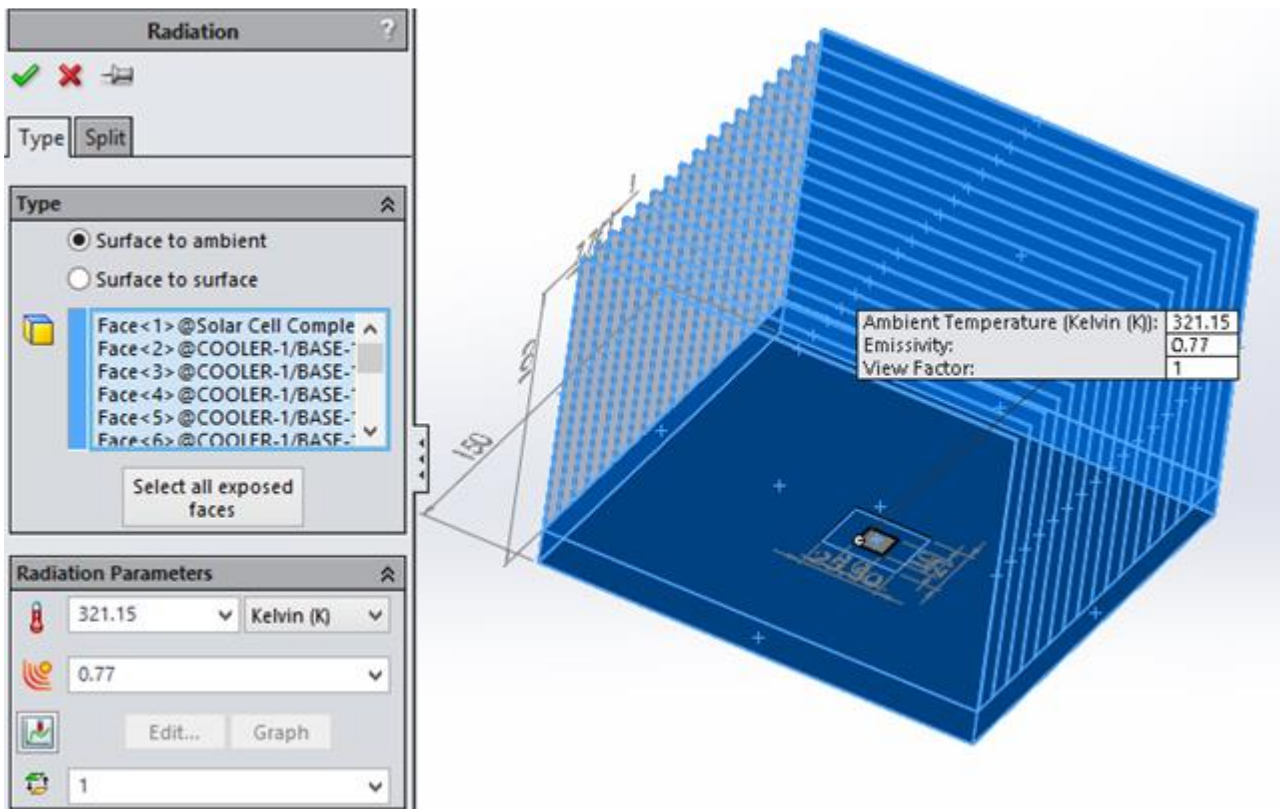
Σχήμα 3.30 Εφαρμογή των οριακών συνθηκών για την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στις εξωτερικές επιφάνειες της ψύκτρας

Ακόμη έπρεπε να καθοριστούν τα δεδομένα που απαιτούνται για τον ορισμό της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Για τον συντελεστή εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας η τιμή που χρησιμοποιήθηκε βρέθηκε βιβλιογραφικά για επιφάνεια ανοδιωμένου αλουμινίου, όπου $\epsilon=0.77$ [19]. Για την κυψελίδα καθορίστηκε ως $\epsilon=0.85$ από τα δεδομένα της κατασκευάστριας εταιρείας. Πέρα από τον συντελεστή ϵ έπρεπε να καθοριστεί και ο παράγοντας θέασης για κάθε επιφάνεια του συστήματος. Έτσι για τις εξωτερικές επιφάνειες ο παράγοντας θέασης επιλέχθηκε ίσος με 1 καθώς οι επιφάνειες αυτές ακτινοβολούν προς όλες τις διευθύνσεις προς το περιβάλλον, ενώ για τις επιφάνειες εσωτερικά των πτερυγίων, που έχουν περιορισμένη «ορατότητα» προς αυτό, επιλέχθηκε ίσος με 0.2.

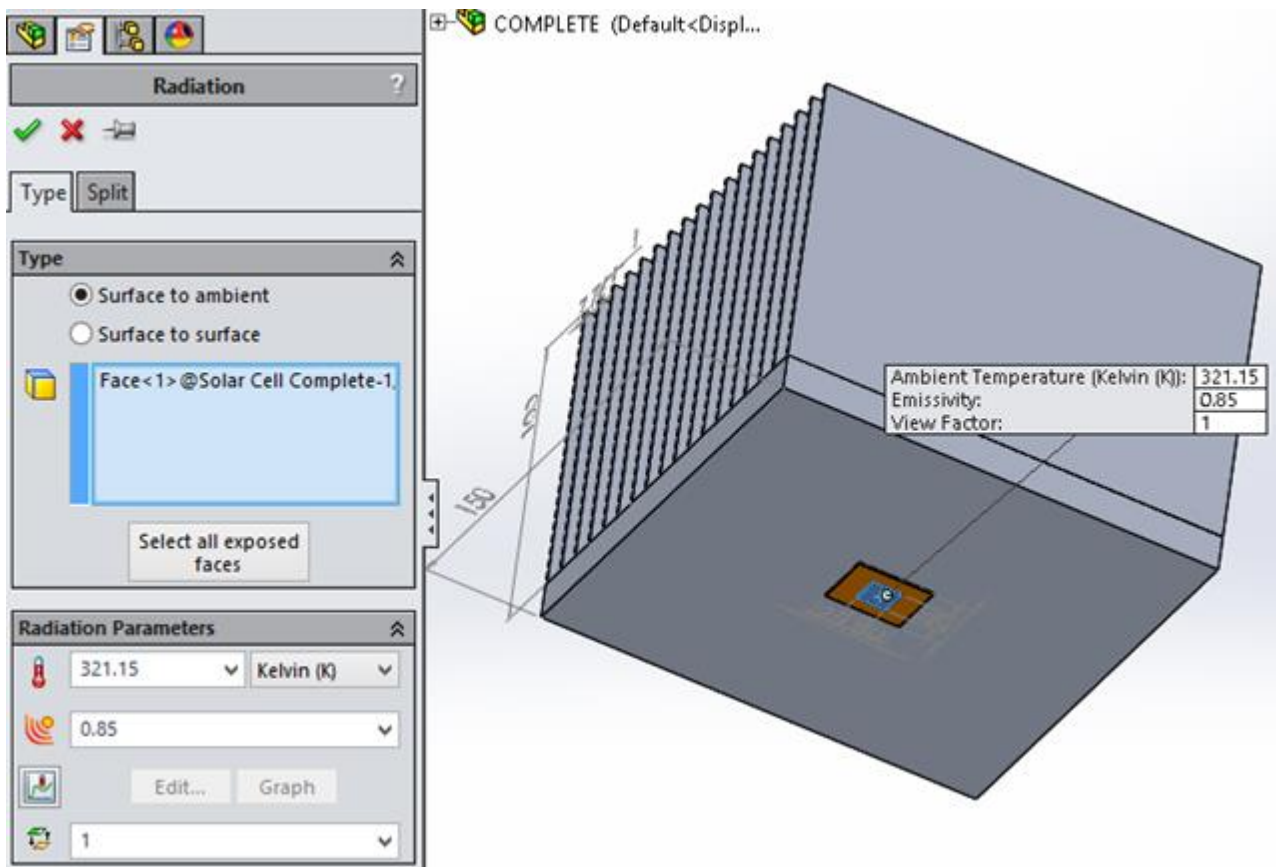
Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες για την μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας. Από το μενού Thermal Loads επιλέγεται το Radiation και στην συνέχεια επιλέγονται οι επιφάνειες εφαρμογής της ακτινοβολίας, οι συντελεστής ακτινοβολίας και παράγοντας θέασης καθώς και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.31 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών ακτινοβολίας



Σχήμα 3.32 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια της ψύκτρας



Σχήμα 3.33 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών ακτινοβολίας στην κυψελίδα

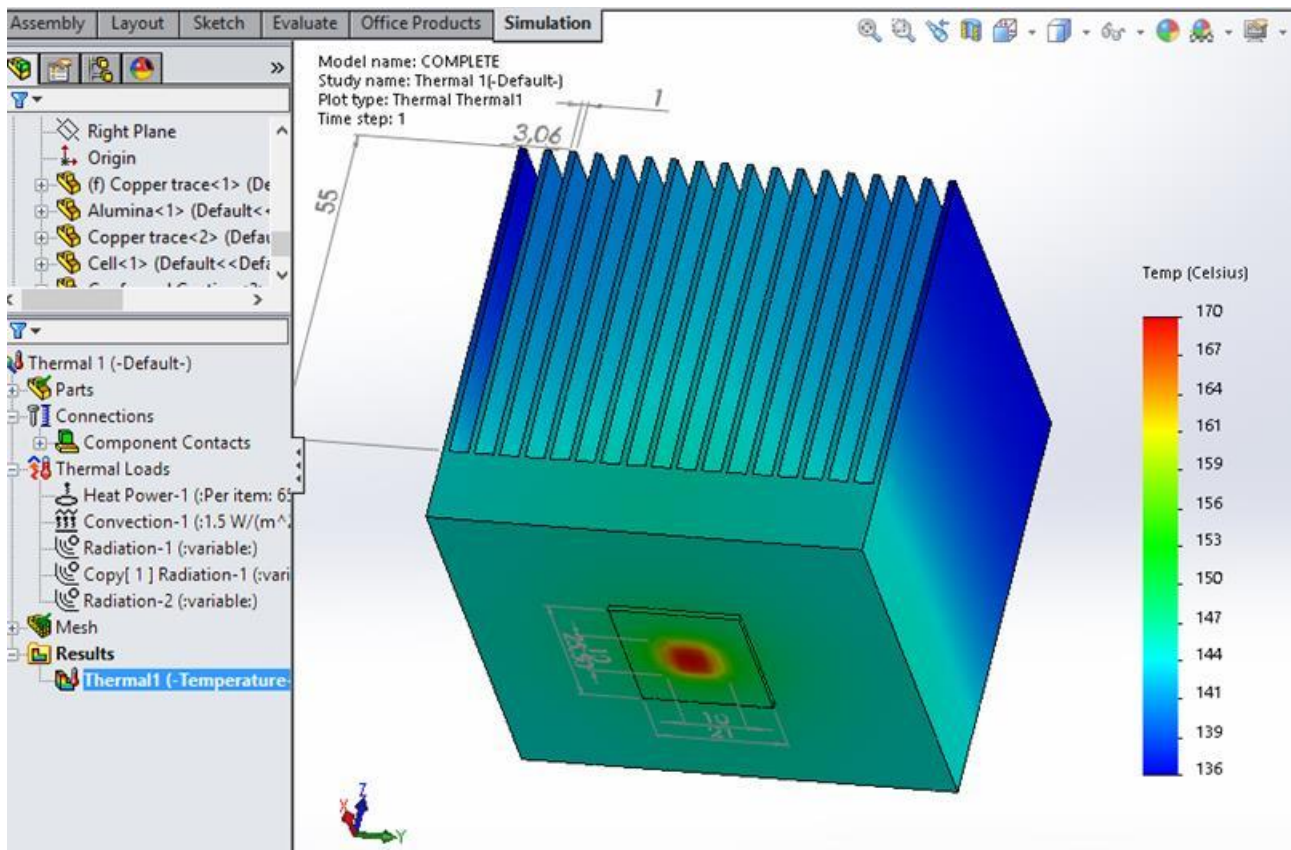
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Μελέτη Εφαρμογής

Αρχικά η ανακατασκευασμένη ψύκτρα είχε τις διαστάσεις της πρότυπης ψύκτρας (Βάση 70x70mm, Ύψος πτερυγίων 55mm και πάχος πτερυγίων 1mm). Καθ' όλη την παραμετρική ανάλυση το πάχος των πτερυγίων παρέμεινε σταθερό, $t_{ab}=1\text{mm}$. Επίσης διατηρήθηκε σταθερός και ο αριθμός τους $n=18$.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο για την αρχική ψύκτρα, το διάκενο μεταξύ των πτερυγίων είναι 3.06mm, και ανατρέχοντας στο Σχήμα 3.29 ο μέσος συντελεστής συναγωγής για τις επιφάνειες εσωτερικά των πτερυγίων που βρέθηκε ήταν $h_{\text{channel}}=1.5\text{ W/m}^2\text{K}$. Ο συντελεστής συναγωγής για τις υπόλοιπες επιφάνειες διατηρείται σταθερός για όλη την ανάλυση στα $h_{\text{external}}=6.5\text{ W/m}^2\text{K}$.

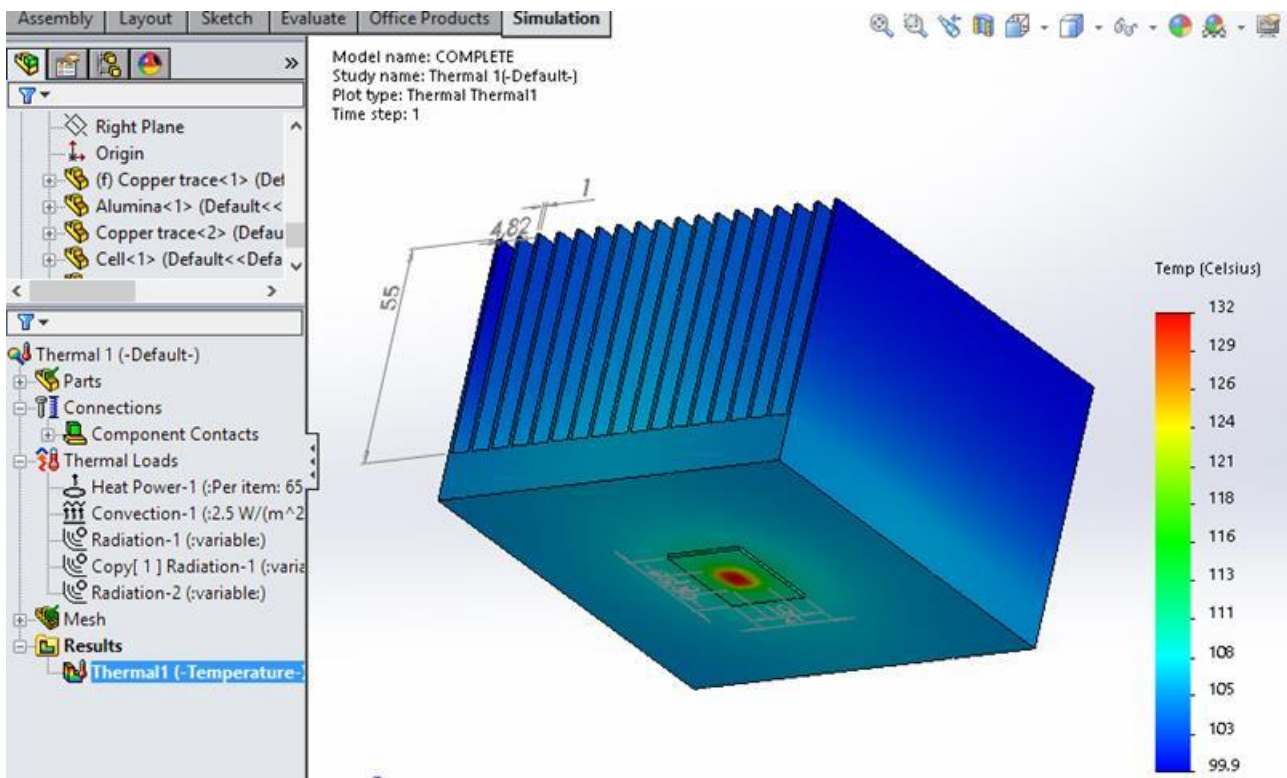
Για τα δεδομένα αυτά η προσομοίωση στο Solidworks Thermal Simulation έδωσε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Η μέγιστη θερμοκρασία της κυψελίδας ανέρχεται στους 170 °C.



Σχήμα 4.1 Θερμοκρασιακό αποτέλεσμα ψύκτρας βάσης 70x70mm, ύψους πτερυγίων 55mm, για $h_{\text{channel}}=1.5\text{ W/m}^2\text{K}$

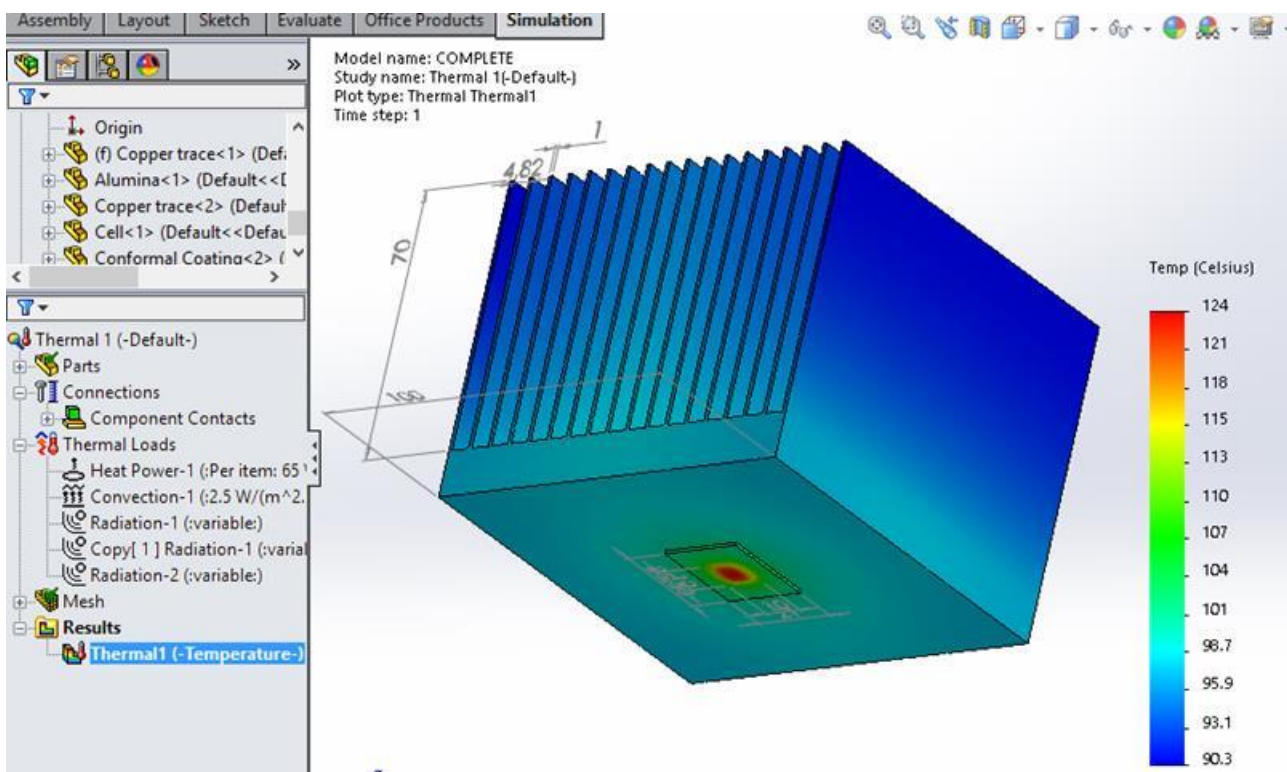
4.2 Αναζήτηση γεωμετρίας επαρκούς ψύξης

Στην συνέχεια επιλέχθηκε η αύξηση των διαστάσεων της βάσης, και κατά συνέπεια και του πλάτους των πτερυγίων, από τα 70mm σε 100mm (νέα διάσταση ψύκτρας Βάση 100x100mm, Ύψος πτερυγίων 55mm). Ο αριθμός και το πάχος των πτερυγίων κρατήθηκαν σταθερά, κάτι το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του διάκενου μεταξύ τους (από 3.06mm σε 4.81mm). Έτσι ανατρέχοντας στο Σχήμα 3.5 βλέπουμε ότι η τιμή του h_{external} αυξάνεται, λόγω της μείωσης αντίστασης της ροής στο κανάλι των πτερυγίων, και παίρνει την τιμή $h_{\text{channel}}=2.5\text{ W/m}^2\text{K}$. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



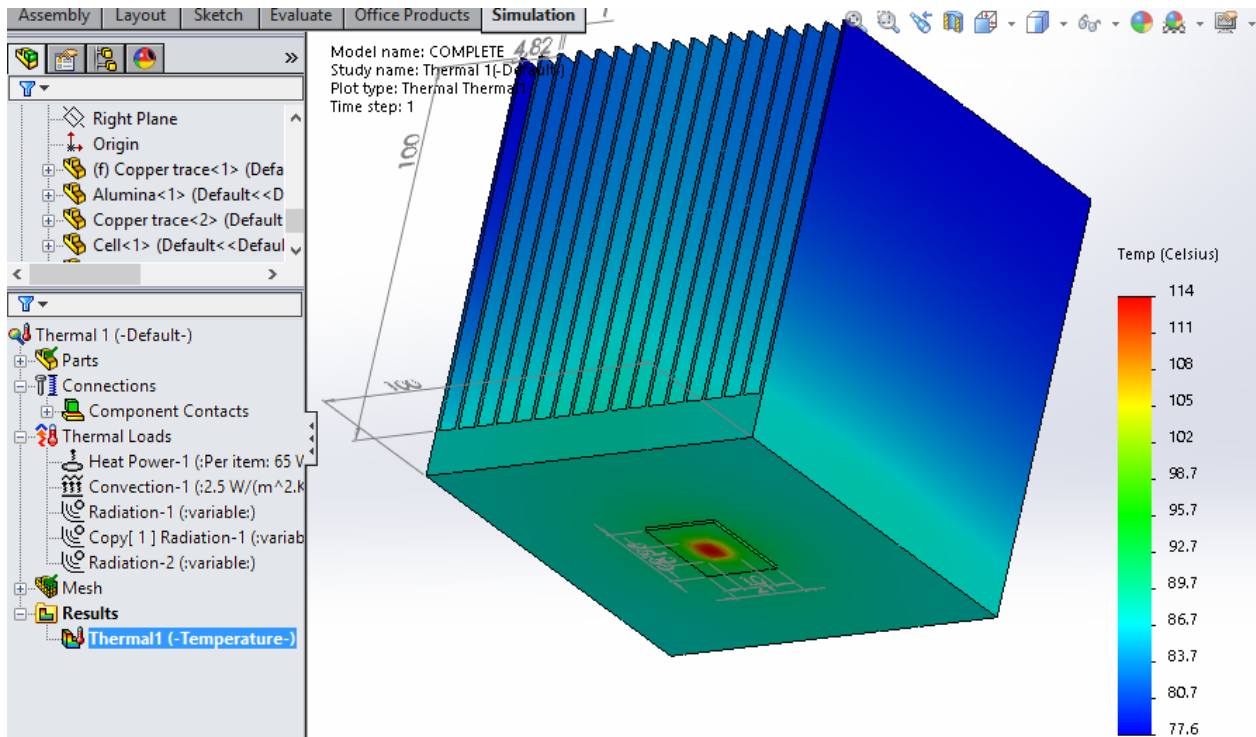
Σχήμα 4.2 Θερμοκρασιακό αποτέλεσμα ψύκτρας βάσης 100x100mm, ύψους πτερυγίων 55mm, για $h_{channel}=2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Με τις νέες διαστάσεις η κυψελίδα παρουσιάζει μεγάλη αλλά όχι ικανοποιητική πτώση της θερμοκρασίας, φτάνοντας τους 132 °C. Από την κατανομή της θερμοκρασίας στα πτερύγια παρατηρούμε ότι η μέση θερμοκρασία των πτερυγίων βρίσκεται κατά πολύ υψηλότερα της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα αύξησης του ύψους των πτερυγίων. Έτσι το νέο ύψος των πτερυγίων που επιλέγεται είναι τα 70mm. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



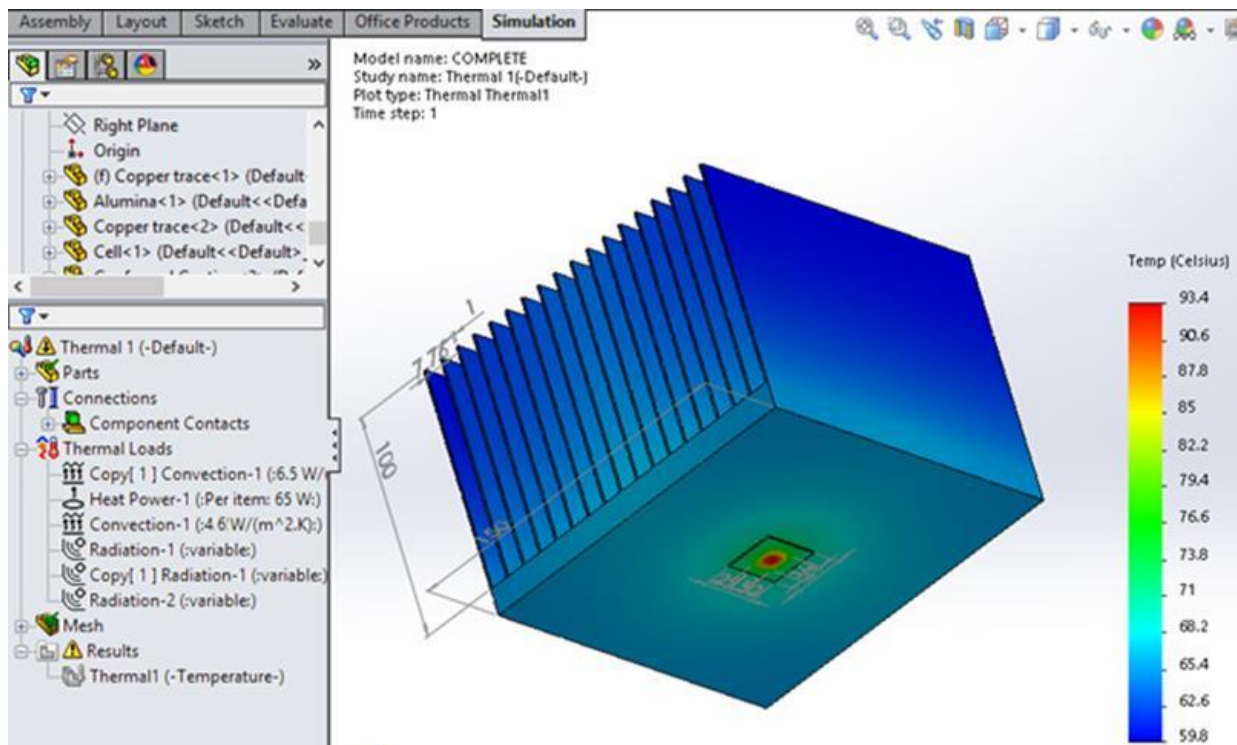
Σχήμα 4.3 Θερμοκρασιακό αποτέλεσμα ψύκτρας βάσης 100x100mm, ύψους πτερυγίων 70mm, για $h_{channel}=2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του ύψους των πτερυγίων η μέγιστη θερμοκρασία της κυψελίδας πέφτει στους 124 °C. Η μέση θερμοκρασία τους παραμένει κατά πολύ υψηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Έτσι επιχειρείται η περαιτέρω αύξηση του μήκους τους στα 100mm. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Θερμοκρασιακό αποτέλεσμα ψύκτρας βάσης 100x100mm, ύψους πτερυγίων 100mm, για $h_{channel}=2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Με τις νέες διαστάσεις η μέγιστη θερμοκρασία πέφτει στους 114 °C. Για την περαιτέρω βελτίωση του αποτελέσματος, σε αυτό το βήμα επιλέχθηκε μια δραστική αύξηση της διάστασης της βάσης της ψύκτρας από τα 100x100mm σε 150x150mm.

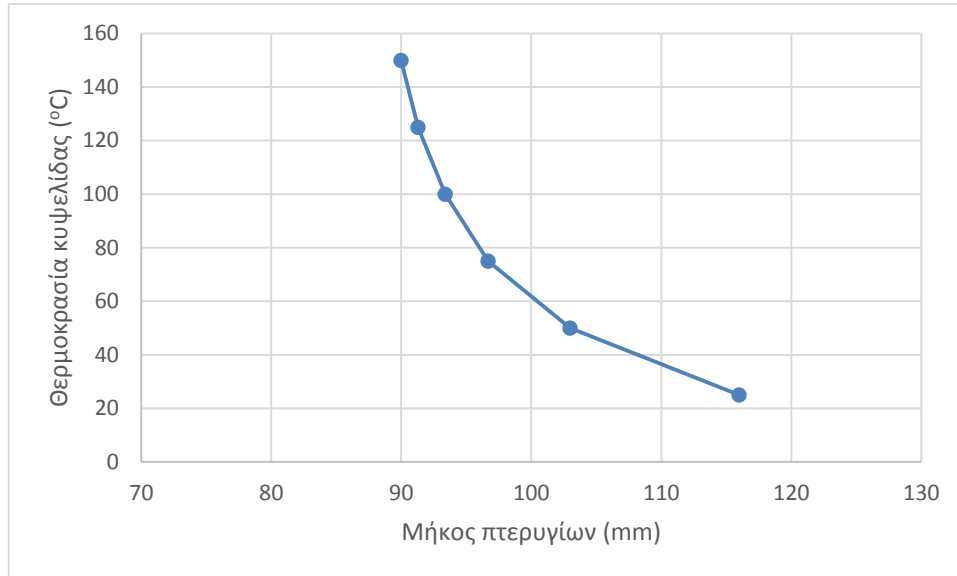


Σχήμα 4.5 Θερμοκρασιακό αποτέλεσμα ψύκτρας βάσης 150x150mm, ύψους πτερυγίων 100mm, για $h_{channel}=4.6 \text{ W/m}^2\text{K}$

Το νέο διάκενο μεταξύ των πτερυγίων είναι 7.76mm και ανατρέχοντας στο Σχήμα 3.5, επιλέγουμε τον συντελεστή συναγωγής $h_{\text{channel}}=4.6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Η νέα μέγιστη θερμοκρασία της κυψελίδας φτάνει τους 93.4 °C (Σχήμα 4.5). Στο σημείο αυτό η κυψελίδα βρίσκεται εντός των θερμοκρασιακών ορίων λειτουργίας και άρα η γεωμετρία αυτή κρίνεται ικανή για την παθητική ψύξη της.

4.3 Παραμετρική ανάλυση με μεταβαλλόμενο το μήκος των πτερυγίων

Στο σημείο αυτό έγινε μια ανάλυση του θερμοκρασιακού αποτελέσματος του συστήματος, μεταβάλλοντας κάθε φορά το μήκος των πτερυγίων της ψύκτρας. Σε αυτή την ανάλυση η βάση της ψύκτρας διατηρήθηκε σταθερή στα 150x150mm και τα μήκη των πτερυγίων που εξετάστηκαν ήταν από 25mm μέχρι και 150mm με βήμα αύξησης 25mm. Ο εσωτερικός συντελεστής συναγωγής θεωρήθηκε σταθερός, $h_{\text{channel}}=4.6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 4.6.

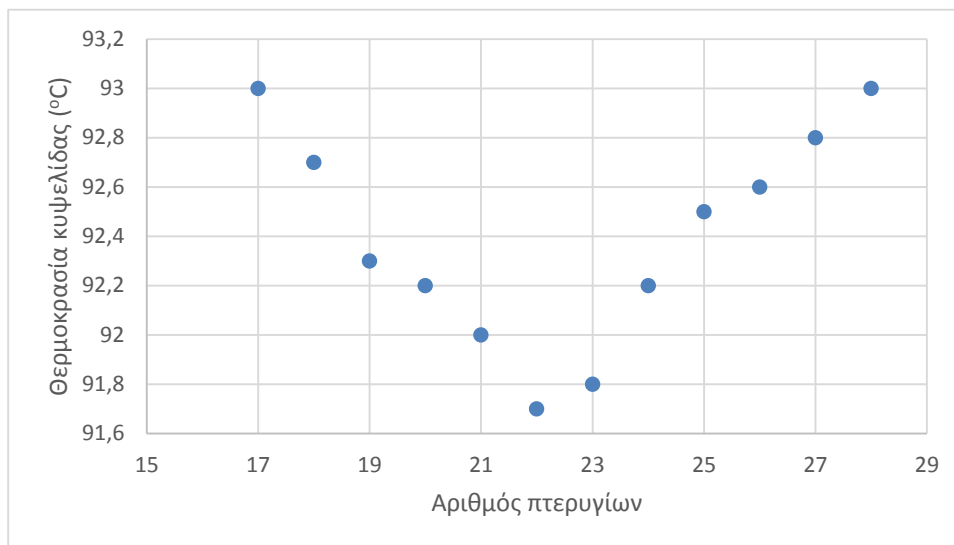


Σχήμα 4.6 Θερμοκρασία κυψελίδας συναρτήσει του μήκους των πτερυγίων

4.4 Παραμετρική ανάλυση με μεταβαλλόμενο τον αριθμό των πτερυγίων

Στο σημείο αυτό έγινε μια παραμετρική ανάλυση μεταβάλλοντας τον αριθμό των πτερυγίων και διατηρώντας τις διαστάσεις της βάσης καθώς και τα μήκη των πτερυγίων σταθερά. Η βάση είχε διαστάσεις 150x150mm και το μήκος των πτερυγίων διατηρήθηκε στα 100mm. Καθώς μεταβάλλαμε τον αριθμό των πτερυγίων, το διάκενο μεταξύ των πτερυγίων μεταβάλλεται άρα και ο συντελεστής συναγωγής $h_{channel}$.

Στον πίνακα 4.1 εμφανίζεται η μεταβολή του $h_{channel}$ σε σχέση με το διάκενο μεταξύ των πτερυγίων καθώς και το θερμοκρασιακό αποτέλεσμα που προκύπτει για την κυψελίδα σε κάθε περίπτωση.



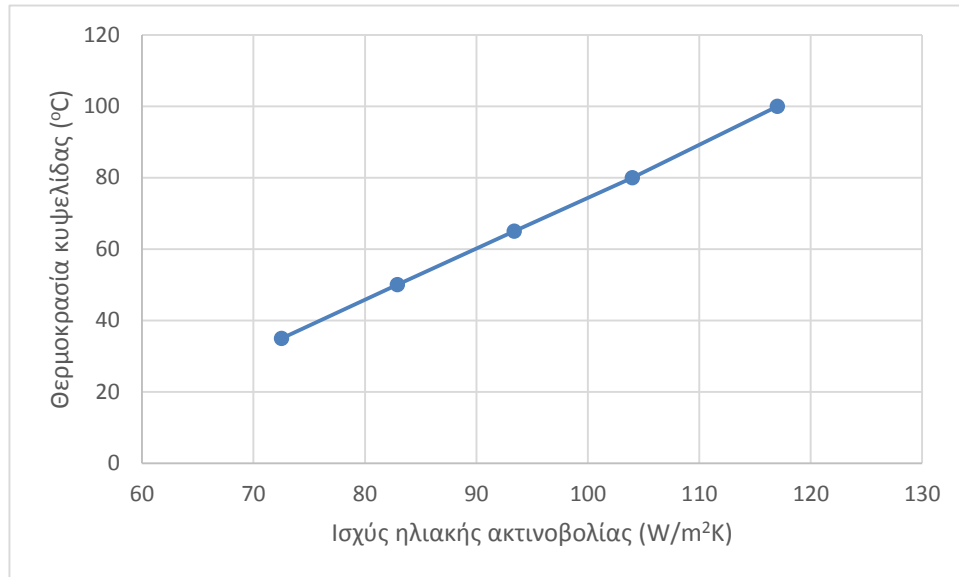
Σχήμα 4.7 Θερμοκρασία κυψελίδας συναρτήσει του αριθμού των πτερυγίων

Πίνακας 4.1 Συσχέτιση αριθμού πτερυγίων, διακένου, εσωτερικού συντελεστή συναγωγής και θερμοκρασίας κυψελίδας

Αριθ. πτερυγίων	Διάκενο (mm)	$h_{channel}$ (W/m ² K)	T (C°)
28	4,5	2,2	93
27	4,73	2,4	92,8
26	4,96	2,75	92,6
25	5,21	2,9	92,5
24	5,48	3,2	92,2
23	5,77	3,6	91,8
22	6,1	3,9	91,7
21	6,45	4,1	92
20	6,84	4,3	92,2
19	7,28	4,6	92,3
18	7,76	4,8	92,7
17	8,31	5,1	93

4.5 Παραμετρική ανάλυση με μεταβαλλόμενη την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Εδώ πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική ανάλυση μεταβάλλοντας την συγκεντρωτική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κελί του συστήματος. Οι διαστάσεις της ψύκτρας διατηρήθηκαν σταθερές, με την βάση της στα 150x150mm και το μήκος των πτερυγίων στα 100mm. Η ακτινοβολία κυμάνθηκε από 35 W/cm² έως και 100 W/cm². Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.8 Θερμοκρασία κυψελίδας συναρτήσει της ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

4.6 Ενεργειακή προσομοίωση του φβ κελιού

Στη συνέχεια εκτελέστηκε ενεργειακή προσομοίωση του φβ κελιού, με μία ψύκτρα διαστάσεων βάσης 160x160mm και μήκους πτερυγίων 160mm. Οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του οπτικού ομογενοποιητή μήκους 60mm είναι αντίστοιχα $\alpha_1 = 95.5\%$ και $\alpha_2 = 80.8\%$. Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας υπολογίζεται από την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων για χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας I_T και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος T_a . Οι τιμές αυτές υπολογίζονται ως μέσες-μηνιαίες τιμές σε ωριαία βάση σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.3. Τέλος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος με την εφαρμογή των Εξισώσεων 2.31 και 2.32.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη θερμοκρασία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψελίδας δίνονται στον Πίνακα 4.2, ενώ στον Πίνακα 4.3 δίνονται οι τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, στον Πίνακα 4.4 δίνονται τα αποτελέσματα της μηνιαίας παραγωγής ενέργειας του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος (ανοιγμένα στην επιφάνεια εισόδου του ανακλαστήρα) και συγκρίνονται με την ενεργειακή παραγωγή συμβατικού συστήματος πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού που παρακολουθεί τον ήλιο (με την ενέργεια ανοιγμένη στη φωτοβολταϊκή επιφάνεια).

Πίνακας 4.2 Μέσες-μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψελίδας (°C)

Μήνας	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ιανουάριος	-	-	-	23.6	30.4	36.0	39.8	41.5	41.1	38.6	34.4	28.4	-	-	-
Φεβρουάριος	-	-	17.3	23.8	29.7	34.5	38.2	39.3	39.0	37.1	33.3	28.2	22.0	-	-
Μάρτιος	-	-	25.8	32.3	38.4	43.3	46.7	48.4	48.3	46.4	42.6	37.7	31.7	-	-
Απρίλιος	-	29.4	34.1	39.9	45.5	50.2	53.5	55.2	55.1	53.7	50.4	46.1	40.6	34.4	-
Μάιος	36.8	41.9	47.4	53.2	58.7	63.5	66.9	68.7	68.9	67.5	64.4	60.3	55.4	48.9	42.7
Ιούνιος	36.8	50.5	55.9	61.5	67.0	71.7	75.1	77.0	77.3	76.1	73.1	69.2	64.0	58.0	51.8
Ιούλιος	51.0	56.4	62.2	62.0	74.5	79.6	83.3	85.9	85.7	84.3	81.8	76.8	71.1	64.6	57.8
Αύγουστος	-	54.2	60.6	67.9	74.2	79.8	84.4	86.0	86.7	84.5	81.1	76.4	69.5	62.2	-
Σεπτέμβριος	-	39.9	47.0	54.2	61.4	66.8	70.8	73.3	72.8	71.2	67.0	61.9	54.8	47.3	-
Οκτώβριος	-	-	36.0	43.7	51.0	56.9	61.1	63.1	62.9	60.6	56.4	50.4	43.0	-	-
Νοέμβριος	-	-	-	30.8	37.7	43.3	47.2	49.1	48.7	46.2	41.9	36.0	-	-	-
Δεκέμβριος	-	-	-	23.4	30.3	35.7	39.4	41.2	40.7	38.3	33.8	28.0	-	-	-

Πίνακας 4.3 Μέσες-μηνιαίες τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό συστήματα (Wh ανά τετραγωνικό εκατοστό φβ)

Μήνας	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ιανουάριος	-	-	-	8.82	12.23	14.81	16.43	16.97	16.41	14.79	12.20	8.80	-	-	-
Φεβρουάριος	-	-	5.14	8.54	11.43	13.63	15.00	15.47	14.99	13.61	11.40	8.51	5.13	-	-
Μάρτιος	-	-	9.49	12.79	15.59	17.73	19.06	19.51	19.04	17.70	15.55	12.75	9.46	-	-
Απρίλιος	-	9.42	12.55	15.45	17.91	19.78	20.95	21.34	20.93	19.74	17.86	15.39	12.51	9.39	-
Μάιος	11.64	14.61	17.55	20.27	22.58	24.34	25.43	25.79	25.40	24.28	22.50	20.18	17.47	14.54	11.60
Ιούνιος	14.30	17.07	19.88	22.48	24.69	26.37	27.41	27.75	27.37	26.30	24.60	22.38	19.78	16.99	14.17
Ιούλιος	16.28	19.38	22.46	25.39	27.70	29.52	30.65	31.01	30.61	29.44	27.57	25.16	22.34	19.28	16.21
Αύγουστος	-	18.10	21.64	24.90	27.67	29.77	31.06	31.49	31.01	29.68	27.55	24.77	21.52	18.01	-
Σεπτέμβριος	-	11.79	15.65	19.22	22.24	24.54	25.96	26.43	25.93	24.47	22.16	19.12	15.58	11.74	-
Οκτώβριος	-	-	11.40	15.38	18.77	21.34	22.94	23.47	22.91	21.29	18.70	15.32	11.35	-	-
Νοέμβριος	-	-	-	10.07	13.48	16.08	17.70	18.24	17.68	16.05	13.45	10.04	-	-	-
Δεκέμβριος	-	-	-	7.83	11.23	13.81	15.42	15.97	15.41	13.79	11.20	7.81	-	-	-

Πίνακας 4.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα και από συμβατικό φωτοβολταϊκό σύστημα

Μήνας	Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας	
	Συγκεντρωτικό ΦΒ Σύστημα (kWh ανά τετραγωνικό μέτρο ανακλαστήρα)	Συμβατικό ΦΒ Σύστημα (kWh ανά τετραγωνικό μέτρο φωτοβολταϊκού)
Ιανουάριος	23.53	16.81
Φεβρουάριος	21.50	16.33
Μάρτιος	32.68	24.05
Απρίλιος	39.98	28.15
Μάιος	57.77	35.64
Ιούνιος	62.16	36.27
Ιούλιος	72.27	40.02
Αύγουστος	65.32	36.19
Σεπτέμβριος	49.65	29.90
Οκτώβριος	39.31	24.98
Νοέμβριος	24.90	17.25
Δεκέμβριος	21.79	15.59
ΕΤΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ	511	321

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η τρισδιάστατη σχεδίαση σε συνδυασμό με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν έναν εύχρηστο, και σχετικά ταχύ, τρόπο προσέγγισης της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ψύξης συγκεντρωτικής κυψελίδας.
- Ωστόσο για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων απαιτούνται είτε πειραματικά δεδομένα είτε αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις για την ακριβή προσέγγιση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας.
- Η χρήση ενός λογισμικού πακέτου, σαν το Solidworks, που περιλαμβάνει λογισμικό για την τρισδιάστατη σχεδίαση αλλά και για την προσομοίωση του συστήματος, μειώνει κατά πολύ τον χρόνο της παραμετρικής ανάλυσης καθώς επιτρέπεται η διατήρηση των συντομογραφιών του ανασχηματιζόμενου μοντέλου, όπου αυτό κρίνεται θεμιτό.
- Με την αύξηση των διαστάσεων την ψύκτρας μειώνεται η θερμοκρασία της κυψελίδας καθώς αυξάνεται η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον. Ωστόσο η αύξηση των πτερυγίων δεν επιφέρει πάντα θετικό αποτέλεσμα καθώς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7, η αύξηση τους πάνω από ένα όριο επιφέρει αρνητικό αποτέλεσμα λόγω της σημαντικής μείωσης του εσωτερικού συντελεστή συναγωγής.
- Η παθητική ψύξη μίας φωτοβολταϊκής κυψελίδας υψηλής συγκέντρωσης κρίνεται εφικτή ακόμα και στις πιο ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες που έχουν καταγραφεί ποτέ για την Ελλάδα.
- Το συγκεκριμένο συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει 37.1% περισσότερη ετήσια ενέργεια από το ισοδύναμη επιφάνειας συμβατικό φωτοβολταϊκό.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Keith Lovegrove, Wes Stein (Editors). (2012). Concentrating Solar Power Technology, 1st Edition Principles, Developments and Applications. Woodhead Publishing Limited. Cambridge.
- [2] George Cherucheril, Stephen March, Avinav Verma. (2011). Multijunction solar cells. EE 332:1-28
- [3] F. Dimroth. (2006). High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors 3:373–379
- [4] Antonio Luque, Viacheslav Andreev (Editors). (2007). Concentrator Photovoltaics. Springer. Berlin
- [5] Διονύσης Κ. Ασημακόπουλος, Βασιλική Ι. Λυγερού, Γεώργιος Α. Αραμπατζής. (2009). *Μεταφορά Θερμότητας*. Παπασωτηρίου. Αθήνα.
- [6] Joaquim Guitart Corominas, Amir ARZANDÉ. (2011). Heat Sink Analytical Modeling. Département d'Electrotechnique et de Systèmes d'Énergie - École Supérieure d'Électricité. France
- [7] J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [8] G. Kornaros, 1999, Climatic data of the stations of the Hellenic National Meteorological Service (period 1955-1997), Vols. 1 & 2. National Meteorological Service (EMY), Athens, Greece.
- [9] http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C4MJ_40Percent_Solar_Cell.pdf
- [10] I. Zeid, CAD/CAM Theory and Practice, McGraw-Hill, 1991.
- [11] M. Mantyla, An Introduction to Solid Modelling, Computer Science Press, 1988.
- [12] G. Farin, Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design, Academic Press Professional, 1990.
- [13] <http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C3MJ%20CCA-100%20data%20sheet%2020100828.pdf>
- [14] H. Cotal and J. Frost. (2010). Heat transfer modeling of concentrator multijunction solar cell assemblies using finite difference techniques. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 35th IEEE. Honolulu.
- [15] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6637#5>
- [16] J. Ed Akin. (2009). Finite Element Analysis Concepts via Solidworks. World Scientific. Rice University, Houston, Texas
- [17] H. R. Goshayesi, F. Ampofo. (2009). Heat transfer by natural convection from vertical and horizontal surfaces using vertical fins. Energy and Power Engineering 85-89
- [18] Athanasios D. Sarantopoulos. (1977). Europe: Highest Temperature. <http://wmo.asu.edu/europe-highest-temperature>
- [19] Aluminum Anodized: http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1 – Εργασία Συνεδρίου

Γεράσιμος Α. Παγκράτης, Χαράλαμπος Α. Χρυσίνας, Νίκος Ε. Στεφανάκης, Ανδρέας Γ. Μπουντουβής. (2014). Υπολογιστική Ανάλυση συστήματος συγκεντρωτικού παραβολοειδούς ανακλαστήρα με φωτοβολταϊκή κυψελίδα παθητικής ψύξης. 10^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας. Θεσσαλονίκη. 26-28 Νοεμβρίου 2014. 741-750.

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

10^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

στη μνήμη του Νίκου Κυριάκη

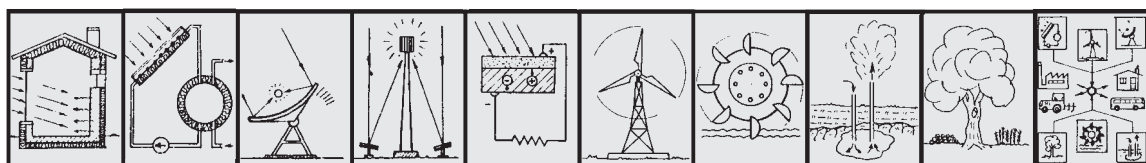
26 - 28 Νοεμβρίου 2014, Θεσσαλονίκη
Συνεδριακό Κέντρο ΚΕ.Δ.Ε.Α. ΑΠΘ



ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΤΟΜΟΣ Β΄

Διοργάνωση
Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ

Υπό την αιγίδα της
Πολυτεχνικής Σχολής ΑΠΘ



ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΚΥΨΕΛΙΔΑ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Γεράσιμος Α. Παγκράτης, Χαράλαμπος Α. Χρυσίνας, Νίκος Ε. Στεφανάκης*,
Ανδρέας Γ. Μπουντουβής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Ηλιακής Μηχανικής
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

* Τηλ.: 210-7723296, email: nstefa@chemeng.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν σήμερα μία ώριμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αν και τα τελευταία χρόνια το κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών κυψελίδων έχει μειωθεί δραστικά, απαιτείται περαιτέρω μείωση του κόστους ώστε τα φωτοβολταϊκά να είναι οικονομικά βιώσιμα. Αυτός ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί, μεταξύ άλλων, με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα, στα οποία κατάλληλο οπτικό σύστημα συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε ειδικές φωτοβολταϊκές κυψελίδες υψηλού βαθμού απόδοσης. Στην παρούσα εργασία διερευνάται ένα στοιχείο (module) συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος στο οποίο ένα ελλειπτικό παραβολοειδές κάτοπτρο (ανακλαστήρας) συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε τραπεζοειδή ομογενοποιητή και καταλήγει σε συγκεντρωτική φωτοβολταϊκή κυψελίδα, η οποία είναι προσαρτημένη σε κατάλληλη επιφάνεια απορροής θερμότητας. Η ανάλυση του οπτικού τμήματος γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo Ray Tracing, μέσω της οποίας υπολογίζεται ο γεωμετρικός και οπτικός λόγος συγκέντρωσης και εξετάζεται και η επίδραση της γεωμετρίας του ομογενοποιητή στις οπτικές απώλειες. Η ανάλυση του συστήματος παθητικής ψύξης της φωτοβολταϊκής κυψελίδας γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω της οποίας διερευνάται η επίδραση της γεωμετρίας της ψύκτρας στην απόδοση του συστήματος. Τέλος, με την κατάλληλη συνδυαστική εφαρμογή των δύο μεθόδων υπολογίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συγκεκριμένου συστήματος.

Λέξεις Κλειδιά: Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Οπτική Ανάλυση, Θερμική Ανάλυση, Προσομοίωση Λειτουργίας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και η ανάπτυξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (ΣΦΒ) συστημάτων έχει μακρά ιστορία [1], μόνο τα τελευταία χρόνια αυτά κατάφεραν να εισέλθουν στην αγορά των φωτοβολταϊκών. Τα πρώτα ΣΦΒ συστήματα που αναπτύχθηκαν λειτουργούσαν με σχετικά χαμηλό λόγο συγκέντρωσης (<100ήλιους) και χρησιμοποιούσαν φωτοβολταϊκές κυψελίδες πυριτίου. Τα συστήματα αυτά ήταν εμπορικά μη ανταγωνιστικά εξαιτίας του υψηλού κόστους και της ανεπαρκώς αποδεδειγμένης αξιοπιστίας τους. Η τεχνολογία των ΣΦΒ ανέκτησε το επενδυτικό ενδιαφέρον στα τέλη της δεκαετίας του 1990, με την εκτεταμένη ανάπτυξη των πολυστρωματικών (multi-junction) κυψελίδων, οι αποδόσεις των οποίων ξεπερνούν κατά πολύ τις αντίστοιχες αποδόσεις των φωτοβολταϊκών κυψελίδων πυριτίου αγγίζοντας ακόμα και το 42% [2],[3].

Συγκεντρώσεις της τάξης των 100 με 200ήλιους είχαν θεωρηθεί ως το ανώτερο λειτουργικό όριο συγκέντρωσης για τα ΣΦΒ συστήματα, εξαιτίας περιορισμών σχετιζόμενων με τις σειριακές αντιστάσεις των κυψελίδων και την απορροφή θερμότητας [1]. Παρόλα αυτά τα σύγχρονα ΣΦΒ μπορούν και λειτουργούν σε συνθήκες συγκέντρωσης κοντά στους 500 ήλιους, ενώ η τεχνολογική τάση είναι προς συστήματα υψηλότερων ηλιακών συγκεντρώσεων [4],[5]. Δεδομένου ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές κυψελίδες είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η επίτευξη υψηλής ηλιακής συγκέντρωσης συνεπάγεται μικρότερη επιφάνεια φωτοβολταϊκού για την παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δραστική μείωση του κόστους, καθότι οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες αντιπροσωπεύουν περίπου το 30-40% του συνολικού κόστους ενός τυπικού ΣΦΒ συστήματος.

Η λειτουργική επίτευξη υψηλών συγκεντρώσεων προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλου συστήματος απορροής της θερμότητας από τις φωτοβολταϊκές κυψελίδες. Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελίδων επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της, μειώνοντας την μέσω ενός αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας [1]. Επιπλέον, υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές καταπονήσεις, όπως για παράδειγμα παραμορφώσεις της φωτοβολταϊκής επιφάνειας, αποκόλληση της εμπρόσθιας επίστρωσης, δημιουργία μικρορωγμών στην κυψελίδα κ.α. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται συνήθως στους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής των υλικών που χρησιμοποιούνται για να συνθέσουν την πολυστρωματική δομή της κυψελίδας [6].

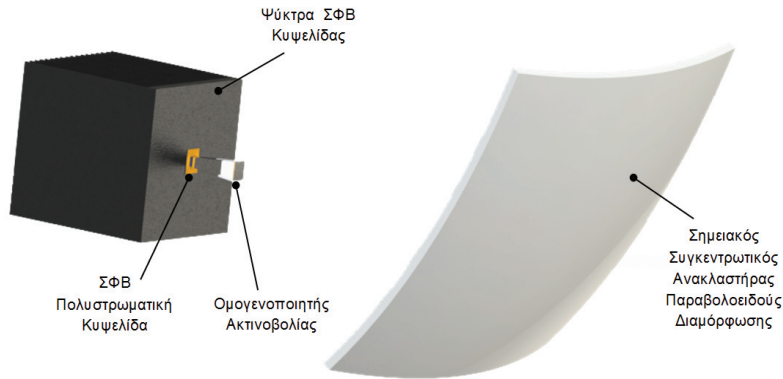
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ένα στοιχείο (module) συγκεντρωτικού συστήματος υψηλής συγκέντρωσης στο οποίο ένα ελλειπτικό παραβολοειδές κάτοπτρο συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε τραπεζοειδή ομογενοποιητή. Η ομογενοποιημένη ακτινοβολία καταλήγει σε πολυστρωματική φωτοβολταϊκή κυψελίδα, η οποία είναι προσαρτημένη σε κατάλληλη επιφάνεια απορροής θερμότητας (ψύκτρα). Σκοπός της εργασίας είναι η εφαρμογή μιας ολιστικής μεθοδολογίας σχεδιασμού και ανάλυσης του συγκεκριμένου συστήματος με στόχο τη διερεύνηση της λειτουργίας του και την αποτίμηση της απόδοσης του. Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα εφαρμοστεί και σε αντίστοιχο ΣΦΒ σύστημα που θα αναπτυχθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011: ΠΡΩΤΕΑΣ ΗΛΙΑΚΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗ/11ΣΥΝ_7_1500».

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα που εξετάστηκε αποτελείται από ένα ελλειπτικό παραβολοειδή καθρέπτη (ανακλαστήρα) διαστάσεων 400x400mm, ο οποίος συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία σε εστιακή απόσταση 310mm. Στην εστία συγκέντρωσης βρίσκεται κατάλληλα τοποθετημένος γυάλινος τραπεζοειδής ομογενοποιητής (επιφάνεια εισόδου: 20x20mm,

επιφάνεια εξόδου: 10x10mm) ολικής εσωτερικής ανάκλασης, ο οποίος διαχέει την ηλιακή ακτινοβολία σε πολυστρωματική κυψελίδα διαστάσεων 10x10mm. Η κυψελίδα είναι προσαρτημένη σε κατάλληλη επιφάνεια απορροής θερμότητας η οποία διαμορφώνεται ως μεταλλική ψύκτρα επάλληλων περυγίων. Το σύστημα σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα τρισδιάστατης στερεάς μοντελοποίησης SOLIDWORKS® και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση των στοιχείων του συστήματος

2.2. ΟΠΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Για την ανάλυση του συστήματος συγκέντρωσης εφαρμόστηκε στο τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο οπτική προσομοίωση ιχνηλάτησης (ray tracing) με το πρόγραμμα TRACEPRO®. Με τη μέθοδο της ιχνηλάτησης πραγματοποιείται εκπομπή ακτίνων από κατάλληλη πηγή, οι οποίες προσπίπτουν στο οπτικό σύστημα, και λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι ανάκλασης, διαπερατότητας, σκίασης κ.α. [7]. Για τη προσομοίωση των φαινομένων της σκέδασης και της περίθλασης του φωτός, καθώς και για τη κατανομή των ακτίνων της πηγής εφαρμόζεται η στοχαστική μέθοδος Monte Carlo. Για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης η πηγή διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να πραγματοποιεί γεωμετρική κατανομή ακτίνων η οποία θα λαμβάνει υπόψη και τη φαινόμενη γωνία του ηλιακού δίσκου από την Γή. Για τον περιορισμό του στατιστικού σφάλματος σε τιμές κάτω του 1% επιλέχθηκε μεγάλος αριθμός ακτίνων (>10,000). Η ανακλαστική επιφάνεια του ανακλαστήρα ορίστηκε να είναι τυπικός καθρέπτης, ενώ το υλικό κατασκευής του ομογενοποιητή επιλέχθηκε να είναι ειδικό οπτικό γυαλί N-BK7.

Για την αποτίμηση της σχεδίασης υπολογίστηκαν οι απώλειες των οπτικών υποσυστημάτων καθώς και ο λόγος συγκέντρωσης (concentration ratio) της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο τελευταίος διακρίνεται στο γεωμετρικό C_G και στον οπτικό C_O λόγο συγκέντρωσης, ο υπολογισμός των οποίων δίνεται από τις σχέσεις:

$$C_G = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

$$C_O = \frac{1}{A_2} \cdot \frac{\int I_2 dA_2}{I_1} \quad (2)$$

όπου, A_1 η επιφάνεια εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας, A_2 η επιφάνεια του τελικού αποδέκτη, I_1 η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια εισόδου και I_2 η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του τελικού αποδέκτη.

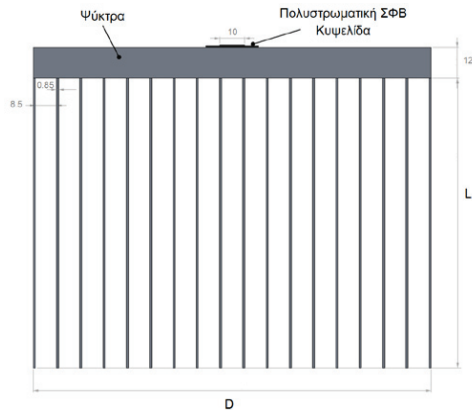
Στα πλαίσια της μελέτης πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης του μήκους του ομογενοποιητή στις απώλειες του οπτικού συστήματος.

2.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ

Η θερμική προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων του SOLIDWORKS® και συγκεκριμένα με το πρόσθετο θερμικής προσομοίωσης. Κατά το σχεδιασμό της πολυστρωματικής φωτοβολταϊκής κυψελίδας ελήφθησαν υπόψη όλα τα στρώματα υλικών που την συνθέτουν και τους αποδόθηκαν οι κατάλληλες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 1 [8]. Η σχεδίαση του συστήματος ψύξης έγινε με σημείο αναφοράς μια τυπική μεταλλική ψύκτρα ηλεκτρονικών κυκλωμάτων βασισμένη στην αρχή της παθητικής ψύξης (passive cooling). Μια εγκάρσια τομή του συστήματος εικονίζεται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1: Τιμές θερμικής αγωγιμότητας των υλικών σύνθεσης της ΦΒ κυψελίδας

Υλικό/ Στρώση	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Conformal Coating	0.18
Solar Cell	60
Sn95Ag5 Solder	37.8
Copper	385
Alumina (96% Al2O3)	25



Σχήμα 2: Εγκάρσια τομή συστήματος παθητικής ψύξης της φωτοβολταϊκής κυψελίδας

Κατά τη θερμική προσομοίωση ορίστηκε κατάλληλη πηγή θερμότητας σχετιζόμενη με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και αποδόθηκαν κατάλληλες τιμές παραμέτρων για τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας που υφίστανται στο πρόβλημα ως εξής:

- Ακτινοβολία: από την εξωτερική επιφάνεια του συστήματος ψύξης προς το περιβάλλον με συντελεστή εκπομπής $\epsilon=0.7$.
- Συναγωγή: από την εξωτερική επιφάνεια του συστήματος ψύξης και από τα πτερυγία του προς το περιβάλλον. Ο μέσος συντελεστής συναγωγής που χρησιμοποιήθηκε είναι $h=4.2 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Αγωγή: ανάμεσα στα στρώματα που αποτελούν την φωτοβολταϊκή κυψελίδα και στην συνέχεια στη ψύκτρα. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής που χρησιμοποιήθηκαν για τα στρώματα της κυψελίδας αναφέρονται στον Πίνακα 1, ενώ για την ψύκτρα χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του Αλουμινίου-6063, $k=218 \text{ W/mK}$.

Στα πλαίσια της μελέτης της ψύκτρας πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της διάστασης D της βάσης και του μήκους L των πτερυγίων στη θερμοκρασία T_c της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Η τελευταία θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των λειτουργικών ορίων -40°C και 100°C [9]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη έγινε βάσει τυπικών ακραίων τιμών

προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ήτοι $I = 100\text{W/cm}^2$ και $T_a = 40^\circ\text{C}$.

2.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Τα σημειακά συγκεντρωτικά συστήματα πρέπει να παρακολουθούν χρονικά την πορεία του ήλιου στον ουράνιο θόλο, ενώ συγκεντρώνουν μόνο την άμεση (beam) συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί σε ωριαία βάση, I_T , μέσω της εξίσωσης:

$$I_T = \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_b(\omega) d\omega \cdot R_b(\omega) d\omega \quad (3)$$

όπου, ω είναι η ωριαία γωνία του ήλιου σε μοίρες, I_b η άμεση ακτινοβολία, R_b γεωμετρικός λόγος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την οριζόντια ακτινοβολία.

Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των ανωτέρω μεγεθών παρατίθεται στο βιβλίο των Duffie και Beckman [10] και προαπαιτεί τη γνώση της συνολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, η οποία είναι ευρέως διαθέσιμη στα αρχεία των μετεωρολογικών σταθμών. Στην παρούσα μελέτη, έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες μηνιαίες τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας από τα αρχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την περιοχή της Αθήνας ($37^\circ 58' \text{B}$, $23^\circ 43' \text{E}$) [11].

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της ΦΒ κυψελίδας ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_{PV} = I_T \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot n_{PV} \cdot (1 - \lambda) \quad (4)$$

όπου, α_1 και α_2 είναι οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή αντίστοιχα, λ ένας αδιάστατος συντελεστής απωλειών της ΦΒ κυψελίδας συμπεριλαμβανομένων των απωλειών από τις συρματώσεις, των απωλειών από την σκόνη και τις αστοχίες του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου.

Η μέση απόδοση της συγκεντρωτικής κυψελίδας n_{PV} , είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της, T_c :

$$n_{PV} = n_{ref} \cdot [1 - \beta_p \cdot (T_c - T_{ref})] \quad (5)$$

όπου, n_{ref} είναι η απόδοση της κυψελίδας σε θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} ($= 25^\circ\text{C}$) και σε έκθεση ακτινοβολίας 50W/cm^2 , και β_p είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας της κυψελίδας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $n_{ref} = 40\%$ και $\beta_p = 0.06\%/^\circ\text{C}$ [9].

Επειδή η ενεργειακή προσομοίωση θα εκτελεσθεί σε ωριαία βάση, θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση που πρότεινε ο Erbs και οι συνεργάτες του [11] για την αναγωγή δεδομένων μέσης-μηνιαίας ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{a,d}$ σε μέσες-μηνιαίες ωριαίες τιμές $T_{a,h}$.

$$T_{a,h} = T_{a,d} + (25.8 \cdot K_T - 5.21) \cdot [0.4632 \cos(t - 3.805) + 0.0984 \cos(2t - 0.360) + 0.0168 \cos(3t - 0.822) + 0.0138 \cos(4t - 3.513)] \quad (6)$$

$$t = \frac{2\pi \cdot (h - 1)}{24}, \quad \begin{matrix} h = 1 \rightarrow 1:00 \\ h = 24 \rightarrow 24:00 \end{matrix} \quad (7)$$

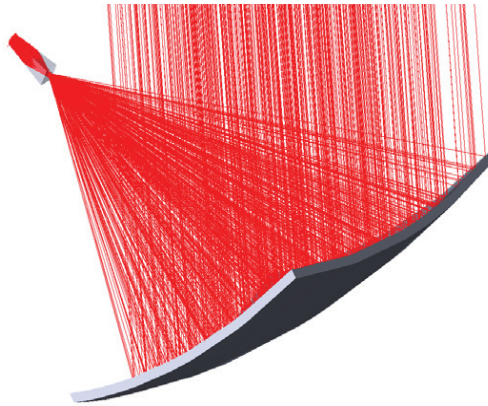
Τα αποτελέσματα της ενεργειακής παραγωγής θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα από ένα απλό φωτοβολταϊκό σύστημα πολυκρυσταλλικού πυριτίου που παρακολουθεί τον ήλιο. Η μεθοδολογία υπολογισμού και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συμβατικού φωτοβολταϊκού συστήματος περιγράφονται στην εργασία [12].

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

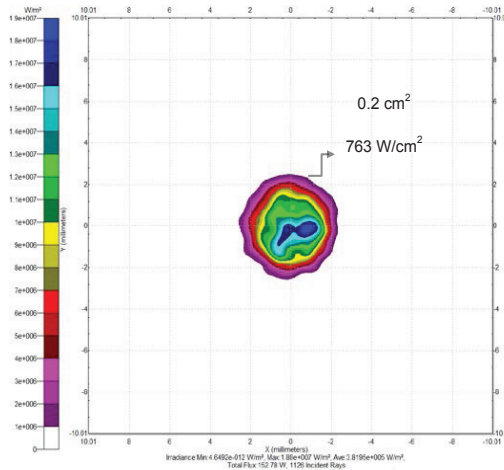
3.1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ, ΟΠΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Από την οπτική προσομοίωση Ray Tracing προκύπτουν χάρτες ακτινοβολίας για κάθε επιφάνεια του οπτικού συστήματος από την ανάγνωση των οποίων προκύπτει η απόδοση του συστήματος και οι λόγοι συγκέντρωσης. Στο Σχήμα 3 εικονίζεται η εφαρμογή της ιχνηλάτησης ακτίνων στο οπτικό συγκεντρωτικό σύστημα, ενώ στο Σχήμα 4 δίνεται ο χάρτης ακτινοβολίας στο επίπεδο της εστίας. Τα αποτελέσματα αφορούν μήκος ομογενοποιητή 65mm. Οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή υπολογίζονται αντίστοιχα $\alpha_1 = 95.5\%$ και $\alpha_2 = 80.6\%$. Ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης του ανακλαστήρα υπολογίζεται σε 8,000 και ο οπτικός σε 7,639.

Προσπίπτουσα Ακτινοβολία 1,000 W/m²



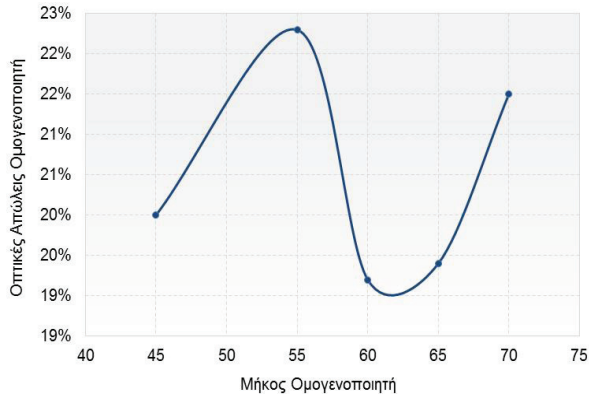
Σχήμα 3: Εφαρμογή προσομοίωσης Ray Tracing στο οπτικό σύστημα



Σχήμα 4: Χάρτης ακτινοβολίας στην είσοδο του ομογενοποιητή

3.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΤΗ

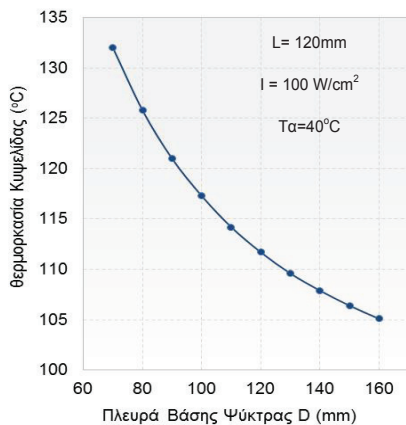
Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του μήκους του ομογενοποιητή στην οπτική απόδοση. Τα αποτελέσματα εικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5. Για τη δεδομένη σχεδίαση του ανακλαστήρα οι λιγότερες οπτικές απώλειες (κοντά στο 19%) εμφανίζονται για μήκος ομογενοποιητή περίπου ίσο με 62mm. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή του διαγράμματος, η οποία υποδεικνύει ότι π.χ. για μήκος ομογενοποιητή ίσο με 45mm, οι απώλειες μπορεί εμφανίζονται κατά μια ποσοστιαία μονάδα μεγαλύτερες (20%), όμως το μήκος εμφανίζεται κατά 27% μειωμένο γεγονός που συσχετίζεται άμεσα με το κόστος του ομογενοποιητή.



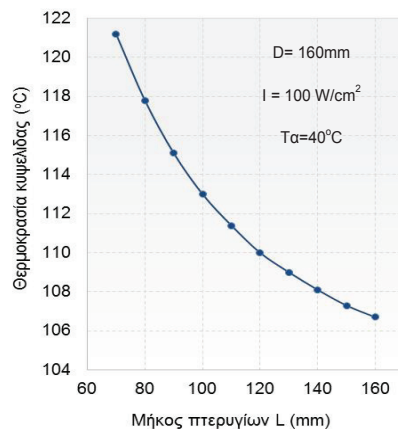
Σχήμα 5: Επίδραση του μήκους του ομογενοποιητή στις οπτικές απώλειες

3.3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΨΥΚΤΡΑΣ

Αρχικά επιλέχθηκε μία τυπική γεωμετρία ψύκτρας για κοινά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική θερμική ανάλυση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη μεταβολή της διάστασης της βάσης, D.



Σχήμα 6: Επίδραση της διάστασης D στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας



Σχήμα 7: Επίδραση του μήκους L στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας

Για το δεδομένο πρόβλημα και για μήκος πτερυγίων ίσο με 120mm, η θερμοκρασία της κυψελίδας μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το D σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 6. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τη μεταβολή του μήκους των πτερυγίων (για D=160mm) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 7

Όπως γίνεται αντιληπτό, για την κατάλληλη επιλογή της ψύκτρας των φωτοβολταϊκών θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο παράγοντας του κόστους, κάτι το οποίο απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση με τεχνοοικονομικούς όρους.

3.4. ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Βάσει της συνδυαστικής εφαρμογής των δύο μεθόδων ανάλυσης, εκτελείται ενεργειακή προσομοίωση ολόκληρου του module. Στη συγκεκριμένη μελέτη ο ομογενοποιητής επιλέχθηκε να έχει μήκος 60mm, ενώ για τη ψύκτρα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές D=160mm, L=160mm. Οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή είναι αντίστοιχα $\alpha_1 = 95.5\%$ και $\alpha_2 = 80.8\%$. Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας υπολογίζεται από την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων για χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας I_T και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος T_a . Οι τιμές αυτές υπολογίζονται ως μέσες-μηνιαίες τιμές σε ωριαία βάση σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.3. Τέλος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος με την εφαρμογή των Εξισώσεων 4 και 5.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη θερμοκρασία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψελίδας δίνονται στο Πίνακα 2, ενώ στο Πίνακα 3 δίνονται οι τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, στο Πίνακα 4 δίνονται τα αποτελέσματα της μηνιαίας παραγωγής ενέργειας του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος (ανοιγμένα στην επιφάνεια εισόδου του ανακλαστήρα) και συγκρίνονται με την ενεργειακή παραγωγή συμβατικού συστήματος πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού που παρακολουθεί τον ήλιο (με την ενέργεια ανοιγμένη στη φωτοβολταϊκή επιφάνεια). Η σύγκριση καταδεικνύει ότι το συγκεντρωτικό σύστημα παράγει 37.1% περισσότερη ετήσια ενέργεια από το ισοδύναμη επιφάνειας συμβατικό φωτοβολταϊκό.

Πίνακας 2: Μέσες-μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψελίδας (°C)

Μήνας	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ιανουάριος	-	-	-	23.6	30.4	36.0	39.8	41.5	41.1	38.6	34.4	28.4	-	-	-
Φεβρουάριος	-	-	17.3	23.8	29.7	34.5	38.2	39.3	39.0	37.1	33.3	28.2	22.0	-	-
Μάρτιος	-	-	25.8	32.3	38.4	43.3	46.7	48.4	48.3	46.4	42.6	37.7	31.7	-	-
Απρίλιος	-	29.4	34.1	39.9	45.5	50.2	53.5	55.2	55.1	53.7	50.4	46.1	40.6	34.4	-
Μάιος	36.8	41.9	47.4	53.2	58.7	63.5	66.9	68.7	68.9	67.5	64.4	60.3	55.4	48.9	42.7
Ιούνιος	36.8	50.5	55.9	61.5	67.0	71.7	75.1	77.0	77.3	76.1	73.1	69.2	64.0	58.0	51.8
Ιούλιος	51.0	56.4	62.2	62.0	74.5	79.6	83.3	85.9	85.7	84.3	81.8	76.8	71.1	64.6	57.8
Αύγουστος	-	54.2	60.6	67.9	74.2	79.8	84.4	86.0	86.7	84.5	81.1	76.4	69.5	62.2	-
Σεπτέμβριος	-	39.9	47.0	54.2	61.4	66.8	70.8	73.3	72.8	71.2	67.0	61.9	54.8	47.3	-
Οκτώβριος	-	-	36.0	43.7	51.0	56.9	61.1	63.1	62.9	60.6	56.4	50.4	43.0	-	-
Νοέμβριος	-	-	-	30.8	37.7	43.3	47.2	49.1	48.7	46.2	41.9	36.0	-	-	-
Δεκέμβριος	-	-	-	23.4	30.3	35.7	39.4	41.2	40.7	38.3	33.8	28.0	-	-	-

Πίνακας 3: Μέσες-μηνιαίες τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό συστήματα (Wh ανά τετραγωνικό εκατοστό φβ)

Μήνας	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ιανουάριος	-	-	-	8.82	12.23	14.81	16.43	16.97	16.41	14.79	12.20	8.80	-	-	-
Φεβρουάριος	-	-	5.14	8.54	11.43	13.63	15.00	15.47	14.99	13.61	11.40	8.51	5.13	-	-
Μάρτιος	-	-	9.49	12.79	15.59	17.73	19.06	19.51	19.04	17.70	15.55	12.75	9.46	-	-
Απρίλιος	-	9.42	12.55	15.45	17.91	19.78	20.95	21.34	20.93	19.74	17.86	15.39	12.51	9.39	-
Μάιος	11.64	14.61	17.55	20.27	22.58	24.34	25.43	25.79	25.40	24.28	22.50	20.18	17.47	14.54	11.60
Ιούνιος	14.30	17.07	19.88	22.48	24.69	26.37	27.41	27.75	27.37	26.30	24.60	22.38	19.78	16.99	14.17
Ιούλιος	16.28	19.38	22.46	25.39	27.70	29.52	30.65	31.01	30.61	29.44	27.57	25.16	22.34	19.28	16.21
Αύγουστος	-	18.10	21.64	24.90	27.67	29.77	31.06	31.49	31.01	29.68	27.55	24.77	21.52	18.01	-
Σεπτέμβριος	-	11.79	15.65	19.22	22.24	24.54	25.96	26.43	25.93	24.47	22.16	19.12	15.58	11.74	-
Οκτώβριος	-	-	11.40	15.38	18.77	21.34	22.94	23.47	22.91	21.29	18.70	15.32	11.35	-	-
Νοέμβριος	-	-	-	10.07	13.48	16.08	17.70	18.24	17.68	16.05	13.45	10.04	-	-	-
Δεκέμβριος	-	-	-	7.83	11.23	13.81	15.42	15.97	15.41	13.79	11.20	7.81	-	-	-

Πίνακας 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα και από συμβατικό φωτοβολταϊκό σύστημα

Μήνας	Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας	
	Συγκεντρωτικό ΦΒ Σύστημα (kWh ανά τετραγωνικό μέτρο ανακλαστήρα)	Συμβατικό ΦΒ Σύστημα (kWh ανά τετραγωνικό μέτρο φωτοβολταϊκού)
Ιανουάριος	23.53	16.81
Φεβρουάριος	21.50	16.33
Μάρτιος	32.68	24.05
Απρίλιος	39.98	28.15
Μάιος	57.77	35.64
Ιούνιος	62.16	36.27
Ιούλιος	72.27	40.02
Αύγουστος	65.32	36.19
Σεπτέμβριος	49.65	29.90
Οκτώβριος	39.31	24.98
Νοέμβριος	24.90	17.25
Δεκέμβριος	21.79	15.59
ΕΤΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ	511	321

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια ολιστική προσέγγιση για την υπολογιστική ανάλυση συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη συνδυαστική

εφαρμογή της μεθόδου ιχνηλάτησης ακτίνων για την οπτική εξέταση του συστήματος, και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη θερμική ανάλυσή του. Τελικός σκοπός είναι ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και για την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης ποικίλων σχεδιαστικών παραμέτρων στην τελική απόδοση του συστήματος. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε εφαρμογή της μεθοδολογίας και μελετήθηκε ένα στοιχείο (module) συγκεντρωτικού συστήματος υψηλής συγκέντρωσης στο οποίο ένα ελλειπτικό παραβολοειδές κάτοπτρο συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε τραπέζοειδή ομογενοποιητή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υποστηρίχθηκε οικονομικά από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας στο πλαίσιο του προγράμματος «ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011» και συγκεκριμένα του έργου ΠΡΩΤΕΑΣ ΗΛΙΑΚΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗ με Κωδικό 11ΣΥΝ_7_1500.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Luque, A., Andreev, V., 2007, Concentrator photovoltaics. Springer series in optical Sciences 2007, Vol.130.
- [2] Guter, W., Schöne, J., Philipps, S.P., Steiner, M., Siefer, G., Wekkeli, A., 2009, "Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight", Applied Physics Letters, 94:223504.
- [3] King, R.R., Boca, A., Hong, W., Liu, X.Q., Bhusari, D., Larrabee, D., Edmondson, K.M., Law, D.C., Fetzer, C.M., Mesropian, S., Karam, N.H., 2009, "Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells", Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany 21-25 September 2009, pp 55-61.
- [4] Hering, G., 2008, "Dawn of 500 suns", Photon International 2008, 11, pp. 146-158.
- [5] Hering G., 2009, "Staying focused", Photon International 2009, 8, pp.130-140.
- [6] Zhangbo, Y., Qifen, L., Qunzhi, Z., Weiguo, P., 2009, "The cooling technology of solar cells under concentrated system", IEEE 6th international power electronics and motion control conference, Vol. 3, pp. 2193–2197.
- [7] A. Watt, M. Watt, Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice, Addison-Wesley, Ontario, 1992.
- [8] H. Cotal et al., 2010, Heat Transfer Modeling of Concentrator Multijunction Solar Cell, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 35th IEEE, June 2010.
- [9] http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C4MJ_40Percent_Solar_Cell.pdf
- [10] J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [11] G. Kornaros, 1999, Climatic data of the stations of the Hellenic National Meteorological Service (period 1955-1997), Vols. 1 & 2. National Meteorological Service (EMY), Athens, Greece.
- [12] Ioannou, A.K., Stefanakis, N.E., Boudouvis, A.G., 2014, "Design optimization of residential grid-connected photovoltaics on rooftops", Energy and Buildings 76, pp.588-596.