



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ
ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟΝ
ΜΙΚΡΟΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΝΟΥΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο να προτείνει την εφαρμογή ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος, ακολουθώντας την οδηγία 2010/31/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Το σύστημα αποτελείται από ένα συγκεντρωτικό πιάτο εμβαδού 1m^2 , το οποίο συγκεντρώνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο τρίτης γενιάς εμβαδού $45 \times 45\text{mm}^2$. Πίσω από το πλαίσιο υπάρχει ένας μικρο-εναλλάκτης θερμότητας, με στόχο να εκμεταλλεύεται τις θερμικές απώλειές του, θερμαίνοντας νερό για οικιακή χρήση, αλλά παράλληλα να ψύχει και τις ηλιακές κυψέλες. Πιο συγκεκριμένα, στα τέσσερα πρώτα κεφάλαια παραθέεται το θεωρητικό υπόβαθρο, που είναι απαραίτητο για την κατανόηση του συστήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική επισκόπηση, αναλύοντας αρκετά επιστημονικά άρθρα, με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Στο τελευταίο κεφάλαιο υπάρχει το υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής. Με την χρήση του προγράμματος SolidWorks και SolidWorks Flow Simulation, γίνεται ο σχεδιασμός του μικρο-εναλλάκτη θερμότητας και η προσομοίωση της ροής στο εσωτερικό του αντίστοιχα. Συνολικά, παρουσιάζεται η γεωμετρία τριών διαφορετικών μικρο-εναλλακτών και τελικά επιλέγεται μία. Τέλος, το σύστημα κρίνεται ικανό για την επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας, που απαιτεί η παραπάνω οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Λέξεις Κλειδιά: << φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οδηγία 2010/31/ΕΕ, ηλιακή κυψέλη πολλαπλών επιστρώσεων, συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά, μικρο-εναλλάκτης θερμότητας, SolidWorks >>

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντά μου, κύριο Γ. Μπεργελέ για την αμέριστη βοήθειά του, τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του σε κάθε φάση της δημιουργίας της, καθώς και για την δυνατότητα ανάληψής της. Επιπλέον, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, Νίκο και Σία, για την διαρκή τους υποστήριξη, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των έως τώρα σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	10
1.1	Το ενεργειακό πρόβλημα.....	10
1.2	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.).....	11
1.3	Ηλιακή ενέργεια - Φωτοβολταϊκά	12
1.4	Φαινόμενο του Θερμοκηπίου	14
1.5	Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων	15
2	Φωτοβολταϊκά στοιχεία	19
2.1	Ιστορική αναδρομή.....	19
2.2	Αρχές λειτουργίας Φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	19
2.2.1	<i>Ημιαγωγοί.....</i>	<i>19</i>
2.2.2	<i>Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και βαθμός απόδοσης Φ.Σ.....</i>	<i>23</i>
2.3	Φωτοβολταϊκές Τεχνολογίες	25
2.3.1	<i>Φωτοβολταϊκά πρώτης Γενιάς (First-Generation PV).....</i>	<i>25</i>
2.3.2	<i>Φωτοβολταϊκά δεύτερης Γενιάς (Second-Generation PV)</i>	<i>29</i>
2.3.3	<i>Φωτοβολταϊκά τρίτης Γενιάς (Third-Generation PV)</i>	<i>32</i>
3	Τεχνολογία ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων (MJSC).....	34
3.1	Εισαγωγή	34
3.2	Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά MJSC.....	35
3.2.1	<i>Ενεργειακό διάκενο</i>	<i>35</i>
3.2.2	<i>Σταθερά κρυσταλλικού πλέγματος.</i>	<i>36</i>
3.2.3	<i>Εξάρτηση του πάχους της κάθε επίστρωσης από το φωτόρευμα.</i>	<i>37</i>
3.3	Επιδόσεις ηλιακών κυψελών τριπλής στρώσης (TJSC)	38
3.4	Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά.....	43
3.5	Επίδραση οπτικών συγκεντρωτικών μέσων στις MJSC	45
4	Μηχανισμοί μετάδοσης Θερμότητας	49
4.1	Εισαγωγή	49
4.2	Μεταφορά θερμότητας με αγωγή	49
4.2.1	<i>Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα Αέρια/Υγρά/Στερεά.....</i>	<i>50</i>
4.3	Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	52

4.4	Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία	54
5	Βιβλιογραφική επισκόπηση	56
5.1	Ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων	56
5.2	Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά.....	73
5.3	Ηλιακοί ανιχνευτές (Solar Trackers)	80
5.4	Μικρο-εναλλάκτες Θερμότητας	94
6	Υπολογιστικό Μέρος	108
6.1	Εισαγωγή	108
6.2	Το SolidWorks.....	108
6.2.1	Γενικά.	108
6.2.2	Σχεδιασμός (Design).....	109
6.2.3	Προσομοίωση της ροής (Flow Simulation).....	109
6.3	Σχεδιασμός των μικρο-εναλλακτών	109
6.3.1	Προσδιορισμός αρχικών παραμέτρων.	109
6.3.2	Σχεδιασμός του πρώτου μικρο-εναλλάκτη.	111
6.3.3	Σχεδιασμός του δεύτερου μικρο-εναλλάκτη	117
6.3.4	Σχεδιασμός του τρίτου μικρο-εναλλάκτη.	119
6.4	Προετοιμασία των μικρο-εναλλακτών στο Flow Simulation	121
6.4.1	Προετοιμασία του μοντέλου	121
6.4.2	Εγκατάσταση του σχεδίου προσομοίωσης της ροής	122
6.4.3	Προσδιορισμός οριακών συνθηκών - Ορισμός υπολογιστικών στόχων.....	126
6.5	Επεξεργασία των αποτελεσμάτων	127
6.5.1	1 ^{ος} μικρο-εναλλάκτης.....	127
6.5.2	2 ^{ος} μικρο-εναλλάκτης.....	137
6.5.3	3 ^{ος} μικρο-εναλλάκτης.....	143
6.6	Συμπεράσματα.....	151
7	Βιβλιογραφία.....	153

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και πολυπλοκότερα προβλήματα παγκοσμίως. Συνήθως, λέγεται ότι τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη εξαντλούνται, όμως η άποψη αυτή δεν είναι απολύτως ορθή. Όλο το επιστημονικό οικοδόμημα του ανθρώπου βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας και επομένως, είναι ορθότερο να λέγεται ότι δεν εξαντλούνται τα ενεργειακά αποθέματα, αλλά εξαντλούνται οι μέθοδοι άντλησης της ενέργειας. Συνεπώς, μια λύση του ενεργειακού προβλήματος είναι η επινοήση νέων μεθόδων άντλησης της ενέργειας, που να μην έχουν τα μειονεκτήματα των σημερινών ή να τα έχουν σε μικρότερο βαθμό. Με άλλα λόγια, οι νέες μέθοδοι άντλησης της ενέργειας δεν πρέπει να προκαλούν εξαρτήσεις, πολιτικούς, οικονομικούς και πολεμικούς ανταγωνισμούς, δεν πρέπει να εξαντλούνται και κυρίως πρέπει να είναι οικολογικές.

Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, η κύρια πηγή ενέργειας ήταν η καύση των ορυκτών καυσίμων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι συμβατικές αυτές μορφές ενέργειας ήταν φθηνότερες και ευκολότερες στην εκμετάλλευσή τους σε σύγκριση με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Βέβαια, σημαντικό ήταν ότι μέχρι και πρόσφατα η ανησυχία για την ρύπανση του περιβάλλοντος δεν είχε πάρει τόσο μεγάλες διαστάσεις όσο τα τελευταία χρόνια. Πλέον, όμως, η οικολογική συνείδηση και η ανάγκη χρήσης των Α.Π.Ε. αποτελούν αντικείμενο συζητήσεων και προβληματισμών, όχι μόνο για τον χώρο των επιστημών και της πολιτικής, αλλά και για το χώρο των επιχειρήσεων και γενικότερα για όλη την κοινωνία.

Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας είναι σήμερα ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που έχει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα. Η δημογραφική έκρηξη (μέσα σε λιγότερο από δύο αιώνες ο παγκόσμιος πληθυσμός ανήλθε από 1 σε 6,5 δισεκατομμύρια και οι εκτιμήσεις δείχνουν, ότι μέχρι το 2050 ο πληθυσμός της γης θα αγγίξει τα 9 δισεκατομμύρια) που συντελείται αυτή τη στιγμή στον πλανήτη σε συνδυασμό με την εξάντληση των συμβατικών καυσίμων δημιουργεί τεράστια πίεση στην κατανομή των ενεργειακών πόρων. Παράλληλα, η κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο υπολογίζεται ότι αυξάνεται κατά 2% κάθε χρόνο. Το έτος 2040, ο παγκόσμιος πληθυσμός θα καταναλώνει, σύμφωνα με τις προβλέψεις, διπλάσια ποσότητα ενέργειας, αναγκάζοντας τις παγκόσμιες ηγεσίες να αναζητήσουν με τη συνδρομή της επιστημονικής κοινότητας νέες πηγές ενέργειας.

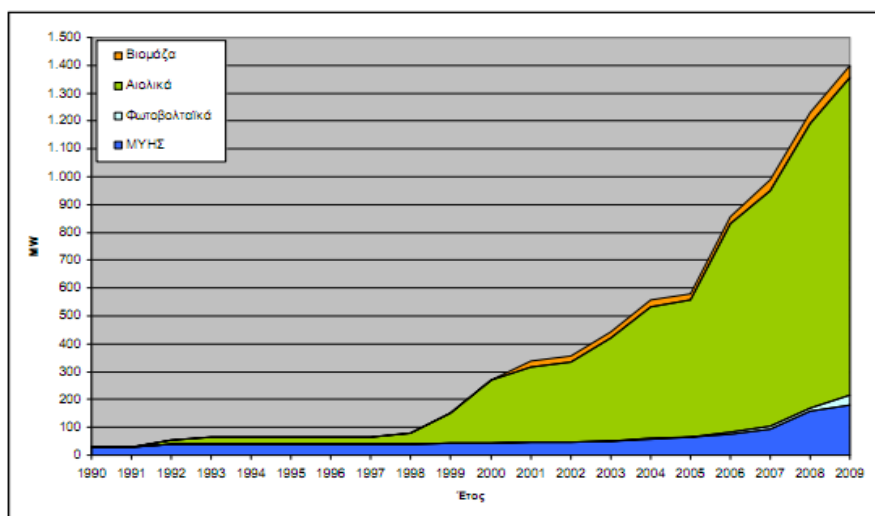
1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Α.Π.Ε.)

Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως το κύριο αίτιο της καταστροφής του περιβάλλοντος, από την άποψη τόσο της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται στις εκπομπές του αερίου του θερμοκηπίου, οι οποίες προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τις μεταφορές. Είναι επομένως επιτακτική ανάγκη, η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και κυρίως στις ανανεώσιμες, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον και ανεξάντλητες.

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές (ο ήλιος, το νερό, ο άνεμος, η βιομάζα, κλπ.), οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Οι μορφές των ΑΠΕ που είναι σήμερα τεχνικοοικονομικά εκμεταλλεύσιμες είναι οι ακόλουθες:

- A) Ηλιακή Ενέργεια
- B) Βιομάζα
- Γ) Αιολική Ενέργεια
- Δ) Γεωθερμική Ενέργεια
- E) Υδροηλεκτρική Ενέργεια.

Στην Ελλάδα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, υπήρξε σημαντική αύξηση στην χρήση των Α.Π.Ε. την τελευταία εικοσαετία, αν και συγκριτικά με την υπόλοιπη Ευρώπη, η αύξηση αυτή είναι αισθητά μικρότερη.



Εικόνα 1.1: Αθροιστικά εγκαθιστάμενη ισχύς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση Α.Π.Ε. (στοιχεία ΔΕΣΜΗΕ, Σεπτέμβριος 2009)

1.3 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Από τις παραπάνω μορφές των Α.Π.Ε. που αναφέρθηκαν η παρούσα διπλωματική εστιάζεται στην ηλιακή ενέργεια. Σήμερα υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που μπορούν να δεσμεύσουν την ηλιακή ακτινοβολία και να την μετατρέψουν σε ενέργεια αξιοποιήσιμη είτε σε επίπεδο ηλεκτροπαραγωγής είτε στον οικιακό τομέα για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή απλά για θέρμανση νερού και άλλες οικιακές χρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργειακή αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

- Τα **παθητικά ηλιακά συστήματα** αξιοποιούν τον ήλιο για την θέρμανση των κτιρίων, δηλαδή χαρακτηρίζονται από άμεση απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς προηγούμενη μετατροπή της. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνονται στα κτίρια (τοίχους θερμικής αποθήκευσης, θερμοκήπιο κτλ.) και συνιστούν εξελιγμένες και οικονομικές τεχνολογίες.
- Τα **ενεργητικά ηλιακά συστήματα** συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμότητα, η οποία στην συνέχεια αξιοποιείται μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει από τις τεχνολογίες αυτές, η θέρμανση του νερού χρήσης και ακολουθεί η ηλιακή θέρμανση χώρων.
- Τα **φωτοβολταϊκά συστήματα** συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούνται σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών και καλύπτουν μία ευρεία περιοχή ισχύος (από ρολόγια και παιχνίδια έως και ηλεκτρική τροφοδοσία ολόκληρου νησιού.)

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία κερδίζει ευρεία αποδοχή τα τελευταία χρόνια ως ένας τρόπος διατήρησης και βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου, χωρίς να βλάπτεται το περιβάλλον. Όλο και περισσότερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνονται στις επιθυμίες των καταναλωτών συμπεριλαμβάνοντας τα φωτοβολταϊκά στον παραγωγικό μηχανισμό. Τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:

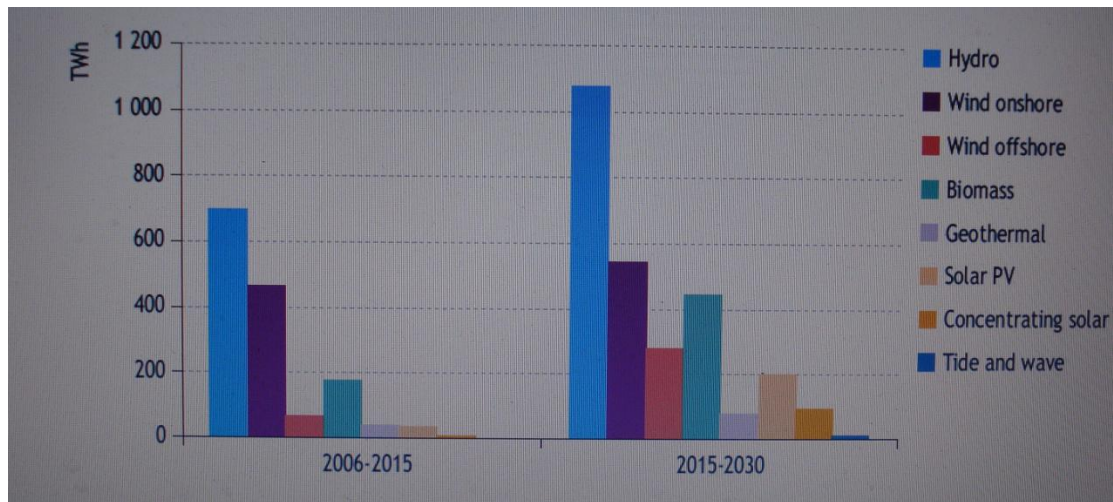
- μηδενική ρύπανση (κάθε ηλιακή κιλοβατώρα αποτρέπει την έκλυση 1 kg CO₂ στην ατμόσφαιρα)
- αθόρυβη λειτουργία
- αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (που φθάνει τα 30 χρόνια)
- αυτόνομη και αξιόπιστη λειτουργία χωρίς την παρουσία χειριστή
- απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές

- δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες
- ελάχιστη συντήρηση και μεγάλη αντοχή σε ακραία καιρικά φαινόμενα
- πολύ καλή απόδοση σε μεγάλο υψόμετρο λόγω μεγάλης έκθεσης στον ήλιο
- Βοηθούν στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση ενέργειας, κάνοντας τον καταναλωτή που διαθέτει φωτοβολταϊκά πιο προσεκτικό και ενήμερο στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια, αλλά και στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια.
- Βοηθούν στην αποκέντρωση της ενέργειας σε μικρές τοπικές μονάδες που δεν έχουν τις μεγάλες ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο (~12% στην Ελλάδα). Η εφαρμογή τους σε νησιά με αδύναμα δίκτυα είναι ιδιαίτερα σημαντική.
- Η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα συμπίπτει χρονικά με τις αιχμές της ζήτησης σε ηλεκτρισμό, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες, βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου και στην αποφυγή μπλακ-άουτ.

Φυσικά, από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία είναι τα εξής:

- Έχουν ακόμα υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, κυρίως λόγω των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ένα ΦΒ σύστημα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς επί περίπου μία πενταετία για να παραχθεί η ενέργεια που απαιτήθηκε για την κατασκευή του, δηλαδή ο χρόνος αποπληρωμής του ενεργειακού χρέους είναι αρκετά μεγάλος.
- Απαιτούν σχετικά μεγάλες επιφάνειες εγκατάστασης.
- Έχουν ακόμη σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης (βέβαια οι καινούργιες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών αυξάνουν σημαντικά τον βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τις προηγούμενες) .
- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες, οι οποίες αποτελούν έναν απρόβλεπτο παράγοντα.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό, λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων των φωτοβολταϊκών, ότι η ανάπτυξή τους είναι επιτακτική, γεγονός το ποίο ενισχύεται και από την προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας για την αύξηση του βαθμού απόδοσής τους, αλλά και την μείωση του κόστους τους. Οι προβλέψεις για την ανάπτυξη αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 1.1: Ανάπτυξη των Α.Π.Ε. σε παγκόσμιο επίπεδο

1.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Από το σύνολο της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας, το 70% περίπου την διαπερνά και καταλήγει στην επιφάνεια της γης, ενώ το υπόλοιπο 30% σκεδάζεται προς το διάστημα. Από το σύνολο της ακτινοβολίας που φτάνει στην γη ένα μέρος απορροφάται από αυτήν με προφανές αποτέλεσμα την θέρμανσή της, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται και ξαναπερνά την ατμόσφαιρα προς το διάστημα. Παράλληλα, η γη εκπέμπει προς την ατμόσφαιρα ακτινοβολία αντίστοιχη με την επιφανειακή θερμοκρασία της (15°C). Μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας αυτής περνά προς το διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τα αέρια της ατμόσφαιρας και στην συνέχεια, ακτινοβολείται προς το διάστημα και τη γη.

Η ύπαρξη, δηλαδή των αερίων της ατμόσφαιρας (H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, O₃, κτλ.), τα οποία έχουν περιορισμένη απορροφητική δράση στα μεγάλα μήκη κύματος, δηλαδή, σε αυτά που αντιστοιχεί η ακτινοβολία της γης, συμβάλλει στη διατήρηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας του πλανήτη στους 15°C. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται κανονικό φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων συστατικών της ατμόσφαιρας από την υπερβολική χρήση συμβατικών καυσίμων καθώς και η παρουσία των χλωροφθορανθράκων, προκαλούν σημαντική περιβαλλοντική αλλαγή, που ονομάζεται κακό φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η αύξηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της γης, αφού τα αέρια εμποδίζουν την αποβολή της ακτινοβολίας που προέρχεται από αυτήν.

Οι επιπτώσεις από την διατάραξη των περιβαλλοντικών συνθηκών στην επιφάνεια της γης είναι προφανείς. Θα πρέπει, λοιπόν, να ληφθούν

τα κατάλληλα μέτρα, γνωρίζοντας βέβαια ότι οι όποιες βελτιώσεις θα γίνουν αντιληπτές ύστερα από μεγάλο χρονικό διάστημα, λόγω της θερμικής αδράνειας της γης. Έτσι, ένα από τα σημαντικότερα μέτρα που μπορούν ληφθούν είναι η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

1.5 Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων [1]

Σήμερα, τα κτίρια ευθύνονται για το 40 % της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο τομέας αυτός διευρύνεται, γεγονός που μετά βεβαιότητας θα αυξήσει την ενεργειακή του κατανάλωση. Συνεπώς, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στον κτιριακό τομέα αποτελούν σημαντικά μέτρα που απαιτούνται για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Από κοινού με την αυξημένη χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, τα μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στην Ένωση θα της επέτρεπαν τη συμμόρφωση προς το πρωτόκολλο του Κιότο της σύμβασης πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή UNFCCC, καθώς και την εκπλήρωση τόσο της μακροπρόθεσμης δέσμευσής της για τη διατήρηση της ανόδου της θερμοκρασίας της γης κάτω από τους 2 °C, όσο και της δέσμευσής της να μειώσει έως το 2020 τις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 20%, τουλάχιστον κάτω από τα επίπεδα του 1990 και κατά 30% σε περίπτωση που θα επιτευχθεί διεθνής συμφωνία. Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και η αυξημένη χρήση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα διαδραματίσουν επίσης σημαντικό ρόλο στην προώθηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού και της τεχνολογικής ανάπτυξης και στη δημιουργία ευκαιριών απασχόλησης και περιφερειακής ανάπτυξης, ιδίως στις αγροτικές περιοχές.

Η συγκεκριμένη οδηγία προωθεί τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων εντός της Ένωσης λαμβάνοντας υπόψη τις εξωτερικές κλιματολογικές και τις τοπικές συνθήκες, καθώς και τις κλιματικές απαιτήσεις των εσωτερικών χώρων και τη σχέση κόστους / οφέλους. Συγκεκριμένα, τα κράτη μέλη πρέπει να μεριμνούν ώστε:

- α) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020 όλα τα νέα κτίρια να αποτελούν κτίρια με **σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας** και
- β) μετά τις 31 Δεκεμβρίου 2018 τα νέα κτίρια που στεγάζουν δημόσιες αρχές ή είναι ιδιοκτησίας τους να αποτελούν κτίρια με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας.

«Κτίριο με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας» ορίζεται κτίριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση, προσδιοριζόμενη σύμφωνα με συγκεκριμένα στοιχεία. Η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται θα πρέπει να συνίσταται σε πολύ μεγάλο βαθμό σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, περιλαμβανομένης της παραγομένης επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου.

Η ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου προσδιορίζεται βάσει της υπολογιζόμενης ή της πραγματικής ετήσιας ενέργειας που καταναλώνεται για να καλυφθούν οι διάφορες ανάγκες που συνδέονται με τη συνήθη χρήση και περιλαμβάνουν τις ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης (ενέργεια που απαιτείται για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση) για να διατηρηθούν οι επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας του κτιρίου και οι οικιακές ανάγκες ζεστού νερού. Η ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου πρέπει να εκφράζεται κατά διαφανή τρόπο και περιλαμβάνει δείκτη ενεργειακής απόδοσης και αριθμητικό δείκτη για τη χρήση πρωτογενούς ενέργειας, βάσει των παραγόντων πρωτογενούς ενέργειας ανά φορέα ενέργειας, που ενδέχεται να βασίζονται στους εθνικούς ή περιφερειακούς ετήσιους σταθμισμένους μέσους όρους ή σε ειδική τιμή για την επιτόπια παραγωγή.

Η μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης καθορίζεται λαμβανομένων υπόψη τουλάχιστον των ακόλουθων παραγόντων:

α) τα ακόλουθα πραγματικά θερμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών χωρισμάτων του):

- i) θερμοχωρητικότητα,
- ii) μόνωση,
- iii) παθητική θέρμανση,
- iv) στοιχεία ψύξης και
- v) θερμικές γέφυρες·

β) εγκατάσταση θέρμανσης και παροχή ζεστού νερού, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών των μονώσεών τους

γ) εγκαταστάσεις κλιματισμού

δ) φυσικό και μηχανικό αερισμό, που μπορεί να περιλαμβάνει και την αεροστεγανότητα

ε) ενσωματωμένη εγκατάσταση φωτισμού (κυρίως στον τομέα που δεν αφορά την κατοικία)

στ) σχεδιασμό, θέση και προσανατολισμό του κτιρίου, περιλαμβανομένων των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών

ζ) παθητικά ηλιακά συστήματα και ηλιακή προστασία

η) κλιματικές συνθήκες εσωτερικού χώρου στις οποίες περιλαμβάνονται οι επιδιωκόμενες συνθήκες εσωτερικού κλίματος

θ) εσωτερικά φορτία.

Η θετική επίδραση των κατωτέρω παραγόντων λαμβάνεται υπόψη, όπου σχετίζεται με τους υπολογισμούς:

α) τοπικές συνθήκες έκθεσης στον ήλιο, ενεργητικά ηλιακά συστήματα και άλλα συστήματα θέρμανσης και ηλεκτρισμού βασιζόμενα σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές

β) ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη με συμπαραγωγή·

γ) συστήματα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου

δ) φυσικός φωτισμός

Για τον σκοπό αυτού του υπολογισμού, τα κτίρια θα πρέπει να κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

α) μονοκατοικίες διαφόρων τύπων

β) συγκροτήματα διαμερισμάτων

γ γραφεία

δ) εκπαιδευτικά κτίρια

ε) νοσοκομεία

στ) ξενοδοχεία και εστιατόρια

ζ) αθλητικές εγκαταστάσεις

η) κτίρια υπηρεσιών χονδρικού και λιανικού εμπορίου

θ) άλλα είδη κτιρίων που καταναλώνουν ενέργεια.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την οδηγία, τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να λαμβάνουν τα απαραίτητα μέτρα για τη θέσπιση

συστήματος πιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης περιλαμβάνει την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου και τιμές αναφοράς, όπως ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, ώστε να επιτρέπει στους ιδιοκτήτες ή τους ενοικιαστές του κτιρίου ή της κτιριακής μονάδας να συγκρίνουν και να αξιολογούν την ενεργειακή απόδοσή του. Το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης είναι δυνατόν να περιλαμβάνει πρόσθετες πληροφορίες, όπως η ετήσια κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων πλην κατοικιών και το ποσοστό της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Τα κράτη μέλη πρέπει να απαιτούν, κατά την κατασκευή, πώληση ή εκμίσθωση κτιρίων ή κτιριακών μονάδων, να επιδεικνύεται το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης στον υποψήφιο νέο ενοικιαστή ή αγοραστή και να παραδίδεται στον αγοραστή ή νέο ενοικιαστή. Τέλος, τα κράτη μέλη πρέπει να καθιερώσουν τακτική επιθεώρηση των συστημάτων, που είναι υπεύθυνα για την ενεργειακή αυτονομία των κτιρίων, ώστε αυτή να διασφαλίζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ [2-6]

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Γάλλο φυσικό Antoine Becquerel το 1839, αλλά το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου κατασκευάστηκε από τους Fuller, Pearson και Chapin το 1954. Η εμπορική παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου με βαθμό απόδοσης 5 – 10% ξεκίνησε δύο χρόνια αργότερα από την εταιρεία Hoffman και το 1958 χρησιμοποιήθηκαν σε διαστημικές εφαρμογές. Το 1991 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων ήταν μόλις 300 MW_p, ξεπέρασε τα 4000 MW_p στο τέλος του 2005 και έφθασε τα 21000 MW_p στις αρχές του 2010. Η Ελλάδα, που διαθέτει ένα από τα υψηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη, βρίσκεται πολύ χαμηλά στην παγκόσμια κατάταξη. Για παράδειγμα η Γερμανία (9800 MW_p), με μεγάλο ποσοστό νέφωσης και βροχόπτωσης, διαθέτει 178 φορές περισσότερη εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ από την ηλιόλουστη χώρα μας (55 MW_p).

2.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.2.1 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Η κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα σώμα ονομάζεται ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ανάλογα με το μέγεθος αυτό, τα στερεά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: α) μονωτές, β) αγωγούς και γ) ημιαγωγούς. Σύμφωνα με την ηλεκτρική συμπεριφορά, τα ηλεκτρόνια των ημιαγωγών είναι τριών ειδών:

- Ηλεκτρόνια εσωτερικών στοιβάδων (Τα ηλεκτρόνια αυτά είναι λιγότερο ενεργά και δεν συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας.)
- Ελεύθερα ηλεκτρόνια (Είναι τα ηλεκτρόνια που διαθέτουν αρκετή ενέργεια για να αποσπαστούν από τους δεσμούς του σώματος.)
- Ηλεκτρόνια σθένους (Είναι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας των ατόμων, τα οποία μπορούν να κινηθούν προς τις οπές γειτονικών δεσμών, που δημιουργήθηκαν επειδή τα εκεί ηλεκτρόνια σθένους εγκατέλειψαν τη θέση τους.)

Επίσης, υπάρχουν τρεις διαφορετικές ζώνες ενέργειας σε ένα ημιαγωγό. Στο κάτω μέρος βρίσκεται η ενεργειακή ζώνη των ηλεκτρονίων των εσωτερικών στοιβάδων των ατόμων. Στη μέση βρίσκεται η ενεργειακή ζώνη των ηλεκτρονίων των ατόμων του ημιαγωγού, η οποία ονομάζεται ζώνη σθένους. Τέλος, στο πάνω μέρος υπάρχει η ενεργειακή ζώνη των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή των ηλεκτρονίων που είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας, για αυτό και ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας.

Η απόσταση ανάμεσα στις δύο πάνω ζώνες ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή ενεργειακό χάσμα. Είναι, δηλαδή, η διαφορά μεταξύ του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, και της ενέργειας του περισσότερου ενεργού από τα ηλεκτρόνια σθένους, στην κορυφή της ζώνης σθένους. Είναι προφανές ότι το ενεργειακό χάσμα εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους και την μετατροπή του σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Το ενεργειακό διάκενο για διάφορους κρυσταλλικούς ημιαγωγούς είναι: 0.66 eV για το Γερμάνιο (Ge), 1.12 eV για το Πυρίτιο (Si), 1.42 eV για το Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs).

Τα ηλεκτρόνια σθένους των ημιαγωγών μπορούν να απορροφήσουν σημαντική ποσότητα φωτός. Η απορρόφηση καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Συνολικά, διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη από αυτή του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, οπότε το φωτόνιο δεν απορροφάται.
- Η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με αυτή του ενεργειακού διακένου, οπότε το φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο σθένους του ημιαγωγού. Έτσι το ηλεκτρόνιο αυτό δέχεται ενέργεια και ανεβαίνει ενεργειακά στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή.
- Η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού διακένου, οπότε δημιουργείται ξανά ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής. Η περίσσεια ενέργειας μεταφέρεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας ως κινητική ενέργεια, συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας του ημιαγωγού.

Έτσι, προκύπτει ότι όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στη ζώνη σθένους, που ονομάζονται και φορείς ρεύματος, αυξάνονται, οπότε τότε αυξάνεται και η αγωγιμότητά του (φωτοαγωγιμότητα). Τέλος, η διακοπή του φωτισμού

του ημιαγωγού συνεπάγεται και την επαναφορά της αγωγιμότητας στα αρχικά επίπεδα.

Η κίνηση των ηλεκτρονίων έξω από τον ημιαγωγό, δηλαδή η παραγωγή ρεύματος, εξασφαλίζεται με τους ημιαγωγούς πρόσμειξης. Οι αγωγοί αυτοί περιέχουν μέσα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα διασπαρμένα άτομα από επιλεγμένο διαφορετικό υλικό. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων ημιαγωγών:

➤ Ημιαγωγός τύπου n

Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομά του με άτομα άλλου υλικού μεγαλύτερου σθένους. Στον ημιαγωγό αυτό ένα ηλεκτρόνια ανά άτομο πρόσμειξης δεν συμμετέχει σε δεσμό και είναι ελεύθερο. Έτσι, ο ημιαγωγός τύπου n περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από τον καθαρό αγωγό και τα άτομα της πρόσμειξης ονομάζονται δότες.

➤ Ημιαγωγός τύπου p

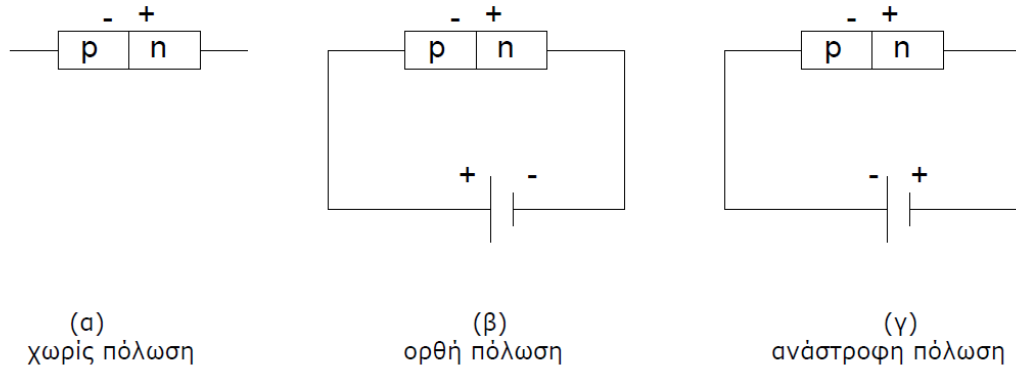
Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομά του, με άτομα άλλου υλικού μικρότερου σθένους. Στον ημιαγωγό αυτό τα άτομα πρόσμειξης μπορούν να δεχτούν ένα ηλεκτρόνιο για να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός και ονομάζονται αποδέκτες.

Όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n, δημιουργείται στη θέση επαφής μία ζώνη στην οποία εναλλάσσονται ηλεκτρόνια με οπές. Ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού n εισέρχονται στον ημιαγωγό p και συμπληρώνουν αντίστοιχες οπές, ενώ οπές του ημιαγωγού p εισέρχονται στον ημιαγωγό n και ενώνονται με ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Υπάρχουν, δηλαδή, θετικά ιόντα στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου n και αρνητικά στην πλευρά του αγωγού p.

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλευρών εμποδίζει την ροή ηλεκτρονίων και οπών στους δύο ημιαγωγούς. Έτσι, γύρω από την θέση επαφής δημιουργείται μια ζώνη αντίστασης που απαγορεύει την συγκεκριμένη αλλαγή και ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης ή ζώνη φραγής. Η διάταξη των ημιαγωγών p και n ονομάζεται δίοδος επαφής ή κρυσταλλοδίοδος. Η χαρακτηριστική της ιδιότητα είναι ότι όταν εφαρμοστεί στα άκρα της ηλεκτρική τάση κατά την μία ή την άλλη φορά, άγει ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικής έντασης σε κάθε περίπτωση.

Κατά την ορθή πόλωση της διόδου επαφής καταργείται η ζώνη φραγής και επιτρέπεται η διέλευση ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών. Αντίθετα, κατά την ανάστροφη πόλωση της διόδου επαφής

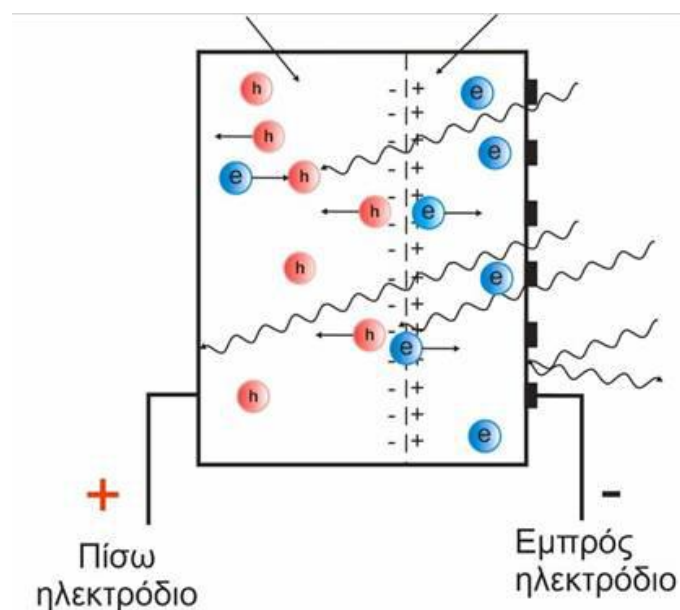
αυξάνεται η ζώνη φραγής και εμποδίζεται η διέλευση ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών. Το μόνο ρεύμα που διέρχεται από την δίοδο έχει μικρή και σταθερή τιμή, οφείλεται στις οπές του ημιαγωγού n και στα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού p και ονομάζεται ρεύμα κόρου.



Σχήμα 2.1: Ορθή και ανάστροφη πόλωση ημιαγωγών p-n

2.2.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Όταν μια δίοδος επαφής δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Όταν τα ζεύγη αυτά βρεθούν στην περιοχή της επαφής των ημιαγωγών, παρατηρείται εκτροπή των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό n και εκτροπή των οπών προς τον ημιαγωγό p.



Σχήμα 2.2: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

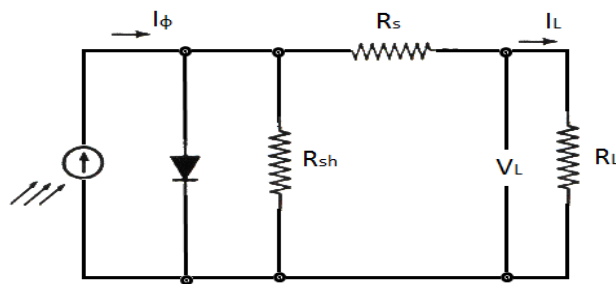
Δημιουργείται, δηλαδή, μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου, η οποία διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ακτινοβολίας σε αυτήν. Το γεγονός αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η συγκεκριμένη διάταξη, η οποία αποτελεί ουσιαστικά πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell). Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται φωτόρευμα και είναι ευθέως ανάλογο της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προκύπτει στο ΦΒ στοιχείο και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

Ένα μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ΦΒ στοιχείο ανακλάται πάνω στην επιφάνειά του και διαχέεται προς την ατμόσφαιρα. Από την ακτινοβολία που διεισδύει μέσα στο ΦΒ στοιχείο δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά το ΦΒ στοιχείο συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα και η αντίστοιχη ακτινοβολία το διαπερνά, θερμαίνοντας απλά το μεταλλικό ηλεκτρόδιο στην πίσω όψη του. Ούτε, όμως και το μέρος της ακτινοβολίας, που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού αξιοποιείται, γιατί μετατρέπεται σε θερμότητα. Είναι προφανές, δηλαδή, ότι είναι αδύνατη η μετατροπή όλης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται το ΦΒ στοιχείο, σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος από τις θερμικές αυτές απώλειες μπορούν βέβαια, με τον κατάλληλο μηχανισμό να αξιοποιηθούν, βελτιώνοντας έτσι και το συνολικό βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού. Για παράδειγμα, η παρούσα διπλωματική χρησιμοποιεί έναν μικρο-εναλλάκτη θερμότητας για την θέρμανση νερού οικιακής χρήσης, από τις θερμικές αυτές απώλειες.

2.2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

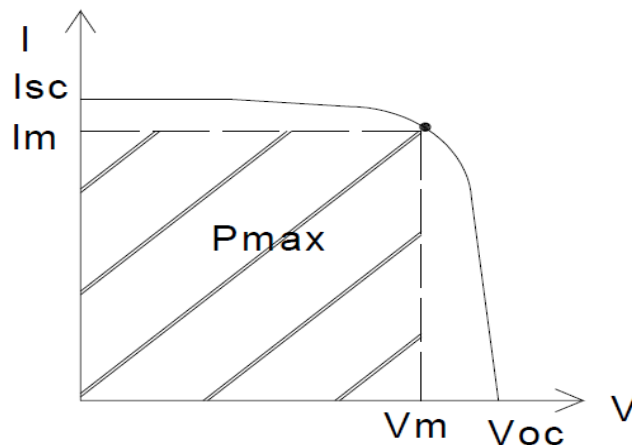
Για την μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός ΦΒ στοιχείου, που δέχεται σταθερή ακτινοβολία, θεωρείται ότι αποτελεί μία πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από μία δίοδο επαφής. Αν στο απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, τα άκρα ης επαφής συνδεθούν με χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής (μηδενική αντίσταση), το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το φωτόρευμα, που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} του ΦΒ στοιχείου (short-circuit current). Αν τα άκρα της επαφής δεν συνδέονται μεταξύ τους, η τάση στα άκρα ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} (open-circuit voltage).

Στην πραγματικότητα το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου περιλαμβάνει ακόμα δύο αντιστάσεις. α) Τη σειριακή αντίσταση R_s (series resistance), η οποία συνδέεται σε σειρά με την δίοδο επαφής και αφορά στις αντιστάσεις κατά το πέρασμα του ρεύματος μέσα από την δίοδο και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. β) Την αντίσταση διαρροής R_{sh} (shunt resistance), η οποία συνδέεται παράλληλα με τη δίοδο επαφής και αφορά στη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής. Οι τιμές για τις αντιστάσεις αυτές είναι στο εμπόριο συνήθως: $R_s < 5 \Omega$ και $R_{sh} > 500 \Omega$.



Σχήμα 2.3: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου

Το ΦΒ στοιχείο έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, προσαρμόζοντας την τάση στα άκρα της αντίστασης. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, που δέχεται ακτινοβολία ισχύος 1kW/m^2 , είναι $I_{sc} = 30 - 40 \text{ mA/cm}^2$. Επιπρόσθετα, ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = I_m V_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτοκυκλωμένης τάσης ενός ΦΒ στοιχείου ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (fill factor) και δίνει το μέτρο προσέγγισης της λειτουργίας ενός στοιχείου προς την ιδανική συμπεριφορά.
$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$



Διάγραμμα 2.1: Χαρακτηριστική καμπύλη ΦΒ στοιχείου

Η λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου και κατά συνέπεια η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εξαρτώνται από τρεις μεταβλητούς παράγοντες: α) την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, β) τη θερμοκρασία του στοιχείου και γ) την αντίσταση του κυκλώματος. Αν ένα ΦΒ στοιχείο αποδίδει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ P_m και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ισχύος P_{HA} , το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζεται βαθμός απόδοσης του ΦΒ στοιχείου.

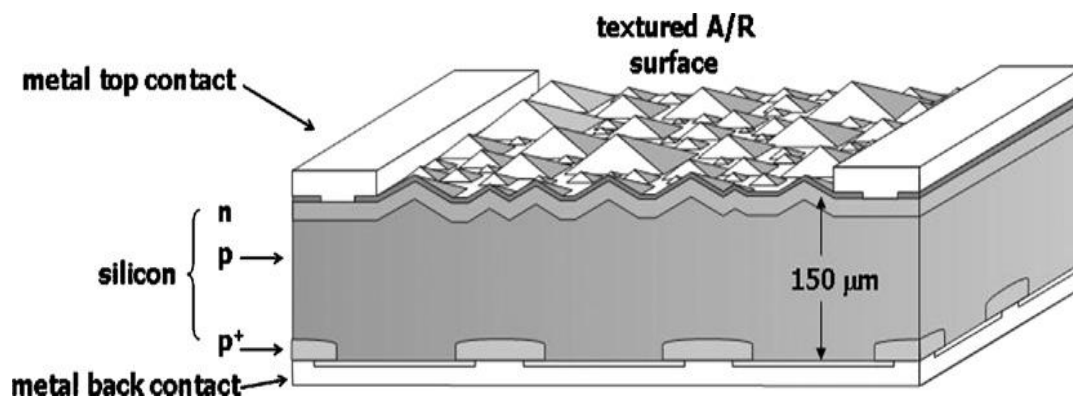
$$\mathbf{n} = \frac{P_m}{P_{HA}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{HA}}$$

2.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Η αγορά των φωτοβολταϊκών, όπως έχει διαμορφωθεί σήμερα αποτελείται από ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών που περιλαμβάνουν διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου αλλά και υλικών λεπτών επιστρώσεων (thin film). Οι τεχνολογίες αυτές κατηγοριοποιούνται [7] παρακάτω, ξεκινώντας από αυτές πρώτης γενιάς και φτάνοντας σε αυτές τρίτης γενιάς, με τις οποίες θα ασχοληθούμε και εκτενέστερα στη συνέχεια.

2.3.1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς (First - generation PV)

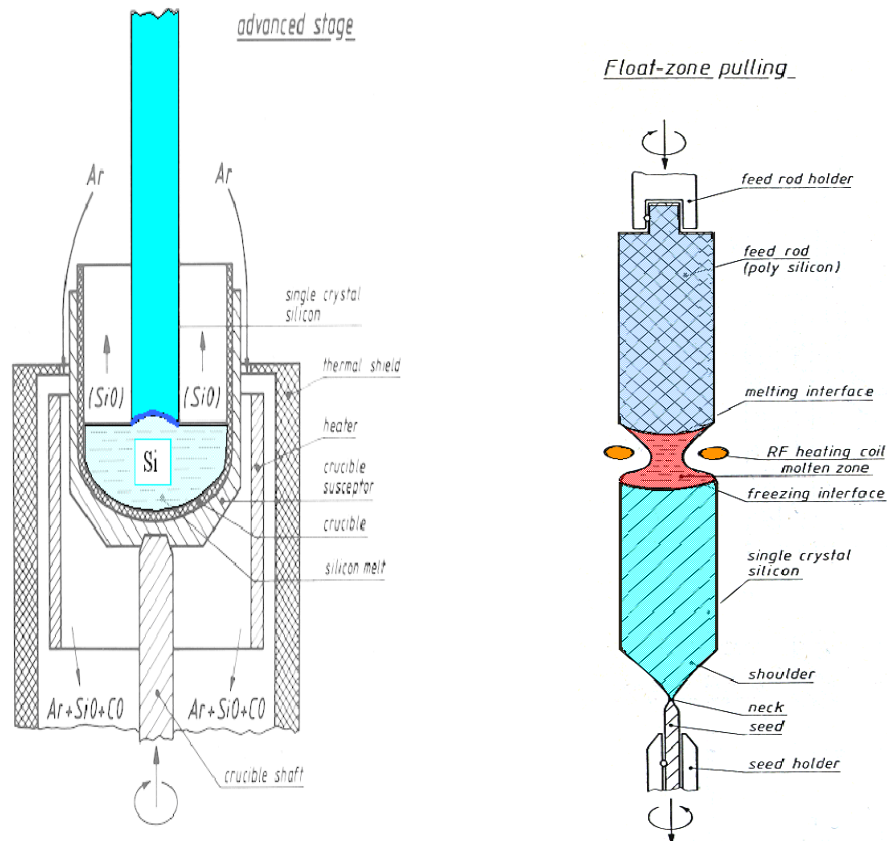
α) φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (single - crystalline silicon , sc - Si)



Σχήμα 2.4: Schematic of a single-crystal solar cell

Ο συγκεκριμένος τύπος ΦΒ στοιχείου είναι ο πιο συνηθισμένος και αποτελεί το 80% της σημερινής αγοράς [8]. Αυτό οφείλεται στο ότι τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης

σχέσης απόδοσης-επιφάνειας ή «ενεργειακής πυκνότητας». Βέβαια ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους. Η βασικότερες τεχνολογίες παρασκευής του συγκεκριμένου ΦΒ στοιχείου είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone) [9].



Σχήμα 2.5: i) Κρυσταλλική ανάπτυξη πυριτίου με την μέθοδο Czochralski ii) Κρυσταλλική ανάπτυξη πυριτίου με την μέθοδο Float Zone

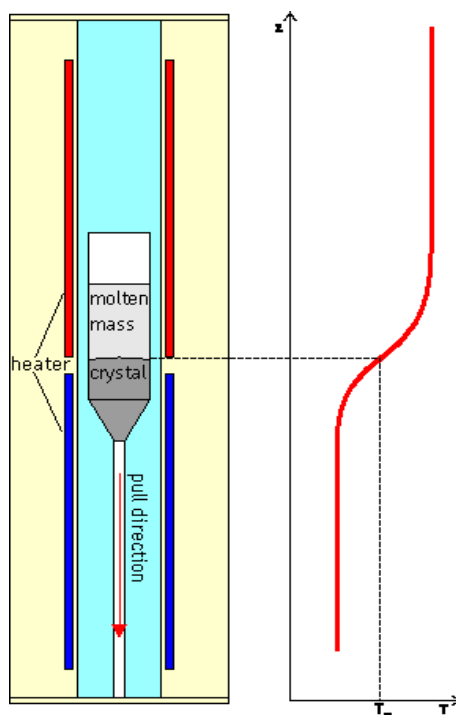
Η μέγιστη απόδοση ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου, που έχει επιτευχθεί στο εργαστήριο, είναι 24,7%. Βέβαια, λόγω της αντίστασης του στοιχείου, της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της επαφής με το μέταλλο υπάρχουν αρκετές απώλειες και έτσι οι πραγματικές αποδόσεις κυμαίνονται στη βιομηχανία από 12 έως 19%. Το πάχος τους είναι σχετικά μεγάλο (περίπου 0,3mm) και σχηματίζουν πυκνότητα ρεύματος περίπου 35mA/cm² με τάση 0,55V υπό σταθερή ακτινοβολία [8]. Το Νοέμβριο του 2009 η εταιρία Sunpower ανακοίνωσε την κατασκευή ενός πλαισίου με απόδοση 20,4%, το οποίο αποτελεί ρεκόρ σύμφωνα με τις μετρήσεις του NREL (National Renewable Energy Laboratory). Τέλος, όσον αφορά το κόστος της τεχνολογίας αυτής, παραμένει ακόμα υψηλό (3-4 US\$/W) [8].

β) Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)



Σχήμα 2.6: Μορφή πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα στοιχεία αυτά είναι τετραγωνικής μορφής και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10 – 50 μm . Η θεωρητική απόδοσή τους φτάνει έως και 20% στο εργαστήριο, ενώ στο εμπόριο η απόδοσή τους κυμαίνεται από 13-15% [9]. Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές σε αυτό το ΦΒ στοιχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοσή τους. Το βασικό τους πλεονέκτημα όμως, είναι ότι η παραγωγική τους διαδικασία είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών και για αυτό στο εμπόριο η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη [7]. Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι η μέθοδος Bridgman και η μέθοδος block casting [9].



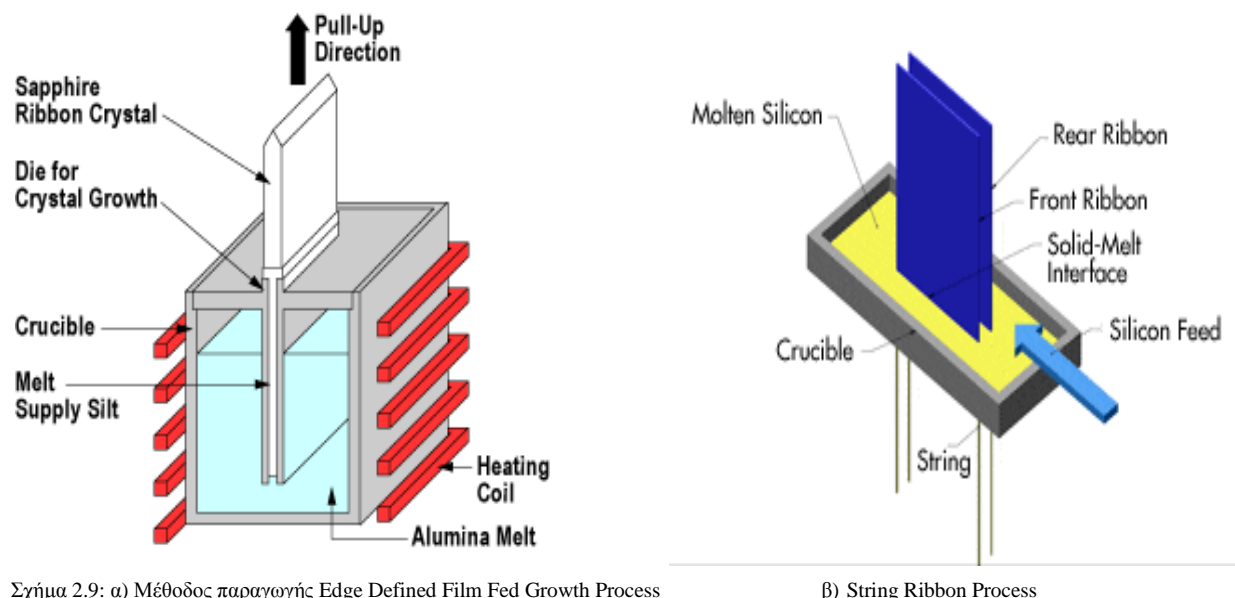
Σχήμα 2.7: Κρυσταλλική ανάπτυξη πολυκρυσταλλικού πυριτίου με την μέθοδο Bridgman

γ) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



Σχήμα 2.8: Ribbon Silicon

Πρόκειται για μια σχετικά καινούργια τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία αναπτύχθηκε με στόχο να μειώσει το κόστος που προέκυπτε λόγω των διαδικασιών κοπής και των απωλειών καθαρού πυριτίου που συνεπάγεται. Αναπτύχθηκε από την Evergreen Solar και προσφέρει σχεδόν 50% μείωση στην χρήση πυριτίου συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους παραγωγής μονοκρυσταλλικών ή πολυκρυσταλλικών ΦΒ στοιχείων. Είναι λεπτή ταινία πολυκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία δημιουργείται από τηγμένο υλικό. Η θεωρητική απόδοση των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων φτάνει το 18%, αλλά στην βιομηχανία είναι περίπου 12-13% [9]. Από τις πολυάριθμες τεχνικές παραγωγής ουσιαστικά μόνο δύο κατέληξαν σε εμπορική εφαρμογή: α) Edge defined Film Fed Growth Process (EFG) και β) String Ribbon Process (STR).



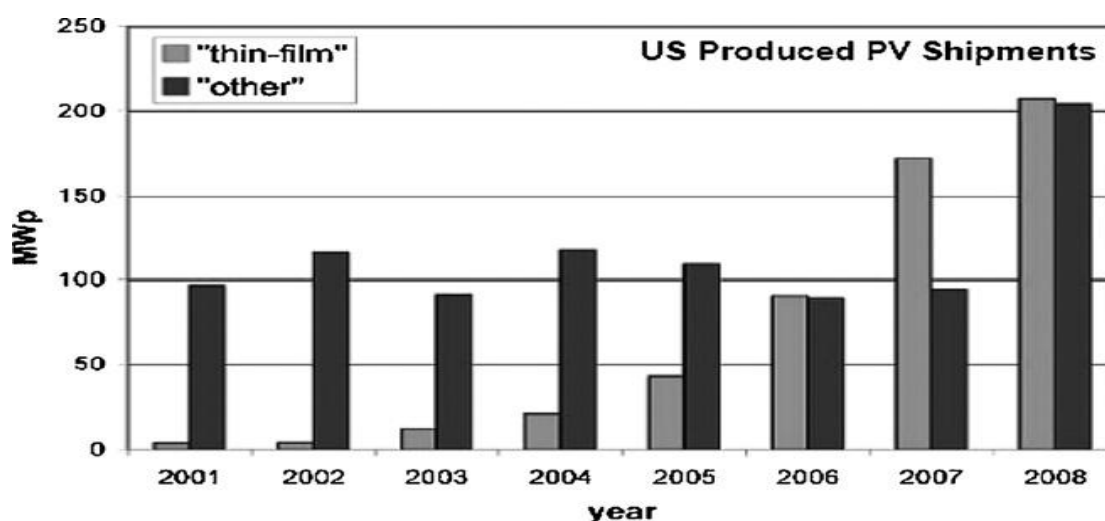
Σχήμα 2.9: α) Μέθοδος παραγωγής Edge Defined Film Fed Growth Process

β) String Ribbon Process

2.3.2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς (Second - generation PV)

➤ Thin film technology

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, πάντα με γνώμονα την μείωση του κόστους, έγινε με την ανάπτυξη των υλικών λεπτών επιστρώσεων. Η τεχνολογία αυτή, κρατώντας τις αποδόσεις των τεχνολογιών πρώτης γενιάς και μην επηρεάζοντας το χρόνο ζωής των ΦΒ στοιχείων, μείωσε το πάχος των υλικών σε μικρότερο από 10 μm(1-10μm) [7]. Από τεχνική άποψη, το γεγονός ότι τα στρώματα είναι πολύ λεπτότερα, έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο φωτοβολταϊκό υλικό να απορροφάει την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια και ως εκ τούτου, οι αποδόσεις να είναι μικρότερες. Όμως, η ικανότητα επεξεργασίας πολλών διαφορετικών υλικών και κραμάτων επέτρεψε ικανοποιητική βελτίωση στις αποδόσεις. Τέλος, το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος των thin film φωτοβολταϊκών μονάδων επέτρεψε να καταλάβουν το 15-20% του μεριδίου της αγοράς στις αρχές του 2008, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα [8].



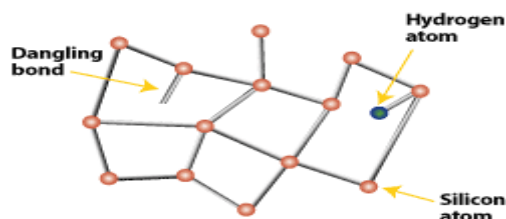
Διάγραμμα 2.2: Μεριδίο αγοράς Thin Film

Τα πιο γνωστά είδη υλικών λεπτών επιστρώσεων είναι τα παρακάτω [9]:

α) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός χαρακτηρίζεται από εξαιρετική απορροφητικότητα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, αλλά η πραγματική του απόδοση κυμαίνεται στο 10-11% (Siemens). Εργαστηριακά έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη απόδοση από όλες τις τεχνολογίες thin film (18,8%) και με την προσθήκη γάλλιου μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το μειονέκτημα όμως είναι το κόστος, αφού το Ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση.

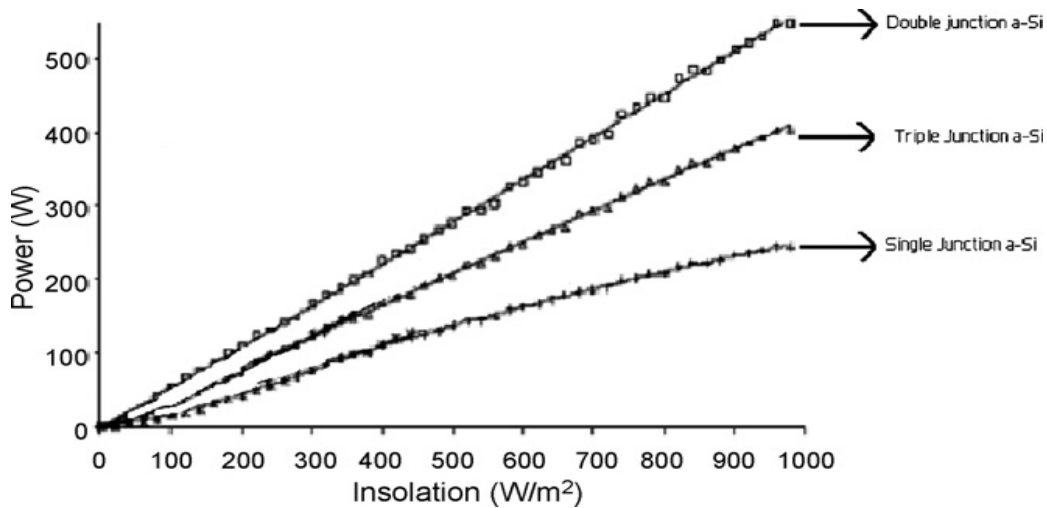
β) Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon , a-Si)



Σχήμα 2.10: Thin film silicon

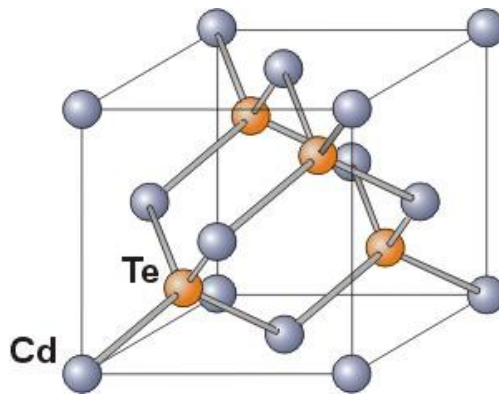
Η ονομασία αυτή προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων (0,0001 mm), οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού πάνω σε ένα υπόστρωμα υποστήριξης (πάχους 1-3 mm) , όπως γυαλί , αλουμίνιο ή πλαστικό. Έτσι, το χαμηλό κόστος του υποστρώματος, όπως επίσης και η μικρή ποσότητα πυριτίου που χρησιμοποιείται κάνουν την τεχνολογία αυτή αρκετά φθηνότερη σε σχέση με τις προηγούμενες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα, όμως του άμορφου πυριτίου είναι το υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας (10^4 cm^{-1}) , που του δίνει την δυνατότητα να έχει καλύτερη απόδοση από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία. Ακόμα, η απόδοσή του παραμένει ικανοποιητική σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίθετα, το μεγάλο του μειονέκτημα είναι, ότι παρουσιάζει χαμηλότερες αποδόσεις σε σύγκριση με αυτές των κρυσταλλικών (6-8% στην βιομηχανία και έως 14% στο εργαστήριο), γεγονός το οποίο οφείλεται στην άμορφη κατασκευή του πυριτίου. Επίσης, υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις, αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούργια, καθώς και ότι μέσα σε μερικούς μήνες λειτουργίας μπορεί η απόδοση να μειωθεί από 10% έως και 15 % [9] . Η μείωση αυτή οφείλεται στο φαινόμενο Staebler-Wronski και προκαλεί αλλαγές στις ιδιότητες του άμορφου πυριτίου. Για την βελτίωση των αποδόσεων και την λύση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκαν τεχνολογίες πολλαπλών στρώσεων άμορφου πυριτίου (multiple-junction a-Si). Η βελτίωση αυτή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα [8]:



Διάγραμμα 2.3: Multijunction a-Si

γ) Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)



Σχήμα 2.11: Δομή CdTe

Το Τελλουριούχο Κάδμιο έχει κοντά στο ιδανικό (κοντά στο ηλιακό φάσμα) ενεργειακό διάκενο (περίπου 1eV) [9], γεγονός το οποίο του επιτρέπει να απορροφά σχεδόν ολόκληρη την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η ιδιότητα αυτή του δίνει την δυνατότητα να έχει αποδόσεις πλαισίου από 6 - 9% ,ενώ στο εργαστήριο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν φτάσει έως και 16% [8] . Από την άλλη πλευρά, το κάδμιο θεωρείται καρκινογόνο και για αυτό η χρήση του είναι περιορισμένη. Τέλος, η έλλειψη του τελλουρίου ανεβάζει το κόστος , παρόλο που οι μέθοδοι παραγωγής του, είναι συγκριτικά με τις προηγούμενες, φθηνότερες. Οι δύο βασικότερες μέθοδοι είναι η πλεγματική εκτύπωση (χαμηλός ρυθμός παραγωγής) και η ηλεκτροτυπία.

δ) Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)

Το Αρσενιούχο Γάλλιο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV , το οποίο είναι ιδανικό για την απορρόφηση της

ηλιακής ακτινοβολίας. Η θεωρητική απόδοση είναι η υψηλότερη και κυμαίνεται από 25% έως και 30% [9]. Το Γάλλιο είναι ένα πολύ σπάνιο στοιχείο σε αντίθεση με το Αρσένιο, το οποίο όμως είναι δηλητηριώδες. Έτσι, η τεχνολογία αυτή είναι εξαιρετικά ακριβή (περίπου πενταπλάσια από το κρυσταλλικό πυρίτιο). Όμως, το GaAs παρουσιάζει εξαιρετική ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που του δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Έτσι, το υψηλό κόστος αντισταθμίζεται από τα υψηλά ποσά ενέργειας που παράγουν τα συστήματα αυτά. Τέλος, συναντάται συχνά και σε διαστημικές εφαρμογές.

2.3.3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς (Third-generation PV)

Η τεχνολογία δεύτερης γενιάς προσανατολίζεται στην μείωση του κόστους, μειώνοντας την ποσότητα ενεργού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Όμως, λόγω του φυσικού ορίου που υπάρχει σε αυτήν τη διαδικασία, η τεχνολογία στρέφεται στην περεταίρω μείωση του κόστους περιορίζοντας τον λόγο $\$/w$. Γίνεται, δηλαδή προσπάθεια αύξησης όσο το δυνατόν της ενεργειακής απόδοσης του ΦΒ στοιχείου, διατηρώντας και τα στοιχεία της τεχνολογίας δεύτερης γενιάς (thin film). Οδηγούμαστε έτσι, στην δημιουργία ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων (multi-junction solar cells), που στόχο έχουν την επίτευξη πολύ υψηλών ενεργειακών αποδόσεων. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι κυψέλες μίας στρώσης έχουν καλύτερη απόδοση σε μήκος κύματος σχεδόν ίσο με το ενεργειακό τους διάκενο, στα υπόλοιπα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος υστερούν σε απόδοση. Αντίθετα, οι κυψέλες πολλαπλών στρώσεων έχουν και πολλαπλά ενεργειακά διακένα και έτσι αξιοποιούν όλο το ηλιακό φάσμα [7]. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στις κυψέλες αυτές προέρχονται από την τρίτη και την πέμπτη ομάδα του Περιοδικού Πίνακα (III-V PV cells) όπως το Γάλλιο, το Ίνδιο, το Φώσφορο και το Αρσένιο. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των παραπάνω τεχνολογιών [13]:

Technology	η (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	W/m²
u c-Si	24.7	0.5	0.8	63
p c-Si	20.3	0.615	8.35	211
a-Si	11.1	6.3	0.0089	33
CdTe	16.5	0.86	0.029	–
CIGS	19.5	–	–	–
MJ	40.7	2.6	1.81	476

Πίνακας 2.1: Σύγκριση Τεχνολογιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία των ΦΒ κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων (multijunction solar cells) είναι καινούργια και προσφέρει εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις, συγκριτικά με τα παραδοσιακά ΦΒ στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την κάθε τεχνολογία, οι συγκεκριμένες κυψέλες μπορούν να παράγουν σχεδόν διπλάσια ισχύ υπό τις ίδιες συνθήκες, σε σχέση με τα απλά ΦΒ στοιχεία από πυρίτιο. Δυστυχώς όμως, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη τεχνολογία είναι πολύ ακριβά, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται κυρίως σε εγκαταστάσεις πολύ υψηλών αποδόσεων, όπως διαστημικές εφαρμογές.

Οι ΦΒ κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων μπορούν να αξιοποιούν καλύτερα το ηλιακό φάσμα, έχοντας πολλαπλές επιστρώσεις ημιαγωγών με διαφορετικά ενεργειακά διακένα. Κάθε στρώση είναι φτιαγμένη από διαφορετικό υλικό, το οποίο είναι σχεδόν πάντα ημιαγωγός από την Τρίτη ή την Πέμπτη ομάδα του Περιοδικού Πίνακα, με αποτέλεσμα να απορροφάται διαφορετικό μέρος του ηλιακού φάσματος. Η επάνω στρώση πρέπει να έχει το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο, ώστε μόνο τα φωτόνια με την μεγαλύτερη ενέργεια να απορροφώνται εκεί. Τα φωτόνια με την μικρότερη ενέργεια πρέπει να διαπεράσουν την επάνω στρώση, ώστε να μην διαθέτουν πλέον αρκετή ενέργεια για να δημιουργήσουν οπή στο υλικό. Πηγαίνοντας από πάνω προς τα κάτω, κάθε στρώση έχει μικρότερο ενεργειακό διάκενο από την προηγούμενη. Έτσι, κάθε στρώση απορροφά τα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο της συγκεκριμένης στρώσης και μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο της παραπάνω στρώσης. Οι πιο κοινές τέτοιου είδους ΦΒ κυψέλες αποτελούνται από τρεις επιστρώσεις και ονομάζονται ηλιακές κυψέλες τριών επιστρώσεων (triple-junction solar cells). Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα ρεκόρ αποδόσεων που έχουν σημειωθεί στο εργαστήριο και στην βιομηχανία αυτής της τεχνολογίας [10].

Πίνακας 3.1

Record efficiencies in laboratories tests.

	Effic. (%)	Suns	Manufacturer	Date	Type	Description
1	41,6	364	Spectrolab	2009	GaInP/GaInAs/Ge	Lattice-matched
2	41,1	454	Fraunhofer	2009	GaInP/GaInAs/Ge	Lattice-mismatched
3	40,8	326	NREL	2008	GaInP/GaInAs/GaInAs	Inverted monolithic
4	40,7	240	Spectrolab	2006	GaInP/GaInAs/Ge	Lattice-mismatched
5	37,2	500	Sharp	2005	InGaP/InGaAs/Ge	Lattice-matched

Πίνακας 3.2

Commercial cell efficiencies.

	Effic. (%)	Suns	Manufacturer	Type	Country	Description
1	39	500	Emcore/NREL	Multijunction	USA	www.emcore.com
2	38.5	500	Spectrolab	Multijunction	USA	www.spectrolab.com
3	35	500	Spire	Multijunction	USA	www.spirecorp.com
4	35	300	Azur Space	Multijunction	Germany	www.azurspace.com
5	27	100	Amonix	Silicon	USA	www.amonix.com

3.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά MJSC

3.2.1 Ενεργειακό διάκενο

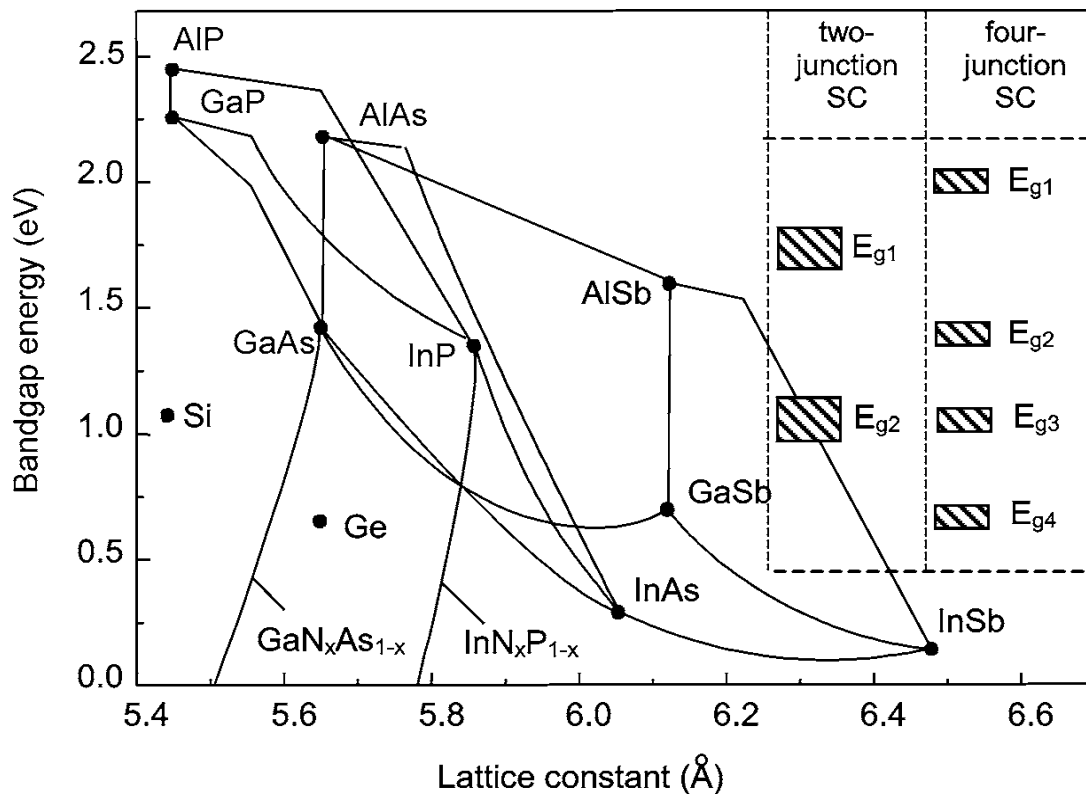
Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, το ενεργειακό διάκενο ενός υλικού, που χρησιμοποιείται στις ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων, είναι υπεύθυνο για το πόση ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από κάθε φωτόνιο. Η ιδανική διαφορά μεταξύ των συνεχόμενων επιστρώσεων μίας ηλιακής κυψέλης πρέπει να είναι περίπου σταθερή, ώστε κάθε στρώση να μπορεί να απορροφά ίση ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα, η διαφορά της τιμής των ενεργειακών διακένων των υλικών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, αφού η ποσότητα της περίσσειας ενέργειας από την μετατροπή της ακτινοβολίας σε θερμότητα είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας των φωτονίων και των ενεργειακών διακένων των υλικών. Επιπλέον, η ηλιακή κυψέλη πρέπει να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο από το ηλιακό φάσμα, με αποτέλεσμα η επάνω στρώση να πρέπει να έχει μεγάλο ενεργειακό διάκενο, ενώ η κάτω στρώση να έχει μικρό.

Είναι εμφανές ότι πρέπει να υπάρχει μία σχεδιαστική βελτιστοποίηση για συγκεκριμένο αριθμό επιστρώσεων, ανάμεσα στην μικρή διαφορά των ενεργειακών διακένων των συνεχόμενων

επιστρώσεων που πρέπει να έχουν και το μεγάλο εύρος του ηλιακού φάσματος που πρέπει να καλύπτουν. Την παρούσα χρονική στιγμή, η βελτιστοποίηση αυτή οδηγεί τις εταιρίες ΦΒ στην κατασκευή ηλιακών κυψελών τριών επιστρώσεων (Triple-junction solar cells). Οι κυψέλες αυτές αποτελούνται από GaInP (Γάλλιο, Ίνδιο, Φώσφορο) , GaAs (Γάλλιο, Αρσένιο) και Ge (Γερμάνιο), με αντίστοιχα ενεργειακά διάκενα 1.8 eV, 1.4 eV, 0.7 eV [11].

3.2.2 Σταθερά κρυσταλλικού πλέγματος (Lattice constant)

Στις ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων, οι διαφορετικές επιστρώσεις αναπτύσσονται απευθείας στην κορυφή της επίστρωσης που χρησιμοποιεί το ίδιο υπόστρωμα. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου είναι ότι η σταθερά του κρυσταλλικού πλέγματος, η οποία περιγράφει την απόσταση των μορίων μίας κρυσταλλικής δομής, πρέπει να είναι ίδια για όλες τις επιστρώσεις. Έρευνες δείχνουν ότι μία αστοχία στο πλέγμα της τάξεως του 0.01%, μπορεί να μειώσει σημαντικά το ρεύμα που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη [12]. Ο συγκεκριμένος περιορισμός είναι κατανοητό, ότι μειώνει σημαντικά τον αριθμό των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων. Στο παρακάτω διάγραμμα [13] παρουσιάζεται η σταθερά κρυσταλλικού πλέγματος και το ενεργειακό διάκενο κάποιων κοινών ημιαγωγών. Οι γραμμές μεταξύ διαφορετικών υλικών αντιπροσωπεύουν ημιαγωγούς που σχηματίζονται από τον συνδυασμό διαφορετικών ποσοτήτων των δύο υλικών. Τα κουτιά παραπέμπουν στην απόσταση των ενεργειακών διακένων πιθανών υλικών, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση σε ηλιακές κυψέλες δύο και τεσσάρων επιστρώσεων αντίστοιχα.



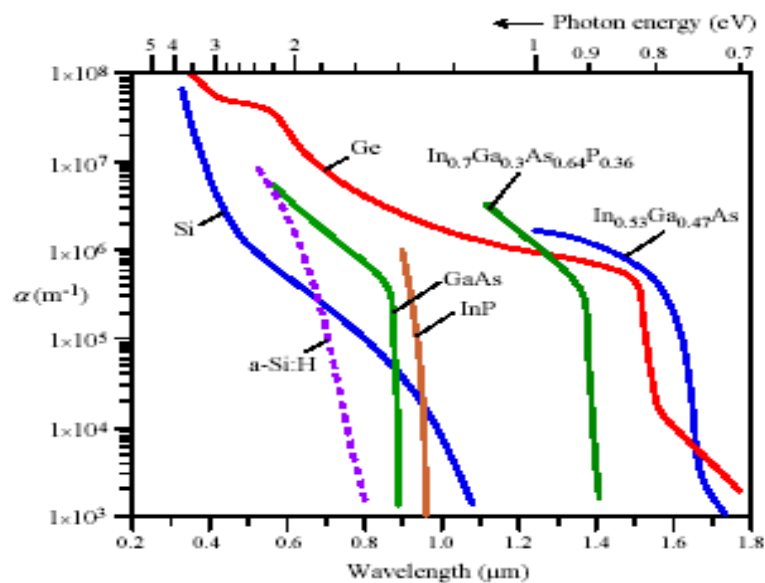
Διάγραμμα 3.1: Ενεργειακό διάκενο και σταθερά κρυσταλλικού πλέγματος κοινών ημιαγώγιμων υλικών

3.2.3 Εξάρτηση του πάχους της κάθε επίστρωσης από το φωτόρευμα [13]

Από τη στιγμή που το ρεύμα σε μία ηλιακή κυψέλη πολλαπλών επιστρώσεων ρέει από την κορυφή προς τα κάτω, οι στρώσεις της πρέπει να είναι σε σειρά. Έτσι, το ρεύμα που διαρρέει κάθε στρώση πρέπει να έχει την ίδια ένταση και επομένως το ρεύμα που παράγεται από μία ηλιακή κυψέλη αυτής της τεχνολογίας περιορίζεται από τη στρώση που παράγει το ρεύμα με την μικρότερη ένταση. Για την επίτευξη, δηλαδή, της μέγιστης απόδοσης, πρέπει η κυψέλη να σχεδιάζεται έτσι ώστε κάθε στρώση να παράγει το ίδιο ρεύμα, το οποίο είναι ανάλογο με τον αριθμό των φωτονίων που απορροφούνται σε κάθε στρώση. Μετά την επιλογή των ενεργειακών διακένων και της σταθεράς κρυσταλλικού πλέγματος των υλικών, είναι σημαντική και η επιλογή του πάχους της κάθε στρώσης, ώστε να δημιουργούν το ίδιο ρεύμα.

Δύο είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το σωστό πάχος της κάθε στρώσης: α) ο αριθμός των φωτονίων που απορροφάται και β) η σταθερά απορροφητικότητας του υλικού. Η ένταση του φωτός μειώνεται εκθετικά με την διείσδυση σε ένα υλικό, όπου η συγκεκριμένη εκθετική σταθερά ονομάζεται σταθερά απορροφητικότητας. Μία στρώση με χαμηλή σταθερά απορροφητικότητας πρέπει να κατασκευάζεται με μεγαλύτερο πάχος, ώστε ένα φωτόνιο να πρέπει να διασχίσει περισσότερο υλικό μέχρι να

απορροφηθεί. Έτσι, σχεδιάζοντας το πάχος της κάθε στρώσης σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, θα επιτυγχάνεται και το ταίριασμα των ρευμάτων που παράγεται σε κάθε στρώση. Για παράδειγμα [14], σε μία ηλιακή κυψέλη τριπλής στρώσης, το πάχος της επίστρωσης Γερμανίου (Ge) υπολογίζεται περίπου 40μm για διαστημικές εφαρμογές και 150μm για επίγειες. Το παρακάτω διάγραμμα [15] παρουσιάζει την αναλογία της σταθεράς απορροφητικότητας διάφορων ημιαγωγών σε σχέση με το μήκος κύματος:

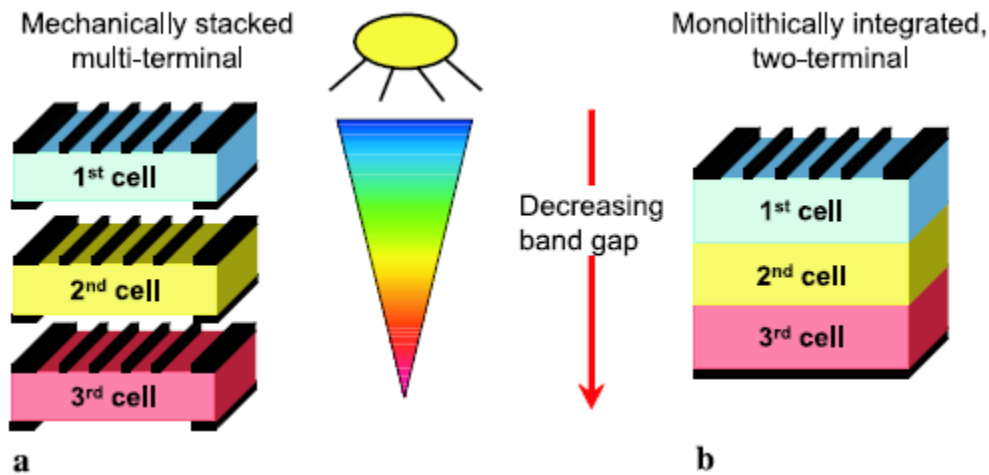


Διάγραμμα 3.2: Σταθερά απορροφητικότητας (α) - μήκος κύματος (λ)

3.3 Επιδόσεις ηλιακών κυψελών τριπλής στρώσης (TJSC)

Οι πιο ισχυρές ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων στην βιομηχανία σήμερα, είναι οι ηλιακές κυψέλες τριπλής στρώσης (TJSC) κατασκευασμένες από GaInP, GaAs και Ge, με ενεργειακά διάκενα 1.8 eV, 1.4 eV, 0.7eV, αντίστοιχα. Δύο κατασκευαστικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την τεχνολογία αυτή [16]: α) η μηχανική προσέγγιση ένωσης (mechanically stacked approach), στην οποία κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο κατασκευάζεται σε μεμονωμένο υπόστρωμα και στην συνέχεια ενώνονται μεταξύ τους. Κάθε επίστρωση έχει τον δικό της θετικό και αρνητικό πόλο και μπορεί να συνδεθεί ανεξάρτητα. β) τη μονολιθική προσέγγιση (monolithic approach), στην οποία τα διαφορετικά υλικά αναπτύσσονται στο ίδιο υπόστρωμα και συνδέονται σε σειρά με την μεσολάβηση ενδιάμεσων διόδων (tunnel diodes). Ο σχεδιασμός των ενδιάμεσων διόδων πρέπει να γίνεται έτσι, ώστε το πάχος τους να είναι

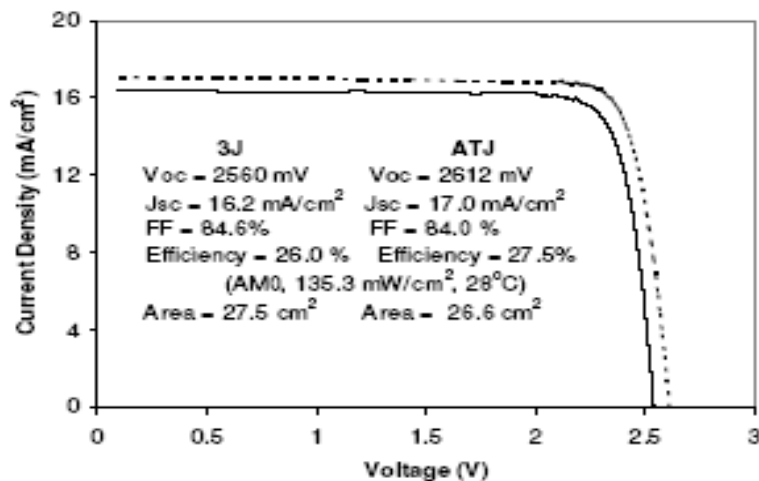
όσο το δυνατόν μικρότερο για να απορροφούν και ελάχιστη ακτινοβολία. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την ένωση πολλών υλικών, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός θετικού και ενός αρνητικού πόλου για όλη την συσκευή, ακριβώς όπως και στις ηλιακές κυψέλες μίας στρώσης. Για τον λόγο αυτό, η δεύτερη σχεδιαστική προσέγγιση είναι αυτή που έχει επικρατήσει στην βιομηχανία.



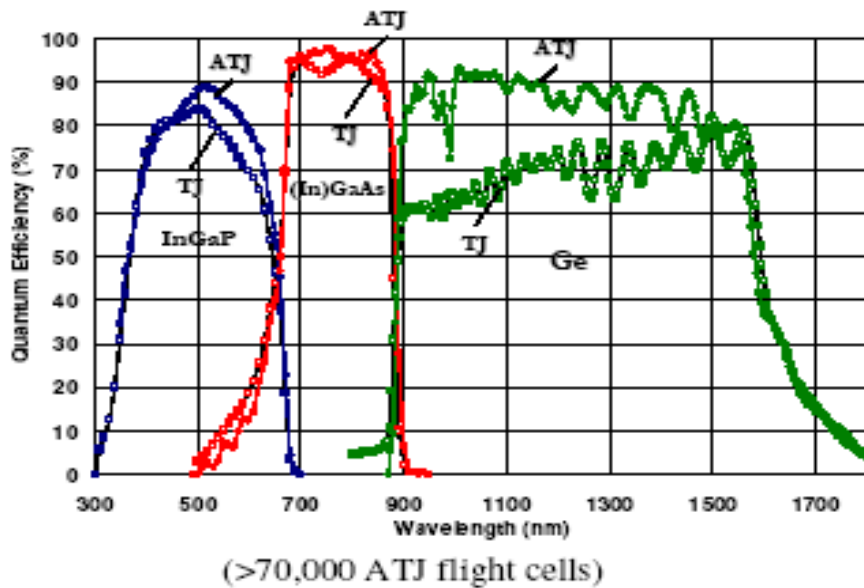
Σχήμα 3.1: α) μηχανική προσέγγιση,

β) μονολιθική προσέγγιση

Μέχρι το 2005, μόνο δύο εταιρίες προωθούσαν την συγκεκριμένη τεχνολογία η **Emcore** και η **Spectrolab**. Η πρώτη κυψέλη κατασκευάστηκε από την Emcore (TJ) για διαστημικές εφαρμογές και αργότερες βελτιώσεις οδήγησαν σε περισσότερο αποδοτικές κυψέλες τις ATJ (advanced triple-junction) [17]. Οι τυπικές αποδόσεις αυτού του είδους των κυψελών, άγγιζαν το 26 και 27.5% αντίστοιχα, τιμές πολύ μεγαλύτερες από αυτές των επίγειων κυψελών πυριτίου (16- 18%) που χρησιμοποιούνται σήμερα [17]. Παρακάτω, παρατίθεται το διάγραμμα ρεύματος – τάσης αυτών των κυψελών και τα βασικά χαρακτηριστικά τους [16].



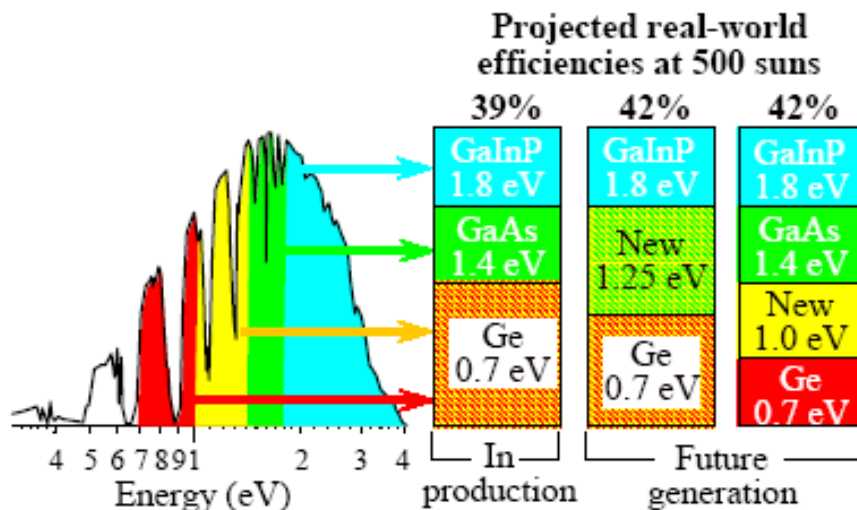
Διάγραμμα 3.3: Διάγραμμα ρεύματος – τάσης TJ και ATJ



Διάγραμμα 3.4: Κβαντική απόδοση για κάθε επίστροση των TJ και ATJ κυψελών

Στο παραπάνω διάγραμμα [18] παρατηρούμε ότι η κβαντική απόδοση όλων των επιστρώσεων είναι κοντά στο 90% για τα περισσότερα μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα, η μετάβαση ανάμεσα στις επιστρώσεις του (In)GaAs και του Ge είναι απότομη, ενώ η μετάβαση από την στρώση του InGaP σε αυτήν του (In)GaAs είναι σταδιακή, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία με μήκος κύματος περίπου μικρότερο από 650nm να μην απορροφάται αποδοτικά. Αντίθετα, η επίστροση του Γερμανίου απορροφά μία μεγαλύτερη αναλογία του φάσματος από τις άλλες δύο επιστρώσεις, γεγονός το οποίο είναι αποτέλεσμα της μεγάλης διαφοράς των ενεργειακών διακένων των επιστρώσεων GaAs και Ge (0.7eV), σε αντίθεση με αυτή των επιστρώσεων GaInP και GaAs (0.4eV).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η βελτίωση της απόδοσης των ηλιακών κυψελών επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: α) με την χρήση μίας νέας επίστροσης ημιαγωγού με ενεργειακό διάκενο 1.25eV αντί του GaAs, δημιουργώντας πλέον μία διαφορά 0.55eV μεταξύ και των τριών επιστρώσεων. β) προσθέτοντας μία νέα επίστροση στις ήδη τρεις υπάρχουσες με ενεργειακό διάκενο 1eV. Η καινούργια αυτή ηλιακή κυψέλη τεσσάρων επιστρώσεων θα έχει μία διαφορά των 0.3 ή 0.4 eV μεταξύ των διαδοχικών επιστρώσεων. Η απόδοση αυτών των καινούργιων τεχνολογιών φτάνει το 40-42% για επίγειες εφαρμογές! Οι αποδόσεις και οι αναλογίες του φάσματος που απορροφά η κάθε στρώση των παραπάνω τεχνολογιών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα [11].



Σχήμα 3.2: Αποδόσεις και η διαίρεση του φάσματος που απορροφά η κάθε επίστρωση

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά μίας ηλιακής κυψέλης τριών επιστρώσεων απόδοσης 29.5% που παράγεται σήμερα από την εταιρεία Spectrolab, καθώς και το κοστολόγιο της εταιρίας για τρεις διαφορετικούς τύπους ηλιακών κυψελών με αποδόσεις πάνω από 30% [19].

29.5% NeXt Triple Junction (XTJ) Solar Cells

Typical Electrical Parameters

(AM0 (135.3 mW/cm²) 28°C, Bare Cell)

Jsc= 17.76 mA/cm ²
Jmp= 17.02 mA/cm ²
Jload _{min avg} = 17.14 mA/cm ²
Voc= 2.633 V
Vmp= 2.348 V
Vload= 2.310 V
Cff= 0.85
Effload= 29.3%
Effmp= 29.5%

Radiation Degradation

(Fluence 1MeV Electrons/cm²)

Parameters	1x10 ¹⁴	5x10 ¹⁴	1x10 ¹⁵
Jmp/Jmp ₀	1.00	0.99	0.95
Vmp/Vmp ₀	0.94	0.91	0.89
Pmp/Pmp ₀	0.95	0.90	0.85

Thermal Properties

Solar Absorptance= 0.90 (5 mil CMG/AR, 0.88 for bare cell)

Emittance (Normal)= 0.85 (Ceria Doped Microsheet)

Weight

84 mg/ cm² (Bare) @ 140 μm (5.5 mil) Ge wafer thickness

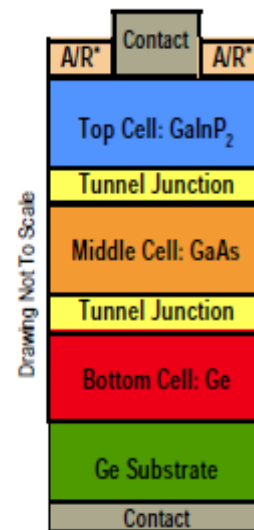
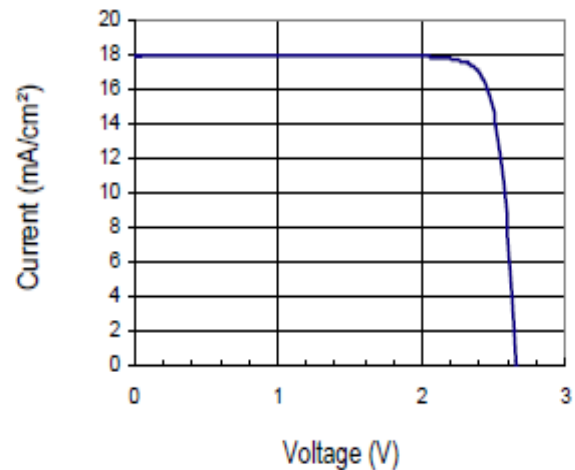
Temperature Coefficients (15°C - 75°C)

(Fluence 1MeV Electrons/cm²)

Parameters	BOL	5x10 ¹⁴	1x10 ¹⁵
Jmp (μA/cm ² /°C)	6.6	10.0	13.2
Jsc (μA/cm ² /°C)	11.6	10.9	11.9
Vmp (mV/°C)	-6.5	-6.8	-6.9
Voc (mV/°C)	-5.8	-6.5	-6.6

Typical IV Characteristic

AM0 (135.3 mW/cm²) 28°C, Bare Cell



*A/R: Anti-Reflective Coating

The information contained on this sheet is for reference only. Specifications subject to change without notice.

Revised 5/20/2010

© 2010 Spectrolab, Inc All Rights Reserved

2011 CDO-100 Solar Cells Budgetary Pricing Table				
Quantity	C3MJ+ CDO-100 Bare Cells Part# 21-046191-321	C3MJ CDO-100-IC (Interconnects) Part# 01-31-045505-301	C3MJ PROTOTYPE CCA-100 Part# 046200	Small Order Processing Fee (Orders Under \$20,000)
1-100	\$91.32	\$99.49	\$100.84	\$1,195
101-1,000	\$29.06	\$36.11	\$56.27	\$1,195 (may be applicable)
1,001-5,000	\$11.00	\$14.71	\$40.89	\$1,195 (may be applicable)
5,001-25,000	\$9.04	\$12.51	\$36.79	No fee
25,001-100,000	\$7.98	\$11.20	\$33.57	No fee
100,001-250,000	\$7.43	\$10.52	N/A	N/A
250,001-750,000	\$7.32	\$10.42	N/A	N/A
750,001-2,000,000	\$7.30	\$10.39	N/A	N/A
2,000,001 +	\$7.22	\$10.32	N/A	N/A

**Note: Based on market fluctuations for germanium (Ge), the prices provided may change
Budgetary prices as of 3/3/11**

Πίνακας 3.3: Κοστολόγιο TJSC εταιρείας Spectrolab

3.4 Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά

Από το παραπάνω πίνακα είναι εμφανές, ότι το κόστος των ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό το κυψελών πυριτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι αρκετά περίπλοκη και τα υλικά που χρησιμοποιεί είναι αρκετά πιο δυσεύρετα από το πυρίτιο. Έτσι, η τεχνολογία των ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων πρέπει να εφαρμόζεται διαφορετικά και για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τα **συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά** (Concentrated PV) [20]. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί κάτοπτρα (όπως αυτό τις παρακάτω εικόνας), που συγκεντρώνουν μεγάλη ποσότητα ακτινοβολίας σε μία μικρή επιφάνεια ηλιακών κυψελών. Τότε, οι ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων γίνονται εξαιρετικά αποδοτικές και μειώνεται το κόστος, αφού χρειάζεται ένας μικρός αριθμός κυψελών για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρισμού.

Έχουν αναπτυχθεί πολλά οπτικά μέσα για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά, από τα οποία τα σημαντικότερα είναι τα εξής:

A. Κυλινδροπαραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα: Κάθε ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από μία ανακλαστική επιφάνεια παραβολικού σχήματος, η οποία συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σωληνωτό δέκτη, που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του κοίλου.



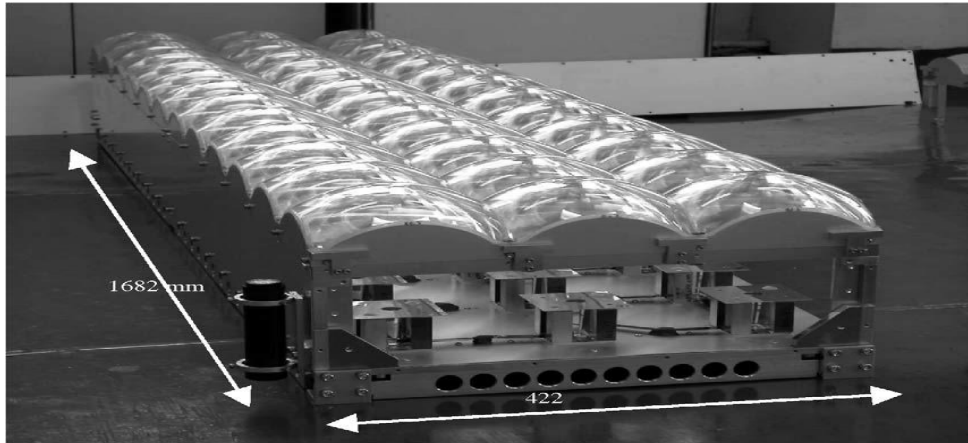
Εικόνα 3.1: Κυλινδροπαραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα

Β. Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος: Η τεχνική χρησιμοποιεί την ακτινοβολία του ήλιου για να θερμάνει μια τεράστια ποσότητα αέρα, η οποία αναγκάζεται να κινηθεί ως καυτός άνεμος μέσω μεγάλων στροβίλων, ώστε να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για ένα συνδυασμό καμινάδας, ανεμογεννήτριας και θερμοκηπίου. Η συγκέντρωση των συστημάτων αυτών κυμαίνεται από 200 – 1000 ήλιους (suns).



Εικόνα 3.2: Ηλιακός πύργος ισχύος

Γ. Φακοί Fresnel: Είναι λεπτοί φακοί, όπου σε κάθε σημείο ή τμήμα τους η διάθλαση των ακτινών είναι διαφορετική, ώστε να συγκλίνουν τελικά σε ένα εστιακό σημείο ή γραμμή, ανάλογα με την γεωμετρία τους.



Εικόνα 3.3: Φακοί Fresnel

Δ. Παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης: Στα συστήματα αυτά, ένα πιάτο παρακολουθεί τον ήλιο και συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε έναν δέκτη που είναι τοποθετημένος στο εστιακό του σημείο. Στο δέκτη βρίσκεται τοποθετημένη η ηλιακή κυψέλη, με τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται η σκίαση που δημιουργεί στο πιάτο.

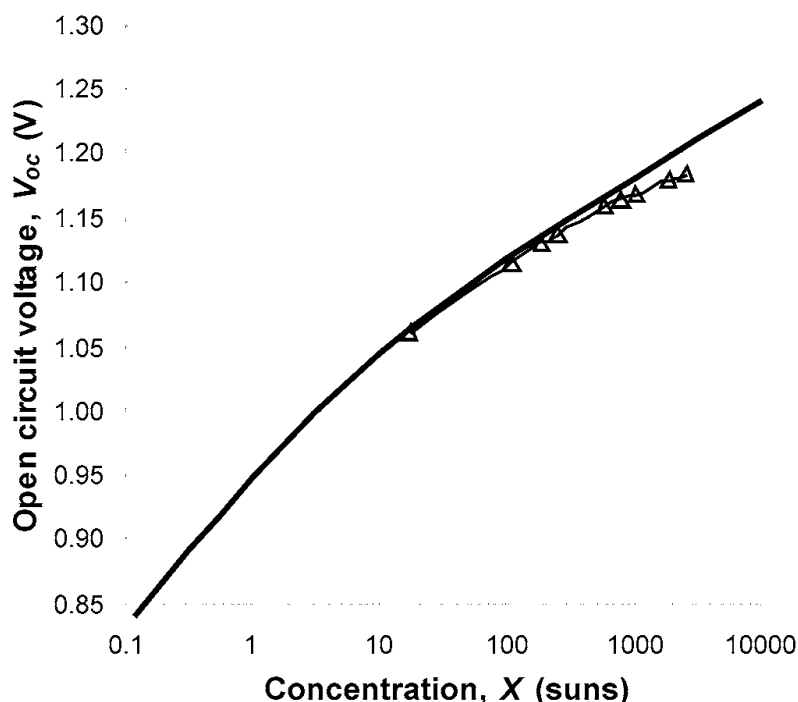


Εικόνα 3.4: Συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό πιάτο

3.5 Επίδραση οπτικών συγκεντρωτικών μέσων στις MJSC [13]

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν δύο βασικά οφέλη από την χρήση των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών, η μείωση του κόστους, αλλά και η αύξηση στην συνολική απόδοση των ηλιακών κυψελών. Η αύξηση αυτή ουσιαστικά παρουσιάζεται κυρίως από την αύξηση της

τάσης ανοικτοκύκλωσης. Πάνω από ένα μεγάλο εύρος αναλογιών συγκέντρωσης, το φωτόρευμα μίας ηλιακής κυψέλης είναι ανάλογο με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Φυσικά, αυτή η αναλογία σταματάει να υφίσταται, όταν παρουσιάζεται εξαιρετικά μεγάλος λόγος συγκέντρωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό για την ηλιακή κυψέλη GaAs.

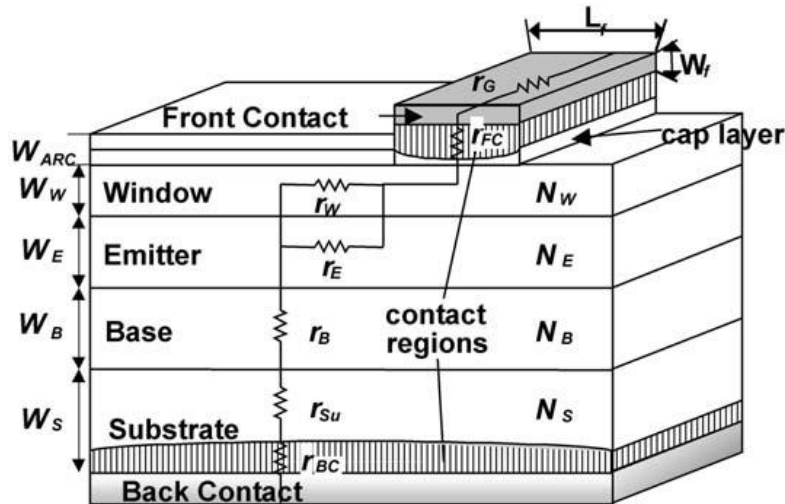


Διάγραμμα 3.5: Τάση ανοικτοκύκλωσης-Συγκέντρωση GaAs (θεωρητικές και πειραματικές μετρήσεις)

Μαζί με την αύξηση στην τάση ανοικτοκύκλωσης, αυξάνεται και ο συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor) με την συγκέντρωση, θεωρώντας αμελητέες της αντιστάσεις σειράς (series resistance). Επειδή η αύξηση της τάσης ανοικτοκύκλωσης επικρατεί αυτής του συντελεστή πλήρωσης, η αύξηση στην συνολική απόδοση σε σχέση με την συγκέντρωση είναι σχεδόν λογαριθμική. Παρόλα αυτά, η αύξηση αυτή είναι περιορισμένη στην πραγματικότητα, λόγω της επίδρασης των αντιστάσεων σειράς. Όταν, η επίδραση αυτή αρχίζει και γίνεται κυρίαρχη, ο συντελεστής πλήρωσης μειώνεται με την περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η συνολική απόδοση της ηλιακής κυψέλης μειώνεται, καθώς ο συντελεστής πλήρωσης υπερνικά την αύξηση της τάσης ανοικτοκύκλωσης. Έτσι, ο ακριβής έλεγχος του φαινομένου αυτού κρίνεται απαραίτητος για την δημιουργία ενός αποδοτικού συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος.

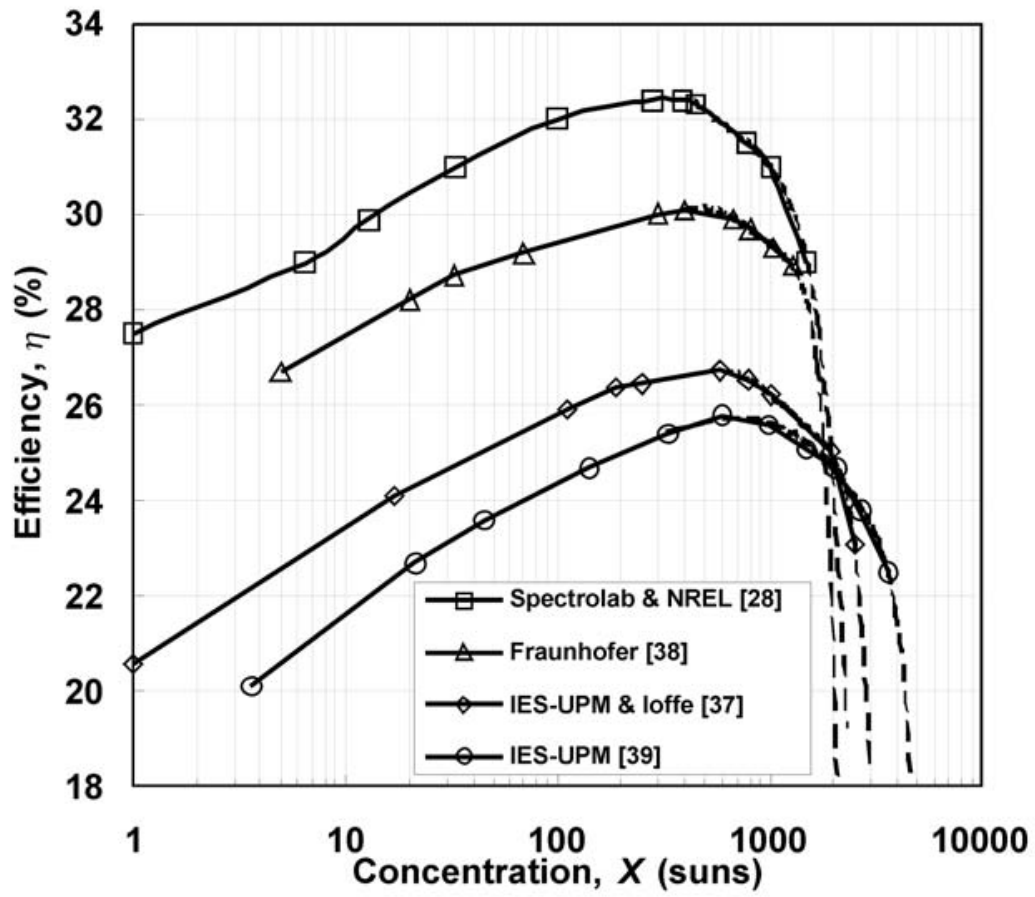
Επιπλέον, μία άλλη αιτία που είναι συνδεδεμένη με τις αντιστάσεις σειράς [21] είναι οι ενδιάμεσες στρώσεις (tunnel junctions) των MJSC. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να επιτυγχάνεται μία ορθή

βελτιστοποίηση ανάμεσα στην υψηλή μεταδοτικότητα του φωτός και την υψηλή αγωγιμότητα της στρώσης. Συγκεκριμένα, υλικά με υψηλό ενεργειακό διάκενο είναι ιδανικά για την υψηλή μεταδοτικότητα, αλλά έχουν χαμηλή αγωγιμότητα (άρα και μεγάλες αντιστάσεις σειράς), ενώ υλικά με χαμηλό ενεργειακό διάκενο παρουσιάζουν την αντίστροφη συμπεριφορά.



Σχήμα 3.3: Αντιστάσεις σειράς μιας ηλιακής κυψέλης

Τέλος, είναι πολύ σημαντική για την συνολική απόδοση του συστήματος, η επιλογή του βαθμού συγκέντρωσης που εφαρμόζεται πάνω σε μία ηλιακή κυψέλη. Τη δεκαετία του 90, η τιμή του βαθμού συγκέντρωσης κυμαινόταν 100 – 200 suns. Η τιμή αυτή είχε καθιερωθεί, λόγω των περιοριστικών παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς η τεχνολογία δεν είχε αναπτυχθεί σε αυτόν το τομέα. Σε μεγαλύτερους βαθμούς συγκέντρωσης οι τότε ηλιακές κυψέλες παρουσίαζαν σημαντική μείωση στον βαθμό απόδοσης. Τα τελευταία χρόνια, οι επιστήμονες έχουν επικεντρωθεί στην παράλληλη ανάπτυξη τριών παραγόντων: την τεχνολογία των ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων, την τεχνολογία των οπτικών μέσων συγκέντρωσης και το κόστος του συνολικού συστήματος. Το υπολογισμένο όριο του βαθμού συγκέντρωσης, σύμφωνα με την απόσταση του ήλιου από την γη, είναι 46200 ήλιοι. Σήμερα, ο προτεινόμενος βαθμός συγκέντρωσης των περισσότερων εταιριών κυμαίνεται από 400 – 1000 suns για επίγειες εφαρμογές, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 3.6: Αποδόσεις διαφορετικών ηλιακών κυψελών σε συνάρτηση με το βαθμό συγκέντρωσης

Κεφάλαιο 4

Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας [22- 24]

4.1 Εισαγωγή

Στην θερμοδυναμική , η θερμότητα ορίζεται ως η ενέργεια που διασχίζει τα όρια ενός συστήματος όταν αυτή η μεταφορά της ενέργειας συμβαίνει εξαιτίας μίας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος δηλώνει ότι η θερμότητα ρέει πάντα προς το ψυχρότερο μέσο. Ωστόσο, η θερμοδυναμική δεν δείχνει , ότι αυτή η μεταφερόμενη θερμότητα εξαρτάται από την διαφορά της θερμοκρασίας ή πόσο γρήγορη και έντονη αυτή η μη αναστρέψιμη διαδικασία είναι. Η επιστήμη της μεταφοράς θερμότητας διευκρινίζει τους νόμους που διέπουν αυτή την διαδικασία. Υπάρχουν τρεις τρόποι για την μεταφορά θερμότητας :

- ✓ Αγωγή
- ✓ Συναγωγή
- ✓ Ακτινοβολία

4.2 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Αγωγή είναι η μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργά σωματίδια μίας ουσίας προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά σωματίδια λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να συμβεί στα στερεά στα υγρά ή στα αέρια. Στα αέρια και στα υγρά , η αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και στην διάχυση μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους. Στα στερεά , οφείλεται στο συνδυασμό των ταλαντώσεων των μορίων σε μία δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Εάν σε ένα μέσο υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας , η θερμότητα θα ρέει από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας στην περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα δια αγωγής (q_k) είναι ανάλογος με την παράγωγο της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο επί την επιφάνεια μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα.

$$q_k = A \times (dT/dx)$$

Στην παραπάνω σχέση το $T(x)$ είναι η τοπική θερμοκρασία και x είναι η απόσταση στην διεύθυνση που μεταδίδεται η θερμότητα. Ο

ρυθμός με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα, που είναι μία φυσική ιδιότητα του μέσου. Για αγωγή μέσο ενός ομογενούς μέσου, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$q_k = -k \times A \times (dT/dx)$$

Το σύμβολο « - » είναι συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, που απαιτεί η θερμότητα να ρέει από την υψηλότερη στην χαμηλότερη θερμοκρασία. Δηλαδή η παράγωγος της θερμοκρασίας θα είναι αρνητική αν η θερμοκρασία ελαττώνεται όταν η τιμές του x αυξάνονται. Έτσι, πρέπει να βάλουμε « - » αν θερμότητα μεταφέρεται προς τα θετικά του x στο δεξιό μέλος της εξίσωσης. Η παραπάνω εξίσωση ορίζει την θερμική αγωγιμότητα και είναι ο νόμος του Fourier για την αγωγή. Η θερμική αγωγιμότητα (k) είναι μια ιδιότητα του υλικού που δείχνει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στην μονάδα του χρόνου κατά μήκος της μονάδας επιφάνειας όταν η παράγωγος της θερμοκρασίας είναι συνεχής. Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI), η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά μέτρα (m²), η θερμοκρασία σε Kelvin (K), η απόσταση x σε μέτρα (m) και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Watt (W). Έτσι οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας είναι W/mK. Ο νόμος του Fourier ορίζει την θερμική αγωγιμότητα με την σχέση:

$$K \equiv (qk / A) / |dT/dx|$$

Πάραυτα, στους υπολογισμούς γενικά χρησιμοποιούμε πειραματικά μετρημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, αν και για τα αέρια σε μέτριες θερμοκρασίες η θεωρία της κινητικής των αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των πειραματικών δεδομένων επαρκώς. Γενικά, οι ικανότεροι αγωγοί θερμότητας είναι τα μέταλλα και οι χαμηλότερες τιμές του k εμφανίζονται στα αέρια, ενώ στο ενδιάμεσο βρίσκονται τα κράματα μετάλλων και τα υγρά.

4.2.1. Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα Αέρια / Υγρά / Στερεά

Αέρια: Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα αέρια μπορεί να εξηγηθεί σε μοριακό επίπεδο, μέσο της κινητικής θεωρίας των αερίων. Η κινητική ενέργεια ενός μορίου σχετίζεται με την θερμοκρασία του. Τα μόρια σε μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας έχουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτά που βρίσκονται σε μία περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Καθώς τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση, συγκρούονται μεταξύ τους και ανταλλάσσουν ορμή και

ενέργεια. Όταν ένα μόριο κινηθεί από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, σε μία περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας μεταφέρει κινητική ενέργεια. Καθώς συγκρούεται με τα μόρια χαμηλής ταχύτητας, δίνει κάποιο μέρος της ενέργειάς του, αυξάνοντας έτσι την ενέργεια των μορίων χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου. Με αυτόν τον τρόπο θερμότητα μεταφέρεται από τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας στις αντίστοιχες χαμηλής μέσο της μοριακής κίνησης. Σε συμφωνία με τα παραπάνω, όσο πιο μεγάλη ταχύτητα έχουν τα μόρια τόσο πιο γρήγορα θα γίνεται και η μεταφορά θερμότητας. Συνεπώς, η ιδιότητα που ονομάστηκε θερμική αγωγιμότητα πρέπει να εξαρτάτε από την θερμοκρασία του αερίου. Σε λογικές θερμοκρασίες η απόσταση μεταξύ των μορίων ενός αερίου είναι πολύ μεγάλη, συγκρινόμενη με το μέγεθος των μορίων, επομένως η θερμική αγωγιμότητα των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της πίεσης.

Υγρά: Ο βασικός μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα υγρά είναι ποιοτικά παρόμοιος με τον αντίστοιχο των αερίων. Ωστόσο, η μοριακή κατάσταση στα υγρά είναι πιο δύσκολο να εξηγηθεί. Για τα περισσότερα υγρά η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενη την θερμοκρασία εν τούτοις το νερό είναι μια αξιοσημείωτη εξαίρεση. Ακόμη, η θερμική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη της πίεσης στα υγρά εκτός από τις περιοχές κοντά στο κρίσιμο σημείο. Τέλος σαν γενικός κανόνας, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενο το μοριακό βάρος των υγρών.

Στερεά: Σύμφωνα με τις υπάρχουσες θεωρίες, τα στερεά υλικά αποτελούνται από ελεύθερα ηλεκτρόνια και άτομα σε περιοδική κρυσταλλική δομή. Λόγω αυτού η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς:

- Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων
- Ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος.

Αυτά τα δύο φαινόμενα είναι προσθετικά, γενικότερα όμως η μετάδοση θερμότητας μέσω των ηλεκτρονίων είναι πιο αποτελεσματική. Εφόσον τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν ηλεκτρικό φορτίο με ένα τρόπο παρόμοιο με αυτόν με τον οποίο μεταφέρουν θερμότητα από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας, οι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι συνήθως και καλοί αγωγοί θερμότητας, ενώ οι μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας. Στα μη μεταλλικά στερεά υπάρχει πολύ μικρή ως και καθόλου μεταφορά ηλεκτρονίων και συνεπώς η αγωγιμότητα καθορίζεται από την ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος και σαν

συνέπεια αυτά τα υλικά έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα μέταλλα.

4.3 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αέριου που βρίσκεται σε κίνηση, και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Όταν δεν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού γίνεται αποκλειστικά με αγωγή. Όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού, αλλά κάνει και πιο πολύπλοκο τον προσδιορισμό των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αποτελείται οπότε από δύο μηχανισμούς που εκτελούνται ταυτόχρονα:

- μεταφορά ενέργειας εξαιτίας της μοριακής κίνησης (αγωγή)
- μεταφορά ενέργειας λόγω των μακροσκοπικών κινήσεων των μορίων του ρευστού

Η κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα ομάδων μορίων του ρευστού που κινούνται λόγω μίας εξωτερικής δύναμης. Αυτή η δύναμη είτε υπάρχει λόγω διαφοράς πυκνότητας όπως συμβαίνει στην ελεύθερη συναγωγή, είτε λόγω διαφοράς πίεσης που δημιουργείται από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα, είτε από συνδυασμό των δύο παραπάνω.

Η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια είναι μηδέν λόγω τυρβωδών δυνάμεων και αυξάνει προς τα πάνω ως U_∞ . Αφού το ρευστό είναι ακίνητο στην επιφάνεια σε εκείνο το σημείο η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή. Εάν γνωρίζαμε την διάφορα της θερμοκρασίας και την θερμική αγωγιμότητα σε εκείνο το σημείο θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την θερμοροή από την παρακάτω εξίσωση.

$$q_c = -k_{\text{fluid}} \times A \times (dT/dx)_{(y=0)}$$

Εν τούτοις, η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο οι μακροσκοπικές και η μικροσκοπικές κινήσεις των μορίων του ρευστού μεταφέρουν θερμότητα μακριά από την επιφάνεια. Συνεπώς η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια της πλάκας εξαρτάται από την ροή του ρευστού, και συγκεκριμένα από την

ταχύτητα U_{∞} . Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος και για την ελεύθερη συναγωγή. Η ειδοποιός διαφορά βρίσκεται στην ταχύτητα. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή μακριά από την επιφάνεια συναλλαγής η ταχύτητα πλησιάζει την ταχύτητα της ελεύθερης ροής U_{∞} , ενώ στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα στην αρχή αυξάνει με αυξανόμενη την απόσταση από την επιφάνεια συναλλαγής και μετά από κάποια τιμή αρχίζει και μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι το ιξώδες μειώνεται πολύ γρήγορα αυξάνοντας την απόσταση από την επιφάνεια , ενώ η πυκνότητα πολύ πιο αργά. Τελικά όμως, η δύναμη της άωσης μειώνεται καθώς η πυκνότητα του ρευστού πλησιάζει αυτή του ρευστού που δεν έχει θερμομανθεί.

Αυτή η αλληλεπίδραση των δυνάμεων οδηγεί την ταχύτητα του ρευστού σε ένα μέγιστο σημείο και μετά στο μηδέν , μακριά από την θερμαινόμενη πλάκα. Τα προφίλ της θερμοκρασίας και στις δύο περιπτώσεις είναι παρεμφερή και η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια γίνεται με αγωγή. Τα παραπάνω δείχνουν πως η συναγωγή εξαρτάται από την πυκνότητα, το ιξώδες και την ταχύτητα του ρευστού καθώς και από της θερμικές του ιδιότητες (θερμική αγωγιμότητα , ειδική θερμότητα). Αν και στην εξαναγκασμένη συναγωγή η ταχύτητα προσδίδεται στο σύστημα από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα και μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα , στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια και στο ρευστό , τον συντελεστή θερμικής διαστολής του ρευστού (που καθορίζει την μεταβολή της πυκνότητας ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς) και την δύναμη κίνησης (για συστήματα στην Γη η δύναμη της βαρύτητας).

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ μίας επιφάνειας και ενός ρευστού που ρέει παράλληλα προς την επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση :

$$q_c = h_{\text{cμεσο}} \times A \times \Delta T \text{ , όπου}$$

q_c = Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή , Watt (ή Btu/hr)

A = Επιφάνεια συναλλαγής , m^2 (ή ft^2)

ΔT = Θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας θερμοκρασίας T_s και του ρευστού θερμοκρασίας T_{∞} (μακριά από την επιφάνεια) , K (ή $^{\circ}F$)

$h_{\text{cμεσο}}$ = Μέσος συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια A , W/m^2K ή $(Btu/hr \times ^{\circ}F \times ft^2)$

Η παραπάνω εξίσωση προτάθηκε αρχικά από τον Βρετανό επιστήμονα Isaac Newton το 1701. Ο ι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν αυτή

την έκφραση για πολλά χρόνια, αν και περισσότερο είναι ορισμός του h_c παρά νόμος της συναγωγής. Η εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής είναι δύσκολη γιατί η συναγωγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Η τιμή του μέσου συντελεστή συναγωγής σε ένα σύστημα εξαρτάται από την γεωμετρία της επιφάνειας, την ταχύτητα και της θερμικές ιδιότητες του ρευστού και συχνά ακόμα και από την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT . Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές δεν παραμένουν σταθερές κατά μήκος μίας επιφάνειας, ο συντελεστής συναγωγής μπορεί και αυτός να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Για αυτό τον λόγο, διαχωρίζουμε τον συντελεστή συναγωγής στον τοπικό συντελεστή και τον μέσο συντελεστή. Έτσι, έχουμε για τον τοπικό συντελεστή h_c :

$$dq_c = h_c \times dT(T_s - T_\infty)$$

Ενώ για τον μέσο συντελεστή $h_{\text{μεσο}}$:

$$h_{\text{μεσο}} = (1/A) \times \iint h_c dA$$

4.4 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπει η ύλη με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων) λόγω των μεταβολών στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή των μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου. Στην πραγματικότητα, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία είναι γρηγορότερη (ίση με την ταχύτητα του φωτός) και δεν υφίσταται απώλειες στο κενό. Στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας ενδιαφέρει η θερμική ακτινοβολία, η οποία αποτελεί τη μορφή ενέργειας που εκπέμπουν τα σώματα λόγω της θερμοκρασίας τους. Διαφέρει από τις άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως ακτίνες X, οι ακτίνες γ, τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα και τα τηλεοπτικά κύματα, τα οποία δεν σχετίζονται με την θερμοκρασία. Όλα τα σώματα σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο και όλα τα στερεά, τα υγρά και τα αέρια εκπέμπουν, απορροφούν, ή μεταδίδουν ακτινοβολία σε διαφορετικό βαθμό. Ωστόσο, η ακτινοβολία θεωρείται συνήθως ως επιφανειακό φαινόμενο για τα στερεά που είναι αδιαφανή στη θερμική ακτινοβολία όπως τα μέταλλα, το ξύλο και τα πετρώματα, αφού η ακτινοβολία που εκπέμπουν οι εσωτερικές περιοχές αυτών των υλικών δεν φτάνει ποτέ στην επιφάνεια, και η προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω σε τέτοια σώματα απορροφάται συνήθως σε λίγα μόνο

μικρά από την επιφάνεια. Η ποσότητα της ενέργειας που διαφεύγει από μία επιφάνεια σαν ακτινοβολία εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και την φύση της επιφάνειας.

Ένας ιδανικός πομπός ακτινοβολίας , εκπέμπει θερμότητα από την επιφάνεια του με ρυθμό που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{emit,max}} = \sigma \times A1 \times T1^{44} \text{ , όπου}$$

$Q_{\text{emit,max}}$ = ρυθμός που εκπέμπεται θερμότητα σε Watt

A = επιφάνεια σε m²

T1 = Θερμοκρασία στην επιφάνεια σε K

σ = σταθερά «Stefan-Boltzman», με τιμή $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$

Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο αυτό ρυθμό ονομάζεται μέλαν (μαύρο) σώμα , και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι πραγματικές επιφάνειες είναι μικρότερη από εκείνη του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία, και εκφράζεται ως:

$$Q_{\text{emit,max}} = \epsilon \times \sigma \times A1 \times T1^4$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στη συνέχεια θα γίνει περιληπτική περιγραφή διάφορων επιστημονικών άρθρων πάνω στην τεχνολογία των ηλιακών κυψελών πολλαπλών επιστρώσεων, των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών, των ανιχνευτών ήλιου και των μικρο-εναλλακτών θερμότητας :

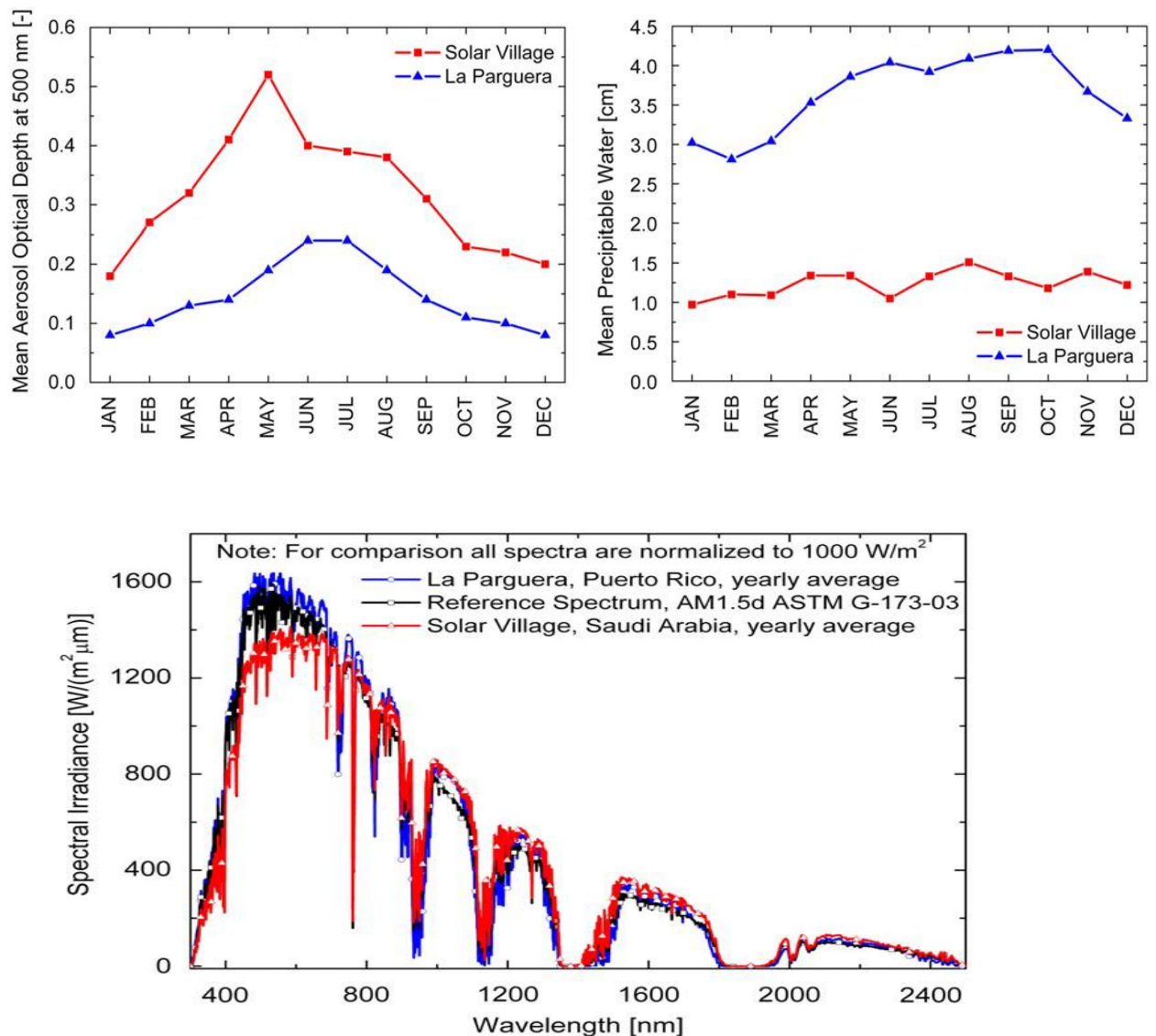
5.1 Ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων

A) Απόδοση ενεργειακής συγκομιδής ηλιακών κυψελών τριπλής στρώσης κάτω από ρεαλιστικές φασματικές συνθήκες.[25]

Οι ηλιακές κυψέλες τριπλής στρώσης είναι ευαίσθητες στις αλλαγές του ηλιακού φάσματος και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ποικιλία των φασμάτων σε διαφορετικές τοποθεσίες, όταν υπολογίζεται η ενέργεια που πρόκειται να παραχθεί από τις κυψέλες αυτές. Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται μία θεωρητική μεθοδολογία βασισμένη στην αναλυτική μέθοδο που εφαρμόστηκε από τους Shockley και Queisser. Αναλύονται δύο διαφορετικά μέρη της γης , που για το καθένα λαμβάνονται τα ωριαία φάσματα για μία περίοδο ενός χρόνου βασισμένη σε ατμοσφαιρικά δεδομένα. Εξετάζεται, ακόμη, ο συνδυασμός διακένων τεσσάρων διαφορετικών ηλιακών κυψελών τριπλής στρώσης.

Σχεδιαστική προσέγγιση

Συνθήκες φάσματος και λειτουργίας: Η επιλογή των δύο περιοχών έγινε με βάση δύο κριτήρια: πρώτον, να υπάρχει μία αξιόπιστη βάση δεδομένων των ατμοσφαιρικών στοιχείων της κάθε περιοχής βασισμένη σε μετρήσεις των πέντε τελευταίων ετών και δεύτερον, οι δύο περιοχές να διαφέρουν πολύ στις ιδιότητες της ατμόσφαιράς τους. Έτσι επιλέχθηκαν οι περιοχές Solar Village στη Σαουδική Αραβία και La Parguera στο Πουέρτο Ρίκο. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται κάποιες ιδιότητες της ατμόσφαιρας των δύο περιοχών, ενώ στο δεύτερο διάγραμμα φαίνονται τα φάσματα των δύο περιοχών σε σύγκριση με το αναφορικό φάσμα που χρησιμοποιείται συνήθως στις εργαστηριακές δοκιμές (AM1.5d ASTM G-173-03).



Διάγραμμα 5.1.1: Ατμοσφαιρικές ιδιότητες Solar Village και Parguera

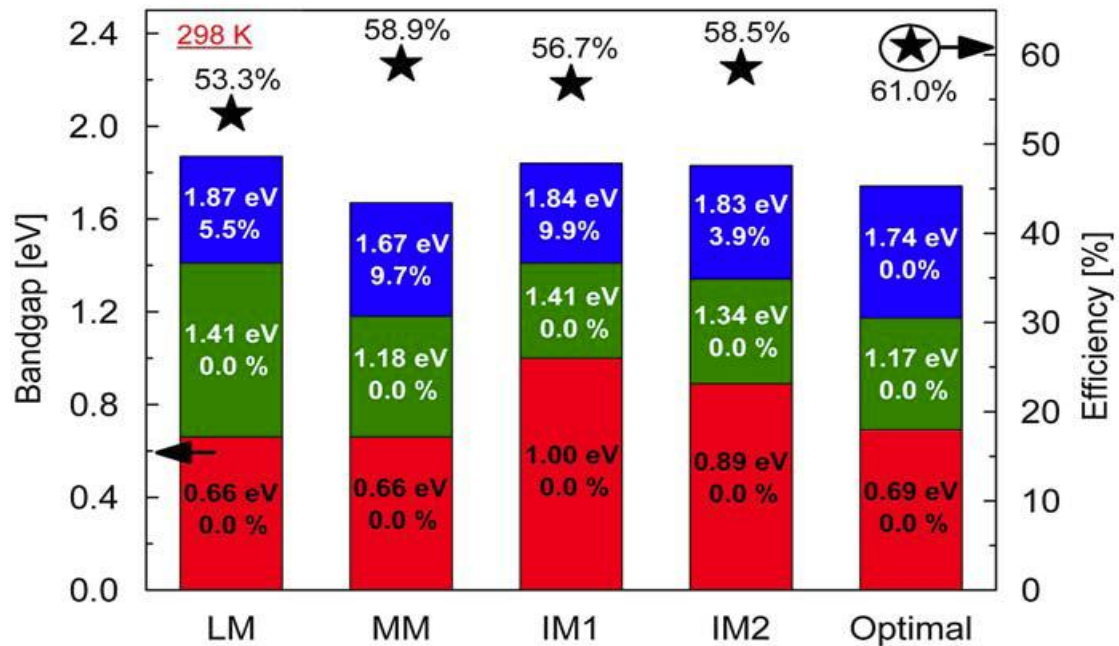
Η συγκέντρωση θα είναι 500 suns, μέγεθος το οποίο αντιπροσωπεύει ένα λογικό σχεδιαστικό μέσο όρο για τα σημερινά συστήματα.

Αποτελέσματα: Και οι τέσσερις ηλιακές κυψέλες που είχαν εξετασθεί κάτω από το φάσμα AM 1.5d είχαν φτάσει αποδόσεις πάνω από 40% . Τα ενεργειακά διάκενα εξαρτώνται από την θερμοκρασία δωματίου και αλλάζουν με την μεταβολή αυτής. Οι κυψέλες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- _ LM: $\text{Ga}_{0.50} \text{In}_{0.50} \text{P} / \text{Ga}_{0.99} \text{In}_{0.01} \text{As} / \text{Ge}$ (1.87, 1.41 και 0.66eV)
- _ MM: $\text{Ga}_{0.35} \text{In}_{0.65} \text{P} / \text{Ga}_{0.83} \text{In}_{0.17} \text{As} / \text{Ge}$ (1.67, 1.18 και 0.66eV)
- _ IM1: $\text{Ga}_{0.5} \text{In}_{0.5} \text{P} / \text{GaAs} / \text{In}_{0.27} \text{Ga}_{0.73} \text{As}$ (1.84, 1.41 και 1.00eV)

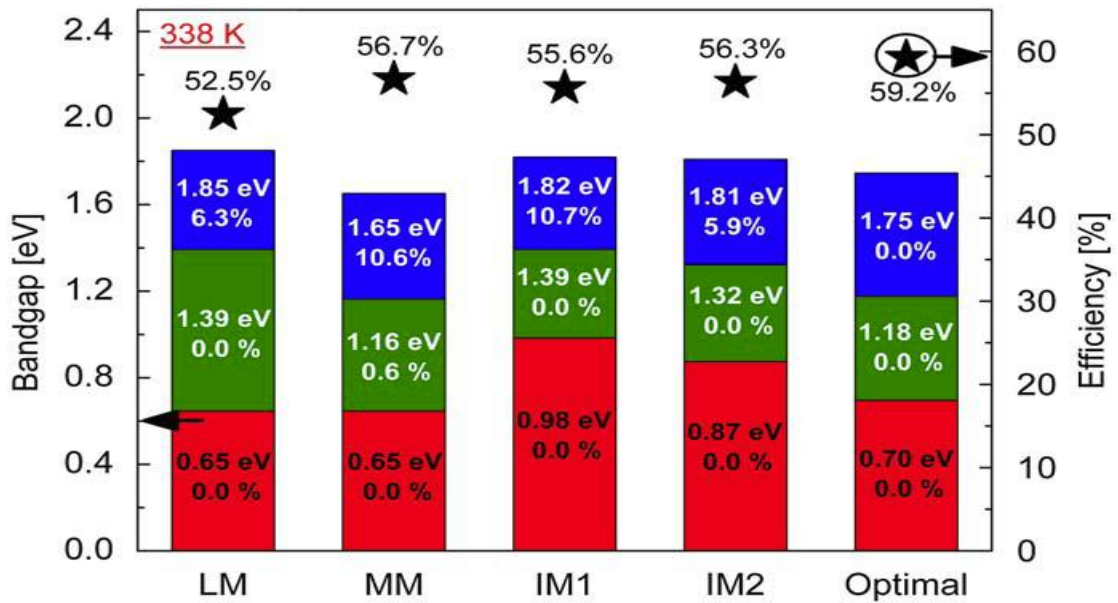
_ IM2: Ga_{0.51} In_{0.49} P / In_{0.04} Ga_{0.96} As / In_{0.37} Ga_{0.63} As (1.83, 1.34 και 0.89 eV)

- Πρώτα οι μετρήσεις έγιναν κάτω από τις αναφορικές συνθήκες : φάσμα AM1.5d στους 500 ήλιους και στους 298K. Επίσης μετρήθηκε και η κυψέλη με τον βέλτιστο συνδυασμό διακένων τριπλής στρώσης (1.74 / 1.17/ 0.69 eV) , η οποία έφτασε απόδοση 61% υπό αυτές τις συνθήκες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



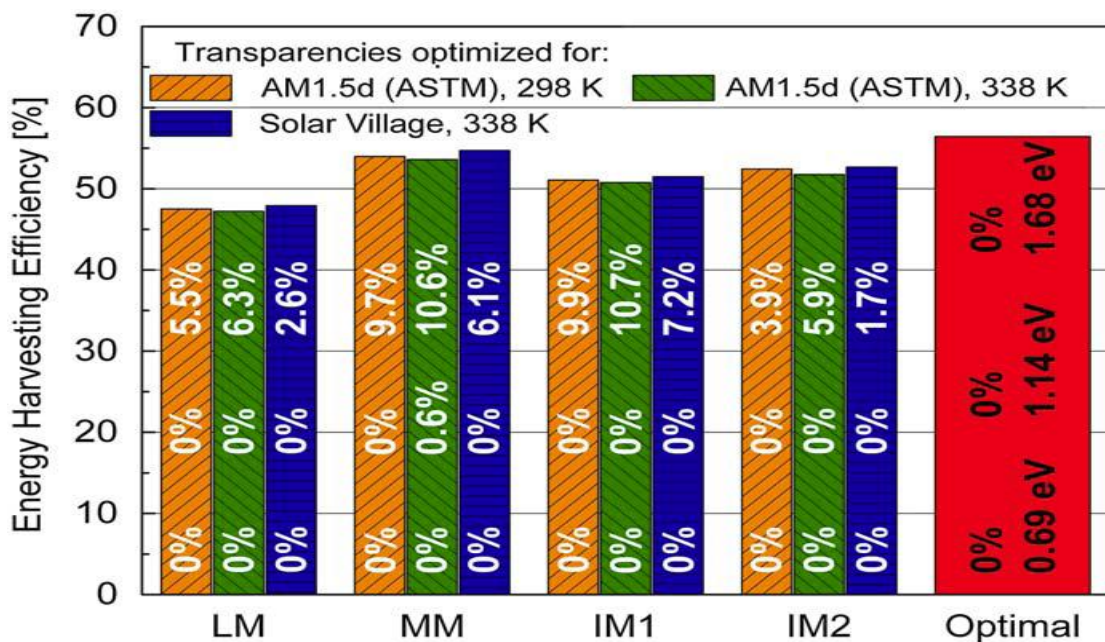
Διάγραμμα 5.1.2: Αποδόσεις – Ενεργειακά διάκενα TJSC (αναφορικές συνθήκες)

- Σε πραγματικές εγκαταστάσεις συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών οι ηλιακές κυψέλες λειτουργούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από 298K. Για τον λόγο αυτό, οι επόμενες μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία 338K. Έτσι, παρατηρείται μία μικρή μείωση στα ενεργειακά διάκενα και στην απόδοση λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα.

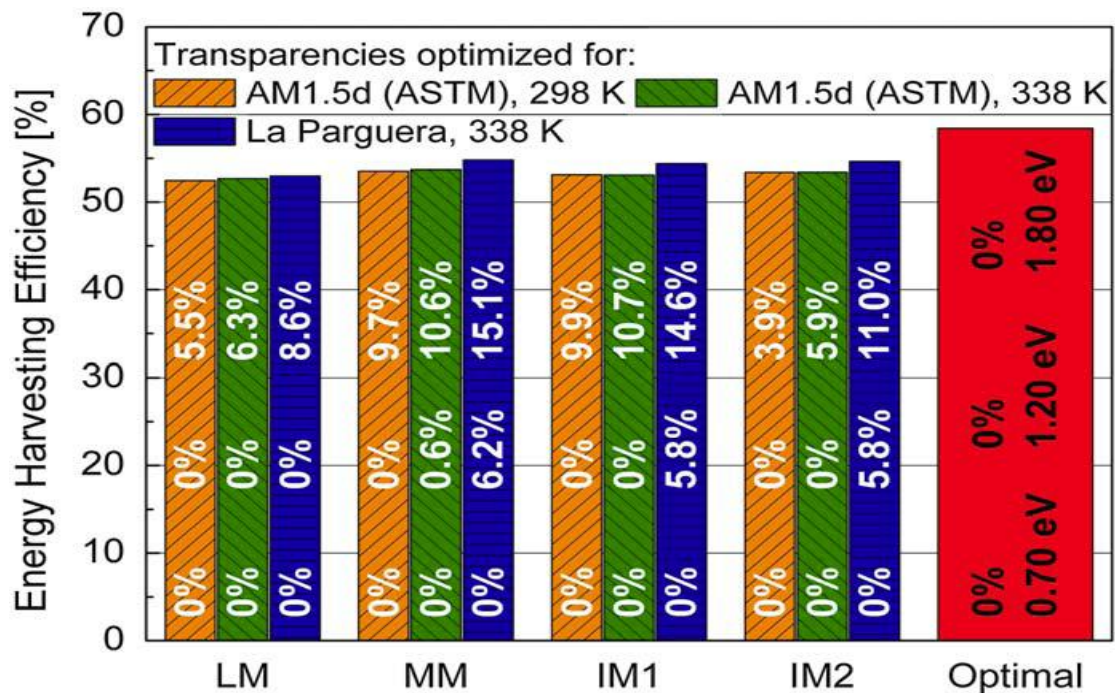


Διάγραμμα 5.1.3: Αποδόσεις – Ενεργειακά διάκενα TJSC (πραγματικές συνθήκες)

- Τέλος, έγιναν μετρήσεις στις δύο παραπάνω περιοχές με τις διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες στους 338K και στις τέσσερις κυψέλες, αλλά παρουσιάζεται και ο βέλτιστος συνδυασμός διακένων και για τις δύο περιοχές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα δύο παρακάτω γραφήματα. Σε αυτά εμφανίζεται το μέγεθος της απόδοσης συγκομιδής ενέργειας που αντιπροσωπεύει την αναλογία της παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια της ακτινοβολίας.



Διάγραμμα 5.1.4: Αποδόσεις των TJSC στο SolarVillage



Διάγραμμα 5.1.5: Αποδόσεις των TJSC στη La Parguera

Από τις παραπάνω μετρήσεις γίνεται κατανοητό ότι για την ορθή επιλογή του συνδυασμού ενεργειακών διακένων ηλιακής κυψέλης τριπλής στρώσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, οι φασματικές συνθήκες κάθε περιοχής αλλά και η θερμοκρασία, στην οποία θα εκτίθεται η ηλιακή κυψέλη.

B) Πρόταση για μία υψηλής τάσης ηλιακή κυψέλη τριπλής στρώσης AlGaAs/AlGaAs/GaAs [26]

Το άρθρο παρουσιάζει μία εναλλακτική πρόταση για την κατασκευή ηλιακής κυψέλης τριπλής στρώσης για εφαρμογές συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Η κυψέλη αυτή θα είναι υψηλής τάσης και της μορφής: $1.87\text{eV Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ / $1.65\text{eV Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ / 1.42eV GaAs . Η έρευνα αυτή γίνεται με γνώμονα την εξάλειψη της ανάγκης για ακριβά υλικά, όπως το Ίνδιο, το Γερμάνιο και το Φώσφορο αλλά και την μείωση των απωλειών I^2R της κυψέλης.

Η κυψέλη αυτή, χρησιμοποιώντας σαν επάνω στρώση (top subcell) 1.87eV AlGaAs και σαν μεσαία στρώση (middle subcell) κατάλληλα λεπτή, 1.65eV AlGaAs , μπορεί να εκμεταλλεύεται το φάσμα όπως οι κυψέλες μονής (1.42eV GaAs) και διπλής (1.88eV GaInP / 1.42eV GaAs) στρώσης που κατέχουν το παγκόσμιο ρεκόρ ενεργειακής απόδοσης (26.1%, 30.3% AM1.5G στους 298K και 1 sun αντίστοιχα). Επιπρόσθετα όμως, μπορεί να διαχωρίζει μία ποσότητα

φωτονίων με ενέργεια από 1.87 έως 1.47 eV , έτσι ώστε μερικά να απορροφούνται από την μεσαία στρώση και τα υπόλοιπα από την κάτω στρώση (1.42 eV GaAs bottom subcell).

Οι μετρήσεις για την προτεινόμενη κυψέλη έδειξαν ότι στους 288K και 1sun έχει τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc}) 3,74V (ενώ συνήθως η τιμή αυτή είναι περίπου 2,49V) και πυκνότητα ρεύματος βραχυκύκλωσης (J_{sc}) 9,3 mA cm⁻² (από 14 mA cm⁻² συνήθως). Συνεπώς, η πυκνότητα ισχύος ($V_{oc} \times J_{sc}$) παραμένει περίπου σταθερή σε σχέση με τις μετρήσεις κυψελών διπλής και τριπλής στρώσης υψηλών αποδόσεων. Επιπρόσθετα, εκτός από την διατήρηση των υψηλών αποδόσεων , μεγάλο πλεονέκτημα της προτεινόμενης κυψέλης είναι και η σημαντική μείωση στις απώλειες ισχύος της αντίστασης ($P_{loss} = I^2 R$), όπου οι μετρήσεις έδειξαν ότι υπάρχει μείωση περίπου 2,25 φορές από τις συνήθεις κυψέλες. Η μείωση αυτή είναι μεγάλης σημασίας, γιατί πολλές ηλιακές κυψέλες μαζί θα πρέπει να ενώνονται με ηλεκτρικά καλώδια για την δημιουργία ισχύος. Τέλος, εξαλείφοντας το Γερμάνιο από την κάτω στρώση της κυψέλης , μειώνεται και η επιπλέον σπατάλη ρεύματος και θερμότητας. Όμως το AlGaAs με κλάσμα Al > 20% υποφέρει από ένα ελάττωμα της πρόσμειξης των υλικών (γνωστό ως DX center) που συμπεριφέρεται σαν `παγίδα ηλεκτρονίων`. Για τον λόγο αυτό πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση στην σύνθεση , το πάχος και την πρόσμειξη των υλικών των στρώσεων της ηλιακής κυψέλης.

Για βοήθεια στον σχεδιασμό της προτεινόμενης ηλιακής κυψέλης έγινε προσομοίωση με το εργαλείο λογισμικού ADEPT/F. Ένα αναλυτικό σχέδιο της κυψέλης φαίνεται στην διπλανή εικόνα.

graded	30 nm n+ Al _{0.86} Ga _{0.14} As (2 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) window	1.87 eV Top Cell
	30 nm n Al _{0.36} Ga _{0.64} As (4 × 10 ¹⁷ cm ⁻³) emitter	
	400 nm p Al _{0.36} Ga _{0.64} As (1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³) base	
	30 nm p+ Al _{0.42} Ga _{0.58} As (1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) BSF	
	10 nm p++ Al _{0.18} Ga _{0.82} As (8 × 10 ¹⁹ cm ⁻³) TJ	
	20 nm n++ Al _{0.18} Ga _{0.82} As (6 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) TJ	
graded	30 nm n+ Al _{0.24} Ga _{0.76} As (1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) window	1.65 eV Middle Cell
	90 nm n Al _{0.18} Ga _{0.82} As (4 × 10 ¹⁷ cm ⁻³) emitter	
	1000 nm p Al _{0.18} Ga _{0.82} As (1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³) base	
	30 nm p+ Al _{0.24} Ga _{0.76} As (1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) BSF	
	10 nm p++ GaAs (8 × 10 ¹⁹ cm ⁻³) TJ	
	20 nm n++ GaAs (6 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) TJ	
graded	30 nm n+ Al _{0.06} Ga _{0.94} As (2 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) window	1.42 eV Bottom Cell
	100 nm n+ GaAs (2 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) emitter	
	2000 nm p GaAs (1 × 10 ¹⁷ cm ⁻³) base	
	100 nm p+ Al _{0.06} Ga _{0.94} As (2 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) BSF	
	500 nm p+ GaAs (6 × 10 ¹⁸ cm ⁻³) buffer	
	p+ GaAs wafer	

Σχήμα 5.1.1: Η προτεινόμενη ηλιακή κυψέλη

Γ) Η ανάπτυξη του συγκεντρωτικού III-V φωτοβολταϊκού συστήματος στο ινστιτούτο έρευνας πυρηνικής ενέργειας (INER) της Ταϊβάν [27]

Η εξέλιξη της τεχνολογίας του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος στο INER χωρίζεται στα εξής στάδια :

α) Πειραματικές μετρήσεις ηλιακών κυψελών μονής και διπλής στρώσης.

β) Πειραματικές μετρήσεις ηλιακών κυψελών (τριπλής στρώσης) , δεκτών (receiver) , ανιχνευτών (tracker) και δημιουργία του πρώτου υψηλά συγκεντρωτικού συστήματος (HCPV) 150W το 2004.

γ) Εγκατάσταση συστήματος HCPV 1,2kW στο τέλος του 2005, χρησιμοποιώντας κυψέλες τριπλής στρώσης (InGaP/GaAs/Ge) ενεργής περιοχής $0,26\text{cm}^2$ και φακούς Fresnel με συνολική απόδοση 22,3%.



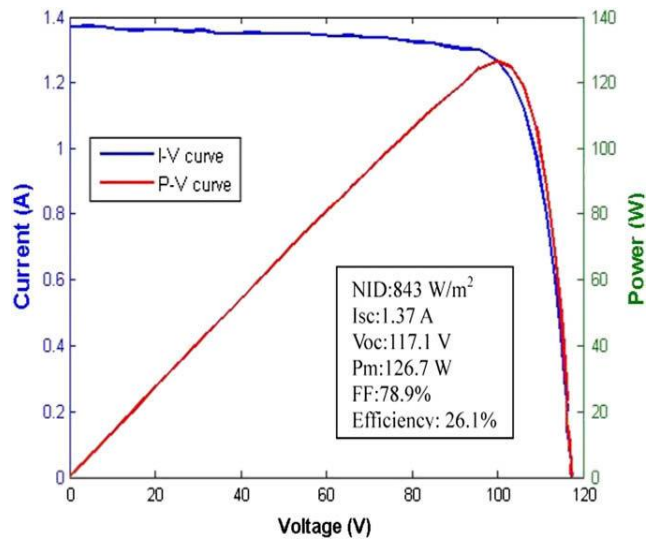
Εικόνα 5.1.1: 1.2 kW HCPV system at INER



5 kW HCPV system (1st generation) at INER

δ) Εγκατάσταση συστήματος HCPV 5kW πρώτης γενιάς στο τέλος του 2006 με συγκέντρωση 545suns. Στο σύστημα χρησιμοποιήθηκαν 48 πλαίσια με 56 κυψέλες η κάθε μία αλλά και ηλιακοί ανιχνευτές διπλού άξονα (two-axis solar tracker) με ακρίβεια 0,5 μοίρες. Ο σκελετός του ανιχνευτή έχει μπορεί να αντέξει έως και 20 m/sec ταχύτητα ανέμου και έχει ύψος 8 μέτρα.

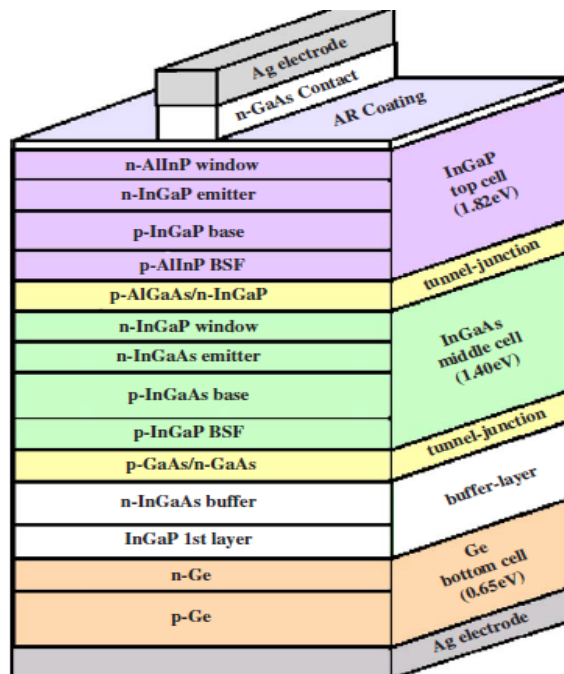
ε) Δημιουργία συστήματος HCPV 100kW , το οποίο αποτελείται από 14 συστήματα δεύτερης γενιάς 5kW και 21 συστήματα 1,5kW από 40 και 12 πλαίσια αντίστοιχα στο τέλος του 2008. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 40 ηλιακές κυψέλες και παράγει τουλάχιστον 120W σε ακτινοβολία 476suns. Η απόδοση είναι 26,1% (με τις κυψέλες της Spectrolab απόδοσης 35%) και το διάγραμμα ρεύματος-τάσης του κάθε πλαισίου με τις κυψέλες της Spectrolab παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5.1.2: 5 kW HCPV system (2nd generation) at INER. Διάγραμμα 5.1.6: I-V & P-V curves of a single module

Δ) Αξιολόγηση μίας τριπλής στρώσης ηλιακής κυψέλης (*InGaP/InGaAs/Ge*) και βελτιστοποίηση της δομής της με βάση την αντίσταση σειράς για μεγάλης απόδοσης συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα. [28]

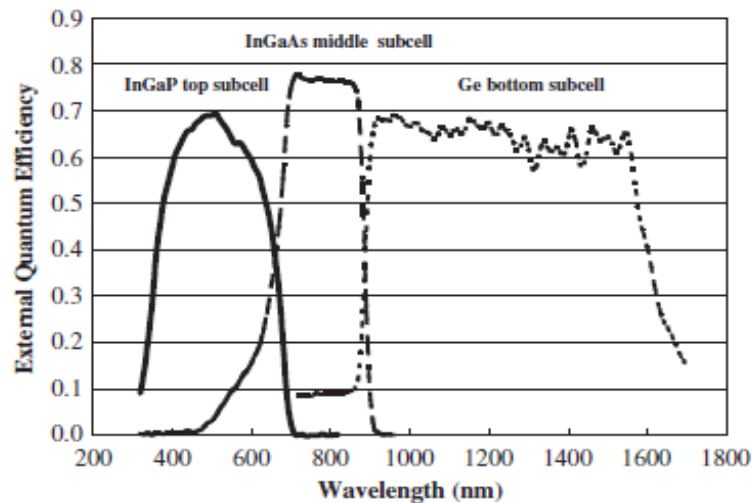
Προετοιμασία πειράματος: Η στρώση κορυφής ($In_{0.49}Ga_{0.51}P$ top subcell), η μεσαία στρώση ($In_{0.01}Ga_{0.99}As$ middle) και η κάτω στρώση (Ge bottom subcell) είναι πλεγματικά ενωμένες (lattice matched). Το σχεδιάγραμμα της κυψέλης παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.1.2: Schematic of an *InGaP/InGaAs/Ge* triple-junction solar cell.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κβαντική απόδοση της ηλιακής κυψέλης, όπου και παρατηρείται η ικανότητά της να απορροφά

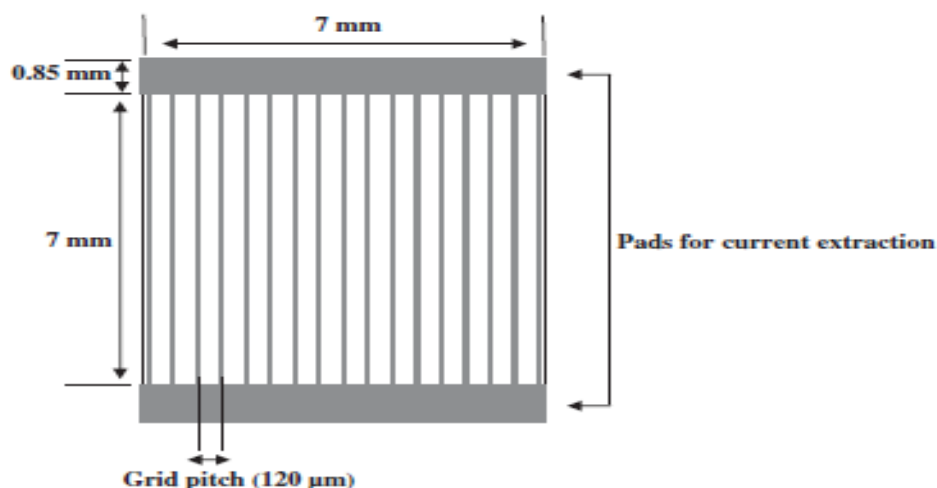
ακτινοβολία μεγάλου μήκος κύματος και να την μετατρέπει σε ηλεκτρισμό.



Διάγραμμα 5.1.7:

External quantum efficiency of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell.

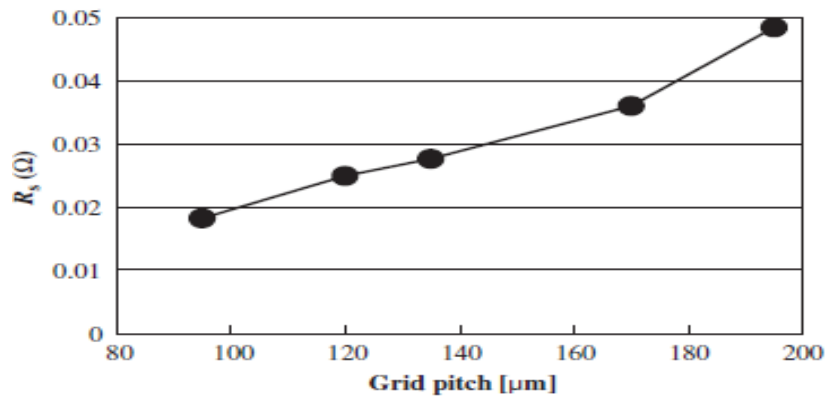
Η ηλιακή κυψέλη δημιουργήθηκε συνδέοντας τις τρεις στρώσεις σε σειρά, οπότε η τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc}) είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των τριών στρώσεων, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) είναι ίσο με το μικρότερο ρεύμα των επιστρώσεων. Τέλος, το ηλεκτρόδιο της κυψέλης αποτελούταν από Ag πάχους $5\mu m$, ενώ το πλάτος και το βήμα του δικτύου ήταν 7 και $120\mu m$ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1.3: Electrode design for a concentrator cell.

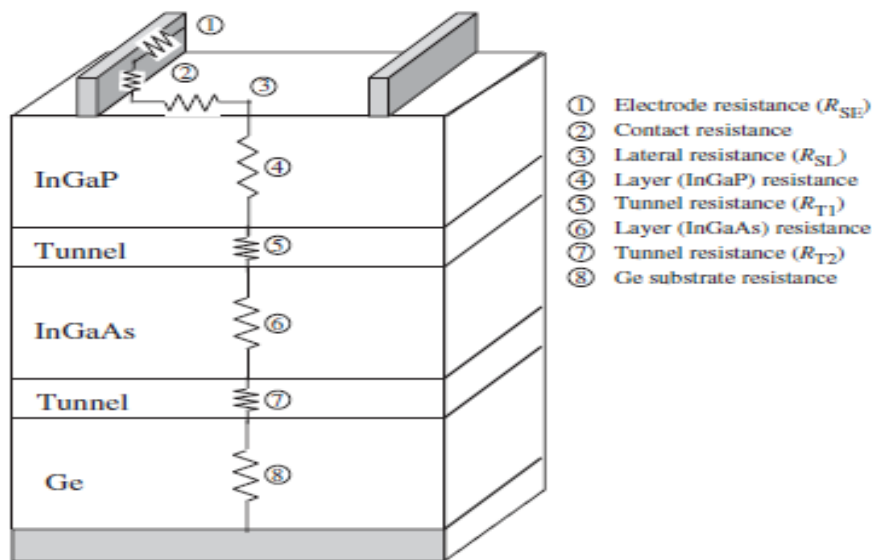
Αποτελέσματα: Η αντίσταση σειράς (R_s) της ηλιακής κυψέλης μετρήθηκε $0,025\Omega$. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν διάφορες κυψέλες με διαφορετικά βήματα δικτύου (grid pitch) και παρατηρήθηκε ότι με την

μείωση του βήματος μειώνεται και η αντίσταση R_s (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα).



Διάγραμμα 5.1.8: Grid pitch - R_s

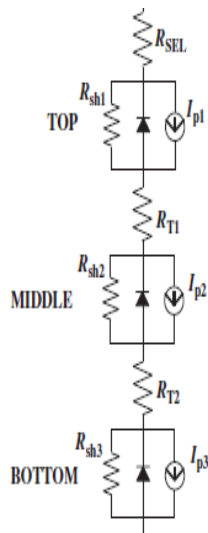
Η αντίσταση R_s αποτελείται από διάφορες άλλες αντιστάσεις, οι οποίες φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Οι πιο σημαντικές αντιστάσεις από αυτές είναι η αντίσταση ηλεκτροδίου (R_{SE}), οι αντιστάσεις ενώσεων των στρώσεων (R_{T1} και R_{T2}) και οι πλευρικές αντιστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων (R_{SL}). Έτσι, μετρήθηκαν οι συγκεκριμένες αντιστάσεις και τα αποτελέσματα είναι τα εξής : $R_{SE} = 0.0134\Omega$, $R_{SL} = 0.0102\Omega$, $R_{T1} = 0.0012\Omega$ και $R_{T2} = 0.0008\Omega$. Παρατηρούμε ότι το συνολικό άθροισμα αυτών των αντιστάσεων ($0,0256\Omega$ για βήμα $120\mu\text{m}$) συμπίπτει σχεδόν με την μέτρηση της συνολικής αντίστασης R_s .



Σχήμα 5.1.4: Various components of series resistance.

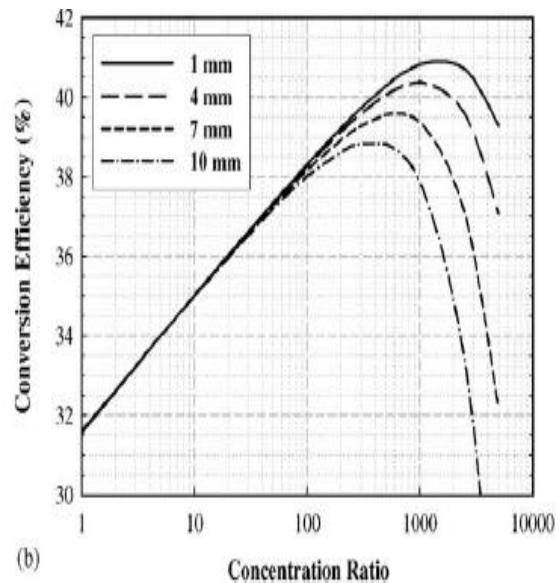
Τέλος, για την μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω της αντίστασης R_s είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται μικρές ηλιακές κυψέλες με μικρό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έτσι, τα χαρακτηριστικά του ισοδύναμου κυκλώματος κυψελών διαφόρων διαστάσεων υπολογίσθηκαν

με τη βοήθεια του προγράμματος SPICE. Παρατηρήθηκε ότι απόδοση 40% στους 500suns μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ηλιακή κυψέλη μεγέθους 4mm x 4mm. Στα παρακάτω δύο διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών (απόδοση και συντελεστής πλήρωσης) αλλά και η σχηματική διάταξη του ισοδύναμου κυκλώματος ηλιακής κυψέλης τριπλής στρώσης:



Schematic of an equivalent circuit model for a triple-junction solar cell.

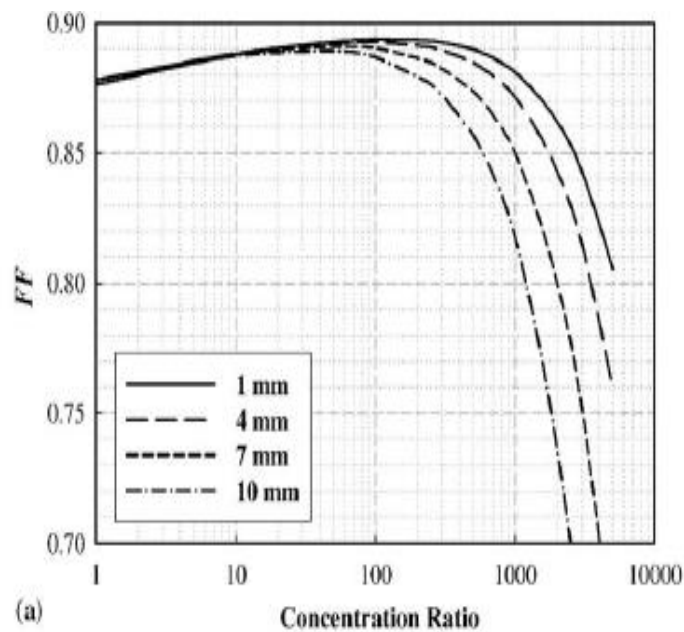
Σχήμα 5.1.5: Ισοδύναμο ηλ. κύκλωμα TJSC



(b)

Concentration Ratio

Διάγραμμα 5.1.9: Απόδοση – Βαθμός Συγκέντρωσης



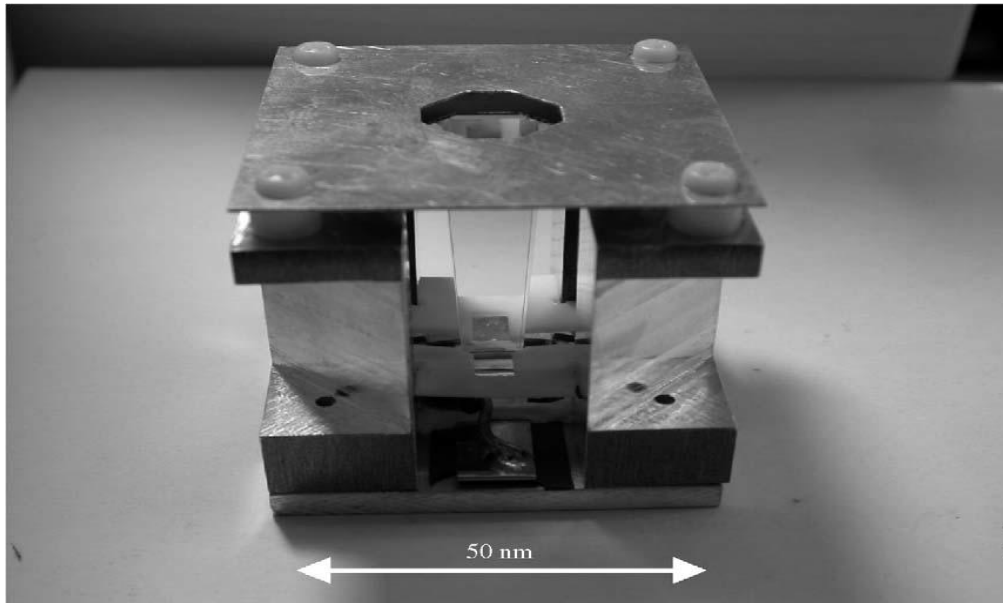
(a)

Concentration Ratio

Διάγραμμα 5.1.10: Συντελεστής Πλήρωσης – Βαθμός Συγκέντρωσης

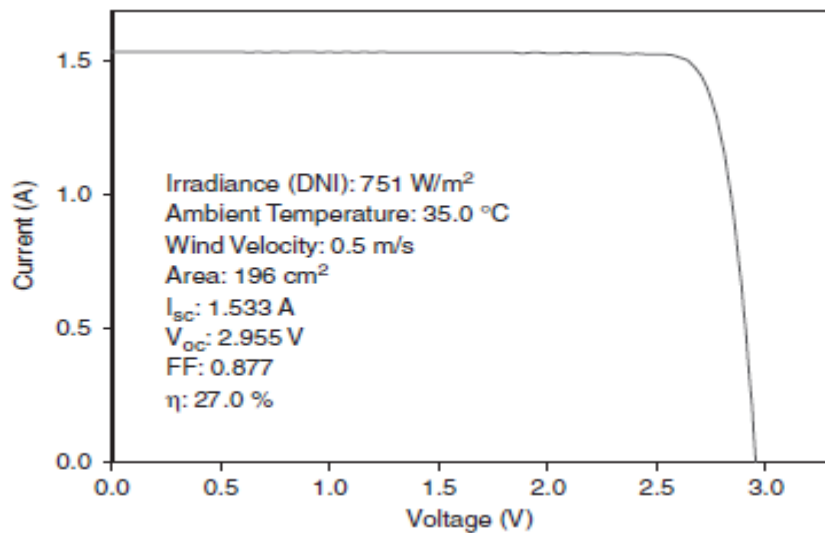
Ε) *Τυποποίηση III-V ηλιακών κυψελών για πρακτικές επίγειες εφαρμογές με απόδοση συστήματος 27% [29]*

Η πρόταση αυτού του paper είναι η δημιουργία ενός έτοιμου πλαισίου που θα περιέχει μέσα του τις απαραίτητες τεχνολογίες για να λειτουργεί σαν συγκεντρωτικός δέκτης. Ο συγκεντρωτικός δέκτης περιέχει μία ηλιακή κυψέλη τριπλής στρώσης (InGaP/InGaAs/Ge) διαστάσεων 7mm x 7mm και με απόδοση 37,4% στους 200suns AM1.5G.



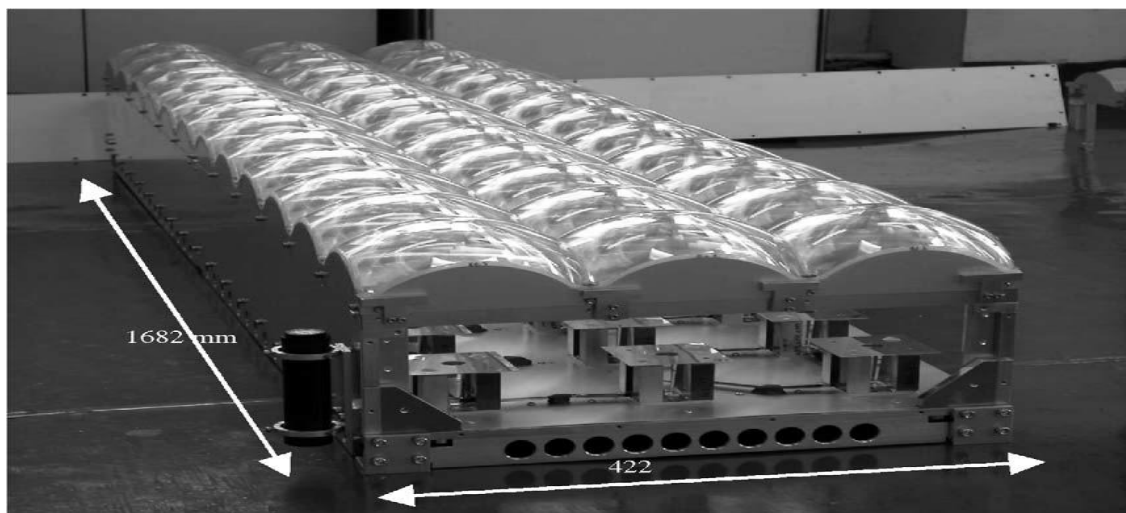
Εικόνα 5.1.3: Newly developed concentrator receiver with low heat resistance, allowing 72mm assemble tolerance

Φύλλο χαλκού είναι κολλημένο και στις δύο πλευρές της ηλιακής κυψέλης και δημιουργεί μόνο 2mΩ αντίσταση R_s , επιτρέποντας να περνάει ρεύμα πάνω από 15A χωρίς σημαντικές απώλειες. Η κυψέλη είναι ολόκληρη καλυμμένη από ένα διαφανές πολυμερές πακέτο, έτσι ώστε να διασφαλίζεται μεγαλύτερη αξιοπιστία κάτω από σκληρές εξωτερικές συνθήκες με μεγάλη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα, ο σχεδιασμός του δέκτη περιλαμβάνει έναν ομογενοποιητή (homogenizer) , έναν πλαστικοποιημένο χειριστή θερμότητας και μία χαμηλής αντίστασης σύνδεση και μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορα συγκεντρωτικά οπτικά μέσα. Έχει την ικανότητα να εφαρμοσθεί ακόμα και σε μεγάλα συστήματα παραβολικών πιάτων, με διάφορες τροποποιήσεις από τον ομογενοποιητή. Η μέγιστη απόδοση του δέκτη έφτασε το 35,6%, ενώ η απόδοση σε εξωτερικό χώρο με συνδυασμό πλαστικών φακών Fresnel (84,1% οπτική απόδοση) έφτασε το 27% σε θερμοκρασία 35°C, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5.1.11: Outdoor evaluation of the I-V characteristic with a plastic Fresnel lens (including loss in concentrator optics and temperature rise).

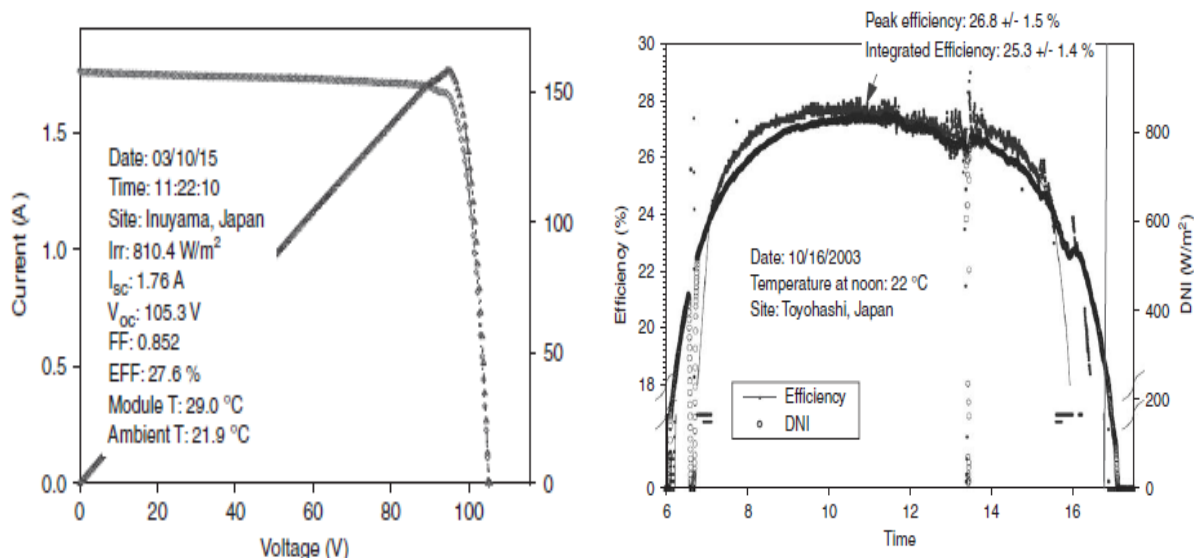
Για την διεξαγωγή των μετρήσεων δημιουργήθηκε μία κατασκευή (παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα) εμβαδού 7056 cm^2 και ισχύος 200 Wp , χρησιμοποιώντας το πακέτο-δέκτη. 36 τέτοιοι δέκτες τοποθετήθηκαν σε μία θήκη από αλουμίνιο και συνδέθηκαν σε σειρά. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε και ένας φακός Fresnel με οπτική απόδοση $85,3\%$ για την συγκέντρωση της ακτινοβολίας.



Εικόνα 5.1.4: Inside view of the 27% efficient concentrator module with the newly developed concentrator receiver. The packing density of the lens is as large as 99.4%. The length scale is out-to-out, including wall thickness

Αποτελέσματα: Οι μετρήσεις έγιναν σε δύο διαφορετικά μέρη της Ιαπωνίας. Και στα δύο μέρη μετρήθηκε απόδοση $26,8\%$ ($\pm 1,5\%$ λόγω του σφάλματος των μετρήσεων). Στο πρώτο σχήμα φαίνεται το τυπικό διάγραμμα I-V, ενώ στο δεύτερο σχήμα φαίνεται η σχέση της ημερήσιας

τάσης της απόδοσης μετατροπής και της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας (direct normal irradiance DNI). Η μέση απόδοση μετατροπής μετρήθηκε 25,3%.

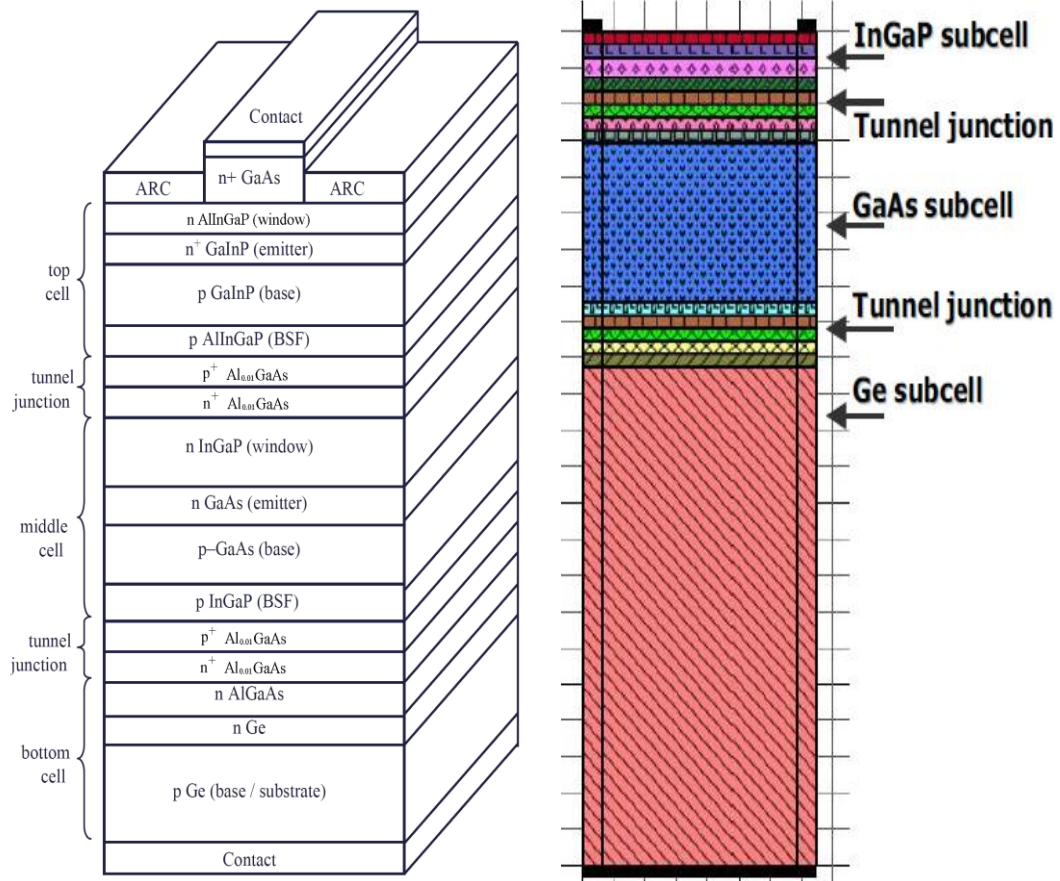


Διάγραμμα 5.1.12: Typical outdoor I-V curve of the new module Power generation over the course of the day—clear sky day

ΣΤ) Μοντελοποίηση ηλιακών κυψελών πολλαπλών στρώσεων από το πρόγραμμα προσομοίωσης APSYS της Crosslight. [30]

Σε αυτό το paper γίνεται προσομοίωση συσκευών ηλιακών κυψελών τριπλής στρώσης (GaInP/GaAs/Ge) από το πρόγραμμα APSYS.

Δομή της συσκευής: Η κυψέλη αποτελείται από τρεις στρώσεις, οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε σειρά και μία αντιανακλαστική επίστρωση έχει τοποθετηθεί στην κορυφή της. Δύο ενδιάμεσες στρώσεις (tunnel junctions) έχουν τοποθετηθεί ανάμεσα από κάθε ζευγάρι των τριών επιστρώσεων. Παρόλο που συνήθως χρησιμοποιείται λεπτή δίοδος p^+/n^+ GaAs σαν ενδιάμεση στρώση, εδώ αντικαθίσταται από στρώση $Al_{0.01}GaAs$ p^+/n^+ . Η δομή αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.1.6: Δομή TJSC

Ο προσομοιωτής δημιουργεί ένα δισδιάστατο σχήμα για την υπό έρευνα ηλιακή κυψέλη, όπως παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα. Επιπλέον, το πάχος και η πυκνότητα του υλικού πρόσμειξης κάθε ενότητας φαίνεται στον επόμενο πίνακα.

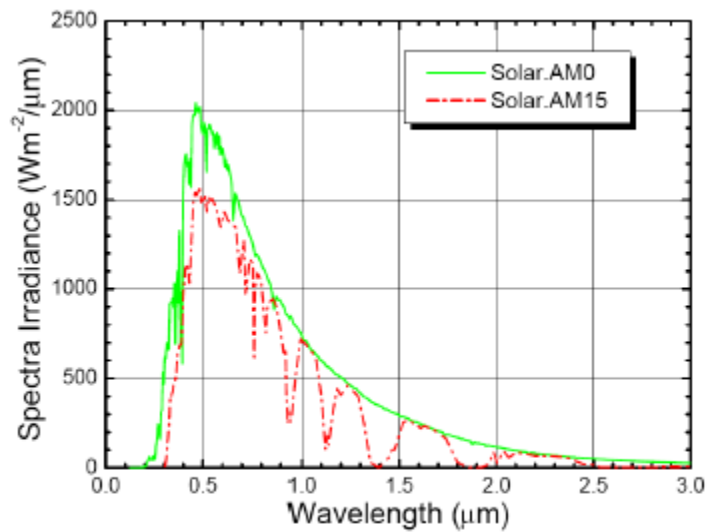
Layer order	Layer name	Thickness	Density	Layer order	Layer name	Thickness	Density
1	p Ge (base/Sub)	11	1	9	n InGaP (window)	0.1	100
2	n Ge	0.1	20	10	n ⁺ Al _{0.01} GaAs	0.01	200
3	n AlGaAs	0.05	70	11	p ⁺ Al _{0.01} GaAs	0.01	500
4	n ⁺ Al _{0.01} GaAs	0.01	200	12	p AlInGaP (BSF)	0.05	20
5	p ⁺ Al _{0.01} GaAs	0.01	500	13	p GaInP (base)	0.45	1.5
6	p InGaP (BSF)	0.07	20	14	n ⁺ GaInP (emitter)	0.1	20
7	p GaAs (base)	3.5	1	15	n AlInGaP (window)	0.02	19.5
8	n GaAs (emitter)	0.1	20				

Πίνακας 5.1.1

Thickness and dopant density for the epitaxy layers used for the simulation. Thickness is in μm , and dopant density is in 10^{17} cm^{-3} .

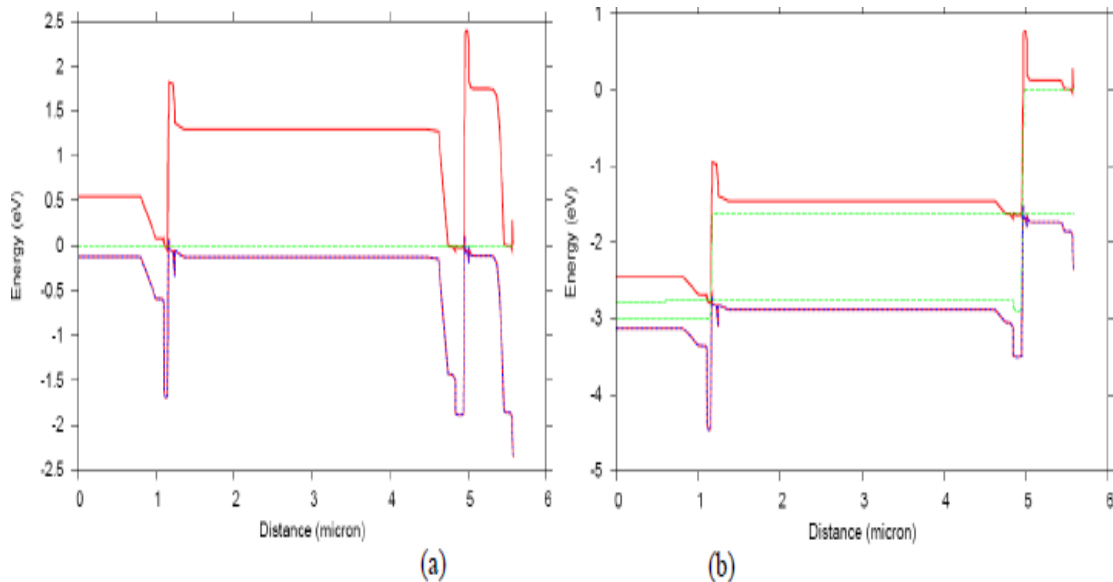
Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί δύο ηλιακά φάσματα για ακτινοβολία, δηλαδή το AM0 (διαστημικές εφαρμογές) και το AM15 (επίγειες εφαρμογές), τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

Διάγραμμα 5.1.13



Solar spectra at air mass zero (AM0) condition and air mass 1.5 conditions (AM15).

Αποτελέσματα: Πρώτα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ενεργειακών διακένων (χωρίς ακτινοβολία και στα 3V αντίστοιχα), όπου είναι φανερό πως το ενεργειακό διάκενο ποικίλει καθώς πηγαίνουμε από την στρώση κορυφής (top subcell) στην τελευταία στρώση (bottom subcell). Αξιοσημείωτη είναι και η απότομη μεταβολή ενέργειας στις ενδιάμεσες στρώσεις (tunnel junctions).

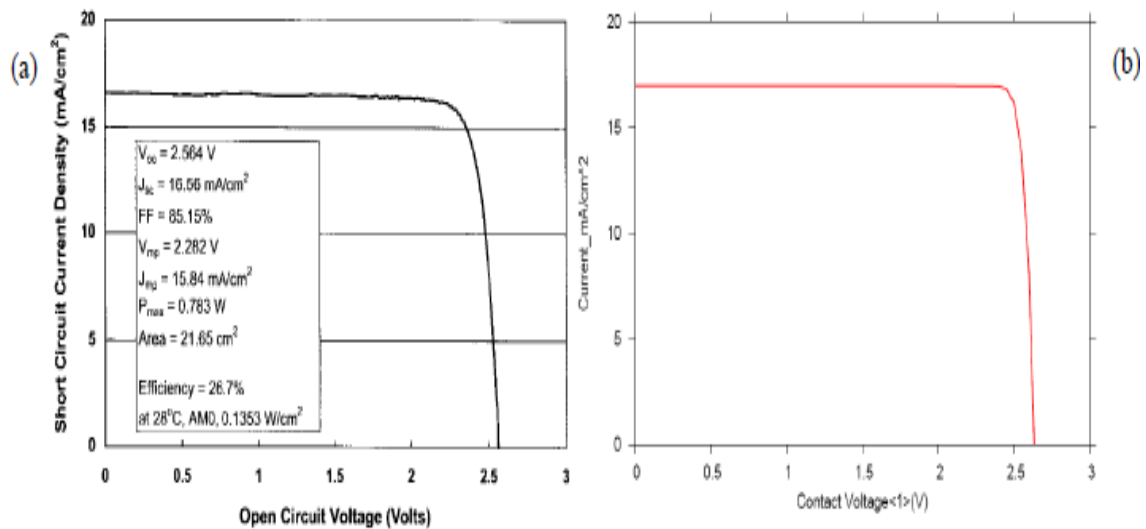


Διάγραμμα 5.1.14:

Band diagrams of the Ge/GaAs/InGaP TJ solar cell structure in equilibrium without solar irradiation (a), and at 3 volts with solar irradiation (b). The distance origin starts from the back contact at the bottom, immediately above which the Ge subcell resides. Only part of the Ge base layer is shown.

Στη συνέχεια, συγκρίνονται κάποιες συνήθεις εργαστηριακές μετρήσεις με αυτές του προσομοιωτή σε σχέση με την πυκνότητα του

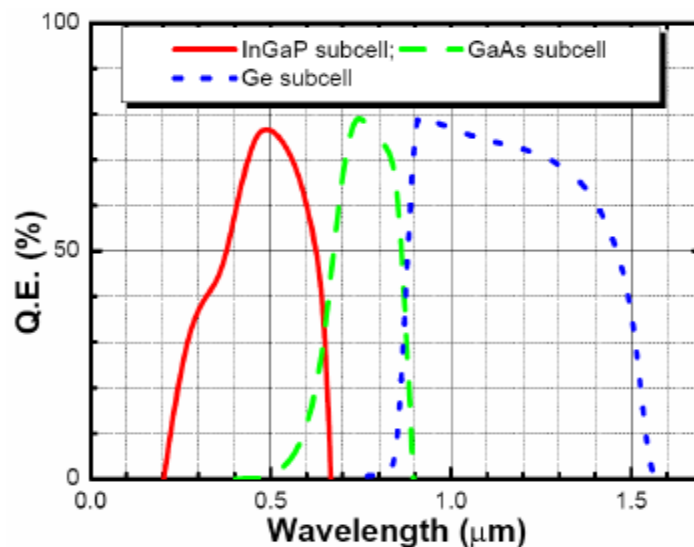
ρεύματος βραχυκύκλωσης και την τάση. Οι δύο μετρήσεις βρίσκονται σχεδόν σε απόλυτη συμφωνία και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.1.15: IV characteristics. (a) Experimental and (b) simulation result for the Ga/GaAs/ InGaAs TJ solar cell from Crosslight APSYS.

Τέλος, η απόδοση απορρόφησης ενέργειας (quantum efficiency Q.E.) είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για την ηλιακή κυψέλη. Τα αποτελέσματα του προσομοιωτή φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Είναι προφανές ότι για κάθε στρώση υπάρχει κάποιο μήκος κύματος, πέρα από το οποίο κανένα φωτόνιο δεν μπορεί να απορροφηθεί και έτσι η απόδοση είναι μηδέν, αλλά υπάρχει και κάποιο μήκος κύματος στο οποίο κάθε στρώση παρουσιάζει μέγιστη απόδοση.

Διάγραμμα 5.1.16 :



Simulated quantum efficiency for the Ge/GaAs/InGaP TJ solar cell device investigated.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν γίνει πολλές έρευνες για την βελτίωση της απόδοσης απορρόφησης ενέργειας (Q. E.). Έχει παρατηρηθεί ότι τοποθετώντας 1,5% Ίνδιο για το σχηματισμό της μεσαίας στρώσης ($\text{In}_{0.015}\text{GaAs}$) αντί για GaAs, επιτυγχάνεται καλύτερη πλεγματική ένωση (lattice match) στην τελευταία στρώση (bottom subcell Ge), με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης αυτής. Ένας άλλος τρόπος για την βελτίωση της απόδοσης, είναι η χρήση περισσότερων στρώσεων (multi-junction), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της ακτινοβολίας του ηλιακού φάσματος.

5.2 Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά

A) Υψηλών αποδόσεων συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν III-V ηλιακές κυψέλες. [20]

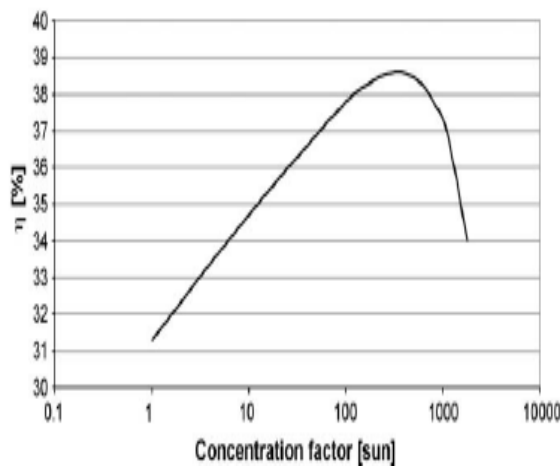
Όπως έχει προαναφερθεί, οι ηλιακές κυψέλες πολλαπλών στρώσεων δεν έχουν νόημα χωρίς την τεχνολογία των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Στα συστήματα υψηλής συγκέντρωσης (HCPV) χρησιμοποιούνται καθρέφτες (mirrors) και φακοί (lenses) για να συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία εκατοντάδες φορές πάνω σε ηλιακές κυψέλες υψηλής απόδοσης. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν παράγοντα συγκέντρωσης (concentrator factor) μεταξύ 400 και 700 ήλιων (suns), ενώ μερικά έχουν φτάσει και του 1000 ήλιους. Το ρεκόρ είναι 2000 ήλιοι και ανήκει στην εταιρεία Sunrgi στην Καλιφόρνια. Η κύρια ιδέα της τεχνολογίας αυτής είναι η μείωση της τιμής, μέσω της μείωσης των υλικών που χρησιμοποιούνται για τις ηλιακές κυψέλες. Η πιο διαδεδομένη κυψέλη που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές άνω των 400 ήλιων είναι η III-V κυψέλη. Υπολογίζεται ότι το οικονομικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών είναι περίπου 10%. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εταιρίες που ασχολούνται με την πώληση και την εξέλιξη συστημάτων υψηλής συγκέντρωσης που χρησιμοποιούν ηλιακές κυψέλες III-V:

HCPV systems using III-V cells.

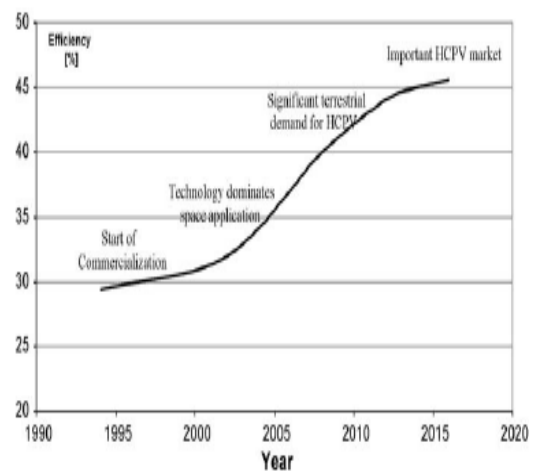
Company		Optics	x	Cell/receiver		η_m (%)	η_s (%)
Arima Eco Energy	Taiwan	Fresnel lens	476	Spectrolab	1 cm ²	22-25	-
Concentrix Solar	Germany	Fresnel lens	385	Azur	d = 2,3 mm	27	23,5
Daido Steel	Japan	Fresnel lens	550	Azur	49 mm ²	23	21
Delta Electronics	Taiwan	Fresnel lens	470	Spectrolab	1 cm ²	26	23
Emcore	USA	Fresnel lens	500	Emcore	1 cm ²	-	27
Energy Innovations	USA	Fresnel lens	1440	Emcore	1 cm ²	28,8	23-25
Enfocus Engineering	USA	Fresnel lens	>300	-	1 cm ²	>20	-
Green and Gold	Australia	Fresnel lens	1370	Emcore	1 cm ²	34	28
INER	Taiwan	Fresnel lens	476	Spectrolab	1 cm ²	23	20
Opel International	USA	Fresnel lens	500	Spectrolab	1 cm ²	26-28	-
Pyron Solar	USA	Fresnel lens	500	Spectrolab	1 cm ²	22	21
Sharp	Japan	Fresnel lens	700	Sharp	49 mm ²	-	-
SolarTec	Germany	Fresnel lens	600	ENE	4 mm ²	20	17
Sol3G	Spain	Fresnel lens	476	Azur	30 mm ²	24	22,7
Sunrgi	USA	Fresnel lens	2000	Spectrolab	1 cm ²	-	-
Isotofon	Spain	Total internal reflection lens	1000	-	1 mm ²	25	23
GreenVolts	USA	Micro-Dish	625	Spectrolab	1 cm ²	28,5	-
Solfocus	USA	Micro-Dish	500	Spectrolab	1 cm ²	25	23
Solar Systems	Australia	Dish & dense array receiver	500	Spectrolab	1536 × 1 cm ²	35	30
Cool Earth Solar	USA	Dish & dense array receiver	400	-	-	30	-
Menova Energy	Canada	Segmented reflector	1450	Emcore	116 × 1 cm ²	26,4	23,2

Πίνακας 5.2.1: Εγκατεστημένα συστήματα HCPV με χρήση III-V cells

Ηλιακές κυψέλες III-V: Το ινστιτούτο Fraunhofer ανακοίνωσε το 2009 ρεκόρ απόδοσης 41,1% σε μία κυψέλη τριπλής στρώσης (Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As/Ge) διαστάσεων 5,09 mm² με παράγοντα συγκέντρωσης 454 ήλιους. Οι εντυπωσιακές αυτές αποδόσεις υπολογίζεται ότι στα επόμενα χρόνια θα φθάσουν το 45% με την χρήση των κυψελών τετραπλής στρώσης (4-junction cells). Σήμερα υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση στην αγορά αυτών των κυψελών και υπολογίζεται ότι τα επόμενα χρόνια θα υπάρχει αύξηση αυτής της ζήτησης κατά 400%. Οι μεγαλύτερες εταιρίες που ασχολούνται με την παραγωγή τους είναι: Spectrolab, Emcore και Azur Space. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στην απόδοση και τον παράγοντα συγκέντρωσης της κυψέλης που παράγει η εταιρεία Emcore και στο διπλανό σχήμα η εκτιμώμενη εξέλιξη της απόδοσης των κυψελών αυτών με το πέρασμα των χρόνων.



Διάγραμμα 5.2.1: Relationship between the efficiency and the concentration for Emcore's CTJ cell under 25°C



Διάγραμμα 5.2.2: Efficiency improvement of III-V cells

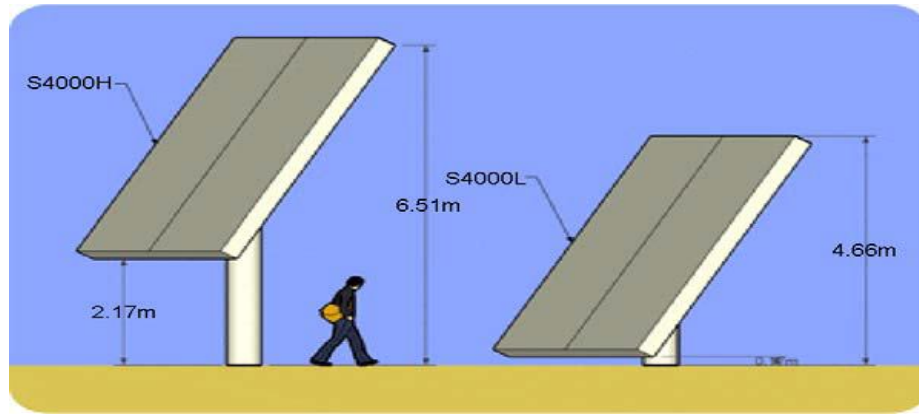
Όσον αφορά την επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση της κυψέλης, κάθε αύξηση 10°C επιφέρει μία μείωση 0,5% στην απόδοση. Η εταιρεία Spectrolab προτείνει την διατήρηση της θερμοκρασίας της κυψέλης κατά την λειτουργία κάτω από τους 100°C, γιατί έχει παρατηρηθεί ότι σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει μείωση στην διάρκεια ζωής της.

Fresnel lens: Τα πιο ευρέως διαδεδομένα οπτικά μέσα συγκέντρωσης είναι οι φακοί Fresnel. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται για παράδειγμα οι φακοί Fresnel που χρησιμοποιεί η ισπανική εταιρεία Sol3g.



Σχήμα 5.2.1: A row of Fresnel lenses from Sol3g (courtesy of Sol3g)

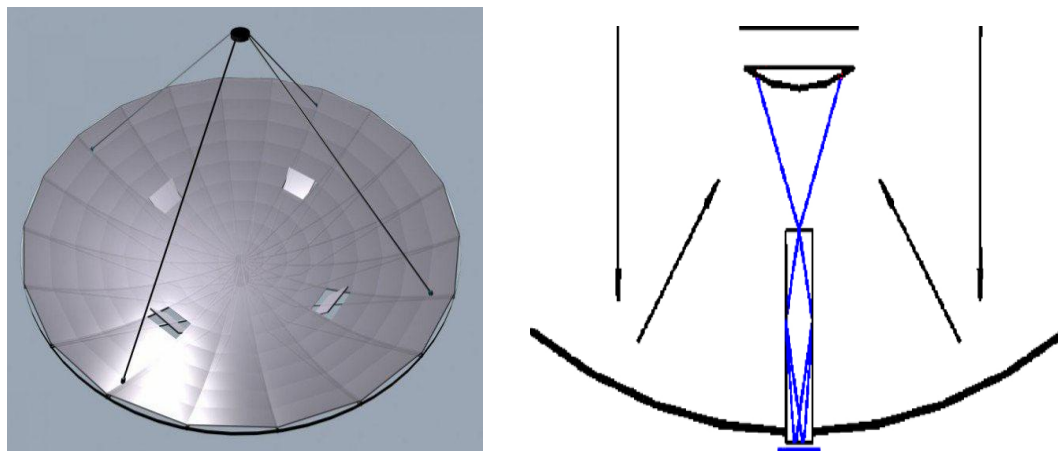
Η Sol3g χρησιμοποιεί τετράγωνα ηλιακές κυψέλες III-V διαστάσεων εμβαδού 30mm² από την εταιρεία Azur Space. Υπό συγκέντρωση 476 ήλιων, κάθε κυψέλη παράγει 3,5W. Ένας ομογενοποιητής, πίσω από κάθε κυψέλη, μετατρέπει την κυκλική εστίαση σε ομοιόμορφη ροή στην επιφάνεια της τετραγωνικής κυψέλης. Επίσης, η εταιρεία αυτή προσφέρει και HCPV συστήματα με ανιχνευτές παρακολούθησης του ήλιου (solar trackers), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 5.2.2: Sol3g's conventional azimuth-elevation tracker (courtesy of Sol3g)

Οι εταιρίες αναλύουν διάφορους παράγοντες για να επιτύχουν τον βέλτιστο παράγοντα συγκέντρωσης, όπως την απόδοση της κυψέλης, την διαθεσιμότητα της κυψέλης στην αγορά, την οπτική απόδοση, την θερμική απόδοση, τους ανιχνευτές ήλιου, κτλ. Ο υψηλότερος συγκεντρωτικός παράγοντας για HCPV συστήματα που έχει επιτευχθεί από την εταιρεία Sunrgi είναι 2000 ήλιους. Η εταιρεία χρησιμοποιεί 1cm^2 κυψέλη και για τον λόγο αυτό χρειάζεται έναν τετράγωνο φακό πλευράς 44,7cm για να πετύχει τον συγκεντρωτικό αυτό παράγοντα. Στους 2000 ήλιους η κυψέλη λειτουργεί με απόδοση 5% κάτω από αυτήν από ότι στους 240 ήλιους.

Micro-Dish: Ενώ ο φακός Fresnel είναι διαθλαστικό, το ``πίατο`` είναι ανακλαστικό στοιχείο. Το Micro-Dish μπορεί να συγκεντρώνει απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στην κυψέλη (αριστερό σχήμα) ή μπορεί να τη συγκεντρώνει πάνω σε ένα δεύτερο οπτικό μέσο, το οποίο να ανακλά την ακτινοβολία πίσω, εστιάζοντάς την στο κέντρο του Micro-Dish όπου και βρίσκεται η κυψέλη (δεξιό σχήμα).



Σχήμα 5.2.3: Micro-Dish

Λίγες εταιρίες ασχολούνται με την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας. Δύο από αυτές είναι η GreenVolts και η Solfocus. Η Green Volts έχει αναπτύξει ένα σύστημα Micro-Dish που συγκεντρώνει απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία III-V κυψέλη 1cm^2 . Ένας ομογενοποιητής εγγυάται την ομοιόμορφη ροή πάνω στην επιφάνεια της κυψέλης. Το σύστημα έχει απόδοση 28,5%, το οποίο προέρχεται από την απόδοση 34% της κυψέλης (625 ήλιους, 30°C) και την απόδοση 84% του οπτικού μέσου. Τα αποτελέσματα μίας κυψέλης είναι παραγωγή 17,8W και ενός συστήματος που χρησιμοποιεί ανιχνευτή ήλιου και 164 μονάδες Micro-Dish σε 10 σειρές είναι παραγωγή 2,92kW. Τέλος, η Solfocus χρησιμοποιεί ένα Micro-Dish, ένα δεύτερο ανακλαστή και έναν ομογενοποιητή για να συγκεντρώνει 500 φορές την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία III-V κυψέλη 1cm^2 . Ο δεύτερος ανακλαστής έχει την σκιά του στο κέντρο του Micro-Dish, όπου βρίσκονται η κυψέλη και ο ομογενοποιητής με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση. Μία μονάδα αποτελείται από 16 Micro-Dish και το ολόκληρο σύστημα από 30 μονάδες και ανιχνευτές ήλιου. Η απόδοση του συστήματος είναι 23%, δηλαδή χαμηλότερη από αυτήν της Green Volts, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι αυτό το σύστημα εκμεταλλεύεται και την θερμική ενέργεια κάθε μονάδας.

B) Ένα καινούργιο ηλιακό συγκεντρωτικό παραβολικό πιάτο 500m^2 . [31]

Τα συγκεντρωτικά παραβολικά πιάτα προσφέρουν την υψηλότερη θερμική και οπτική απόδοση από όλα τα συγκεντρωτικά οπτικά μέσα που υπάρχουν στην σημερινή τεχνολογία. Το εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας (ANU) έχει ασχοληθεί εκτενώς με την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας και το 1994 ολοκλήρωσε την κατασκευή ενός παραβολικού πιάτου 400m^2 (SG3). Το 2008 ξεκίνησε την κατασκευή ενός νέου παραβολικού πιάτου 500m^2 (SG4) , οι προδιαγραφές του οποίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Total panel aperture area	494 m ²
Total mirror aperture area	489 m ²
Focal length	13.4 m
Average diameter	25 m
Average rim angle	50.2°
Mirror reflectivity	93.5%
Number of mirrors	380
Mirror glass size	1165 mm × 1165 mm
Total mass of dish	19.1 t
Total mass of base and supports	7.3 t

Πίνακας 5.2.2: Κατασκευαστικά στοιχεία SG4

Η κατασκευή του πιάτου έγινε, λόγω του μεγέθους του, σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο περιελάμβανε την δημιουργία του σκελετού της κατασκευής, την τοποθέτηση ενός ανιχνευτή Αζιμούθιου (Azimuth tracker) και την κατασκευή της βάσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



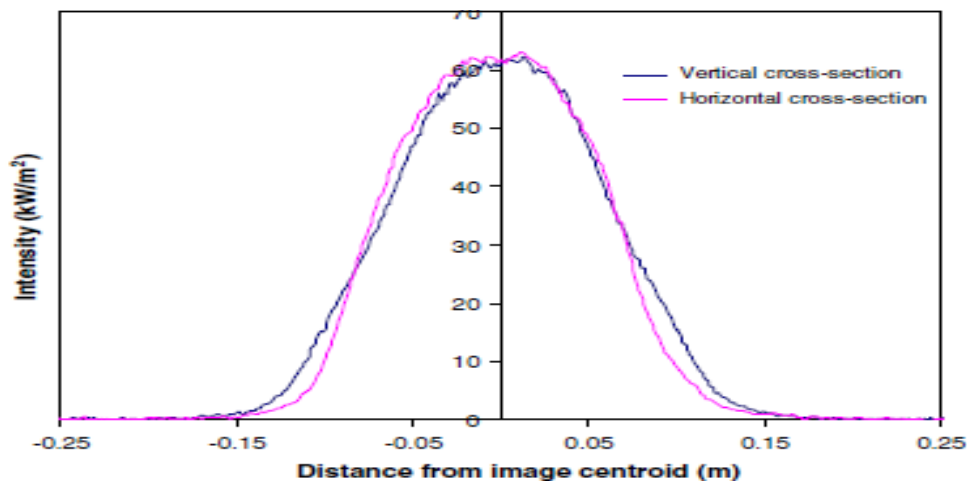
Εικόνα 5.2.1: Κατασκευή βάσης

Το δεύτερο βήμα ήταν η τοποθέτηση των καθρεφτών πάνω στον σκελετό για τον σχηματισμό του παραβολοειδούς. Κατά την διαδικασία αυτή οι καθρέφτες ήταν καλυμμένοι με πλαστικό υλικό για να αποφεύγεται η ανάκλαση του ήλιου. Το τρίτο και τελευταίο βήμα περιελάμβανε την κατασκευή των τριών ``ποδιών`` που θα στήριζαν την θέση για τον δέκτη. Τα πόδια αυτά ήταν σχεδιασμένα έτσι ώστε να δημιουργούν την μικρότερη δυνατή σκιά πάνω στο πιάτο και να αντέχουν βάρος από το δέκτη έως και 2 τόνους. Η τελική κατασκευή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



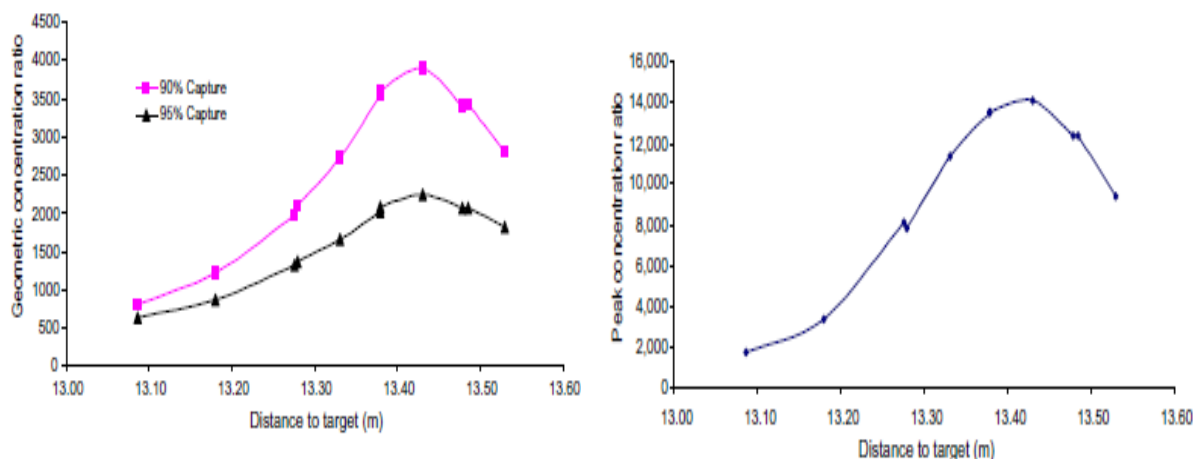
Εικόνα 5.2.2: Τελική μορφή

Διεξαγωγή μετρήσεων: Για τις μετρήσεις επιλέχθηκε η μέθοδος της καταγραφής της ροής με κάμερα (GC1290 12-bit μονοχρωματική). Αρχικά, μετρήθηκε μόνο ένας καθρέφτης, όπου και βρέθηκε σφάλμα στην κλίση της επιφάνειας 1,3mrad. Τα αποτελέσματα της μέτρησης αυτής φαίνονται αναλυτικά στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5.2.3: Flux mapping results for a single mirror panel.

Στη συνέχεια έγιναν αρκετές προσπάθειες για την καταγραφή της ροής του SG4 σε πλήρη ηλιοφάνεια με στόχους από αλουμίνιο, παρόλο αυτά οι στόχοι καταστρέφονταν πριν γίνει συλλογή σωστών αποτελεσμάτων. Έτσι, αποφασίστηκε να εφαρμοσθεί η νυχτερινή μέθοδος καταγραφής της ροής με την εκμετάλλευση της πανσελήνου και του πλανήτη Δία. Η τεχνική αυτή είναι πολύ διαδεδομένη για την μέτρηση των οπτικών μέσων υψηλής συγκέντρωσης, καθώς η ηλιακή και η σεληνιακή γωνιακή διάμετρος έχουν μία απόκλιση της τάξης του 7%. Με αυτόν τον τρόπο έγιναν επιτυχώς οι μετρήσεις, οι οποίες συμφωνούν με τις αρχικές προδιαγραφές του συστήματος και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.2.4: Αποτελέσματα τελικών μετρήσεων

Peak concentration ratio	Geometric concentration		Aperture diameter (mm)	
	90% capture	95% capture	90% capture	95% capture
14,100	3900	2240	400	530

Πίνακας 5.2.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

5.3 Ηλιακοί Ανιχνευτές (Solar Trackers)

A) *Ανασκόπηση για τις μεθόδους ανίχνευσης του ήλιου για την μεγιστοποίηση της απόδοσης των ηλιακών συστημάτων.* [32]

Η καθημερινή και η εποχιακή κίνηση της γης επηρεάζει την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα ηλιακά συστήματα. Οι ανιχνευτές ήλιου (sun trackers) κινούν το συγκεντρωτικό σύστημα, έτσι ώστε να διατηρεί τον βέλτιστο προσανατολισμό ανάλογα με την θέση του ήλιου. Οι ανιχνευτές αυτοί έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν την συγκομιδή ενέργειας από 10 έως και 100%, ανάλογα με τις χρονολογικές και γεωγραφικές συνθήκες του συστήματος. Γενικά όμως, η χρήση τους δεν συνίσταται σε μικρά ηλιακά συστήματα, λόγω των απωλειών ενέργειας από το σύστημα οδήγησης.

Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται άμεσα από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών και συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία αυτή, τόσο λιγότερη είναι η παραγόμενη ενέργεια. Θεωρητικοί υπολογισμοί στην περίπτωση συλλέκτη με ανιχνευτή γίνονται, θεωρώντας ότι η μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας ($I = 1100\text{Wm}^{-2}$) προσπίπτει στην περιοχή που είναι προσανατολισμένη κάθετα στην διεύθυνση της ακτινοβολίας. Ακόμα, θεωρώντας την διάρκεια της μέρας $t = 12\text{h} = 43200\text{s}$ και έναν σταθερό συλλέκτη, ο οποίος είναι

προσανατολισμένος κάθετα στην ακτινοβολία μόνο κατά την διάρκεια του μεσημεριού, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω υπολογισμοί για την ενέργεια ανά μονάδα ημερησίως (αμελώντας τις ατμοσφαιρικές επιρροές):

α) Για τον σταθερό συλλέκτη:

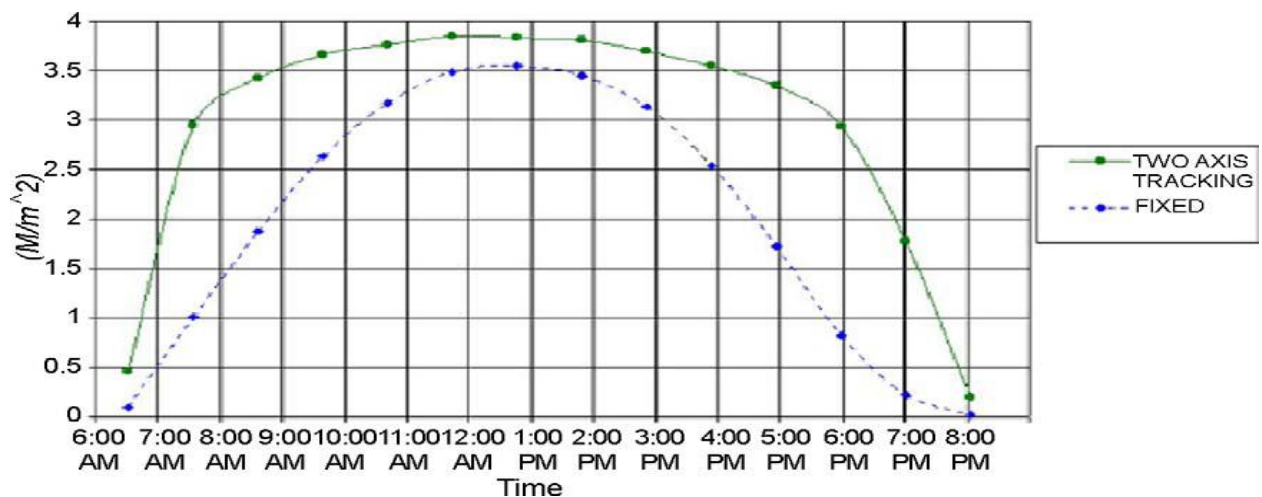
$$W = \int_{-21,600}^{+21,600} I_{S_0} \cos \omega t \, dt = I_{S_0} \left[\frac{\sin \omega t}{\omega} \right]_{-21,600}^{+21,600} = \frac{2I_{S_0}}{\omega}$$

$$= 3.03 \times 10^7 \text{ W s/m}^2 \text{ day} = 8.41 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$$

β) Για τον συλλέκτη με τον ανιχνευτή :

$$W = I_{S_0} t = 4.75 \times 10^7 \text{ W s} = 13.2 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$$

Παρατηρούμε ότι στην δεύτερη περίπτωση έχουμε 57% μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Γενικά, οι ανιχνευτές δεν χρειάζεται να σημαδεύουν απευθείας τον ήλιο για να είναι αποτελεσματικοί. Αν υπάρχει απόκλιση 10° , η απόδοση παραμένει στο 98,5% της μέγιστης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα ημερήσιας μέτρησης της ενέργειας μεταξύ δύο τέτοιων συστημάτων (σταθερού και με ανιχνευτή) παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

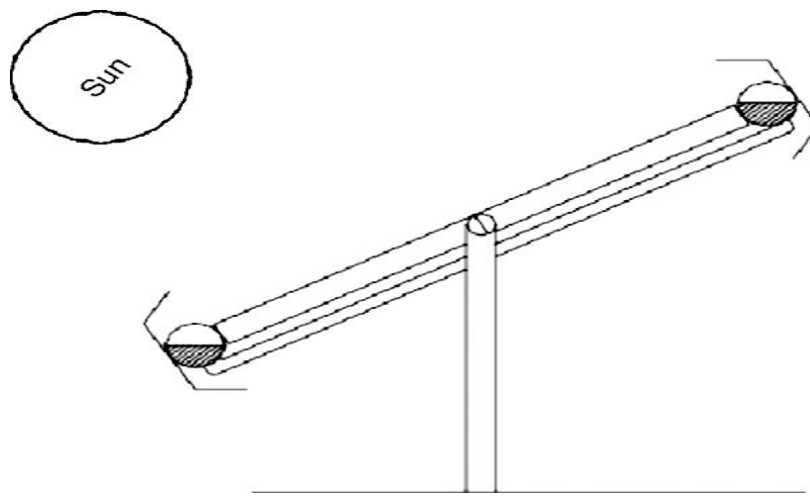


Διάγραμμα 5.3.1: Σύγκριση συστημάτων σταθερού και μετακινούμενου άξονα

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι συστημάτων ανίχνευσης του ήλιου, αλλά συνήθως χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τα παθητικά (μηχανικά) και τα ενεργά (ηλεκτρικά).

Παθητικά συστήματα (passive trackers): Βασίζονται στην θερμική διαστολή ενός στοιχείου (συνήθως Freon) ή στη σχηματική διατήρηση των κραμάτων. Συνήθως αποτελούνται από ένα ζεύγος ενεργοποιητών, οι οποίοι σε ίδια φωτεινότητα ισορροπούν. Σε διαφορετική ακτινοβολία,

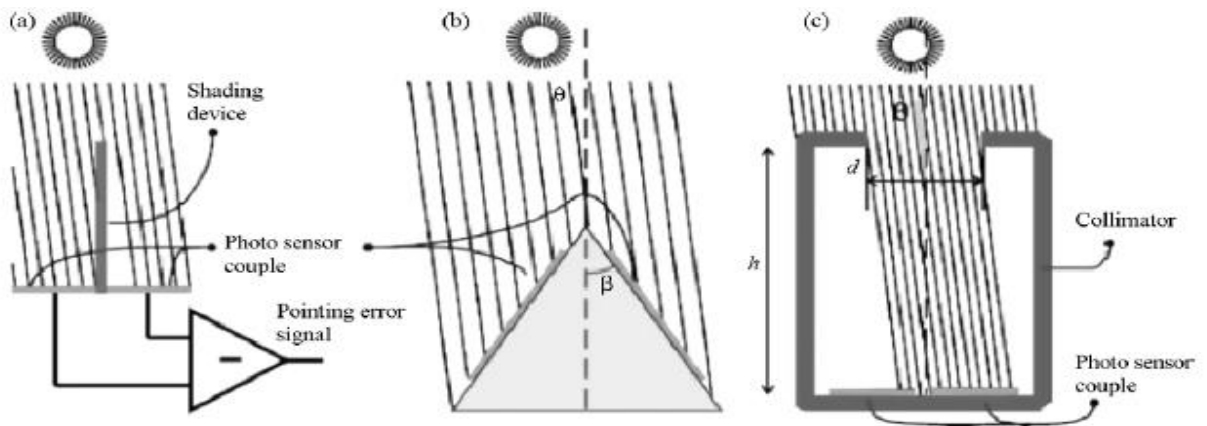
οι δυνάμεις ανισορροπίας που αναπτύσσονται χρησιμοποιούνται για τον προσανατολισμό της συσκευής στην κατεύθυνση, όπου η ίση φωτεινότητα και η ισορροπία των ενεργοποιητών αποκαθίσταται. Οι παθητικοί ανιχνευτές είναι λιγότερο περίπλοκοι και φθηνότεροι από τους ενεργητικούς, αλλά δουλεύουν σε χαμηλότερες αποδόσεις και σε χαμηλές θερμοκρασίες σταματούν την λειτουργία τους. Για τους λόγους αυτούς δεν έχουν γίνει ευρέως αποδεκτοί από τους καταναλωτές.



Σχήμα 5.3.1: A passive solar tracker using two identical cylindrical tubes filled with a fluid under partial pressure

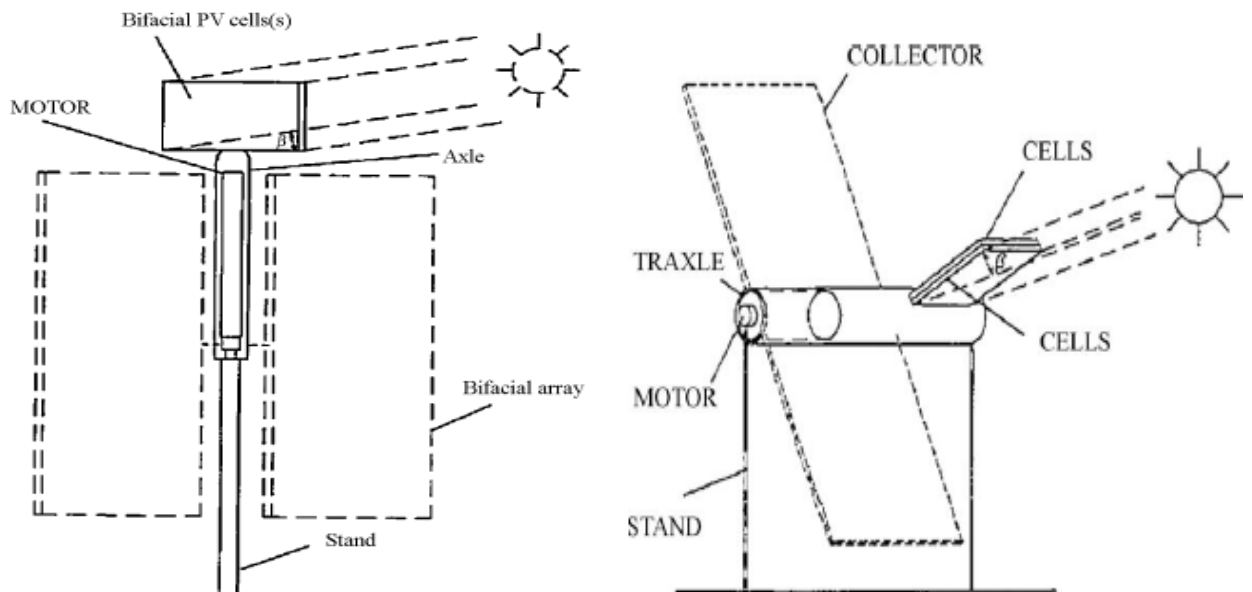
Ενεργά συστήματα (active trackers): Τα κύρια ενεργά συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής : 1) βασισμένα σε μικροεπεξεργαστές και οπτικοηλεκτρικούς αισθητήρες, 2) βασισμένα σε έλεγχο ημερομηνίας και ώρας από τον υπολογιστή, 3) βασισμένα στην βοήθεια ηλιακών κυψελών ή σε συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων.

1)(microprocessor and electro-optical sensor based) Σε αυτό τον τύπο, όταν έχουμε διαφορετική φωτεινότητα στους αισθητήρες παρουσιάζεται διαφορετικό σήμα ελέγχου (α) εικόνα), το οποίο χρησιμοποιείται για να οδηγήσει την μηχανή και να προσανατολίσει την συσκευή στην κατεύθυνση, όπου η φωτεινότητα των αισθητήρων γίνεται ίση και ισορροπούν. Επιπρόσθετα, οι φωτο-δίοδοι μπορούν να είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να αυξάνουν την ευαισθησία του φωτορεύματος (β) εικόνα). Τέλος, είναι σύνηθες η συσκευή σκίασης να χρησιμοποιείται σαν κατευθυντήριο σωλήνας που αποτρέπει την διάχυτη ακτινοβολία από το να εισέλθει στον αισθητήρα και να δώσει λανθασμένη μέτρηση για την θέση του ήλιου (γ) εικόνα). Αυτοί οι ανιχνευτές είναι μεγάλης ακρίβειας και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Όμως, είναι αρκετά περίπλοκοι και για αυτό ακριβοί και χωρίς μεγάλη αξιοπιστία.



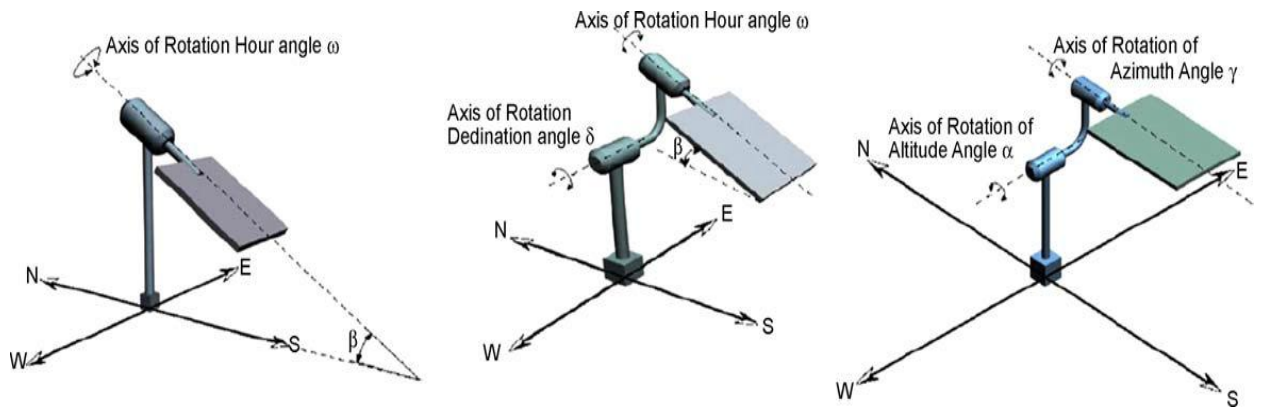
Shade balancing principle (a) sun-pointing sensors (b) tilted mount of photo sensors (c) precise sun pointing by means of a collimator
Σχήμα 5.3.2

2)(auxiliary bifacial solar cell based) Οι βοηθητικές κυψέλες που είναι απευθείας συνδεδεμένες με έναν μόνιμου μαγνήτη, συνεχούς ρεύματος κινητήρα τοποθετούνται σε έναν περιστρεφόμενο άξονα του ανιχνευτή και μπορούν και να "αισθάνονται" και να παρέχουν ενέργεια στο σύστημα. Δύο τέτοια συστήματα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



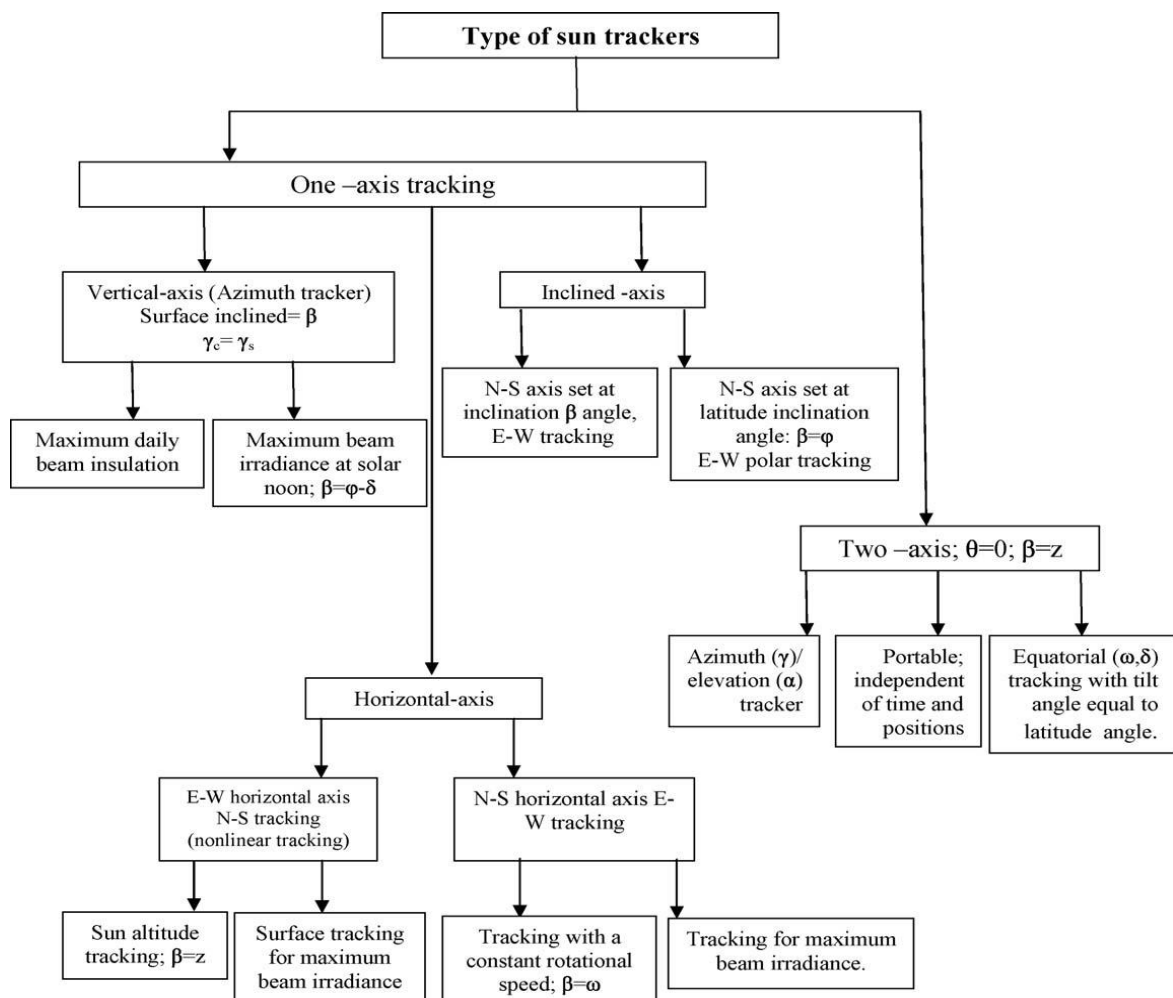
Σχήμα 5.3.3: auxiliary bifacial solar cell based

3)(date and time based) Σε αυτήν την κατηγορία ο υπολογιστής ή ένας επεξεργαστής υπολογίζει τη θέση του ήλιου από μία φόρμουλα ή έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί την ώρα, την ημερομηνία και την γεωγραφική θέση για να στέλνει σήματα στον ηλεκτροκινητήρα. Παραδείγματα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 5.3.4:
 (From left to right) One-axis sun-tracking system with tilt angle equal to the latitude angle; two-axis equatorial sun-tracking system with tilt angle equal to latitude angle; two-axis azimuth/elevation sun-tracking system

Παρατηρώντας τα παραπάνω παραδείγματα είναι κατανοητό ότι μπορεί να γίνει και ένας άλλος διαχωρισμός στις μεθόδους των συστημάτων ανίχνευσης του ήλιου, ανάλογα δηλαδή με το αν η συσκευή είναι ενός ή δύο αξόνων. Ο διαχωρισμός αυτός παρουσιάζεται αναλυτικά στο παρακάτω σχεδιάγραμμα :



Σχήμα 5.3.5: Τύποι συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου

B) Εφαρμογή ενός συστήματος ανίχνευσης του ήλιου ενός άξονα. [33]

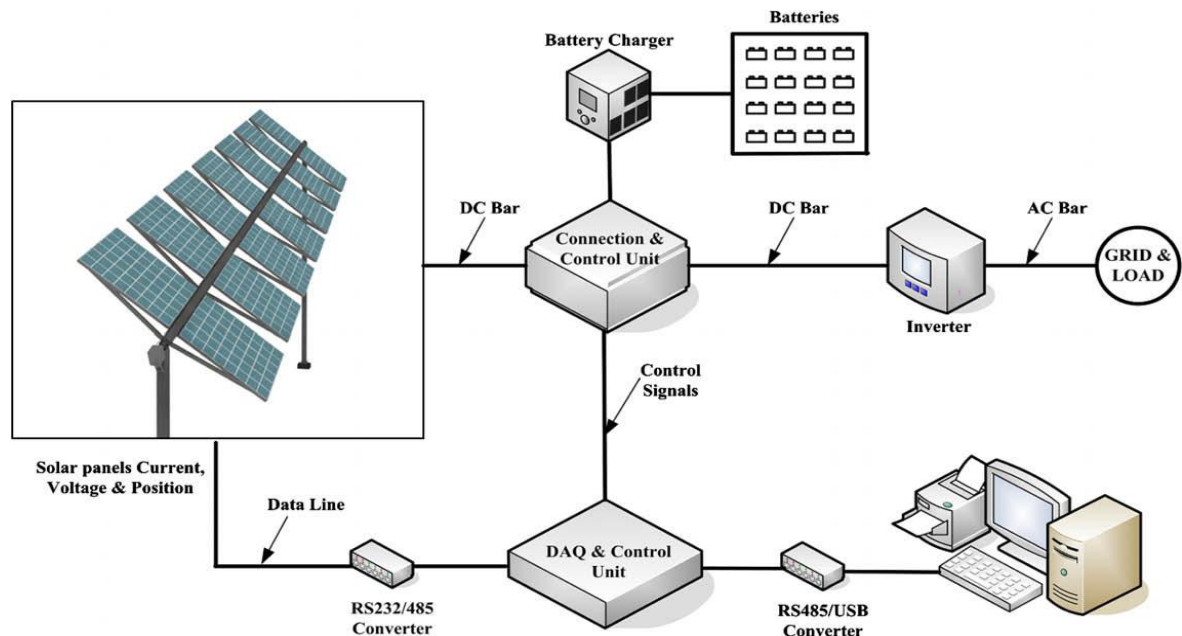
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανίχνευσης του ήλιου είναι μία μέθοδος για την μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας. Έρευνες έχουν δείξει ότι η εποχιακή ενεργειακή απόδοση αυξάνεται κατά 10-20% σε σύγκριση με την απόδοση ενός σταθερού συλλέκτη. Σημαντικοί παράμετροι για την επιλογή ενός ηλιακού ανιχνευτή είναι η εγκατάσταση, ο μηχανισμός, το κόστος, ο σχεδιασμός και η συντήρηση. Ο παρακάτω πίνακας σχολιάζει αυτές τις παραμέτρους για κάθε είδος συστήματος.

Comparisons of solar systems.

Parameters	Fixed	One-axis	Two axes	Developed system
Installation	Easy	Easy	Difficult	Easy
Mechanism	No mechanism	Simple	Complicated	Simple
Cost	Cheap	Moderate	Expensive	Moderate
Efficiency	Reference efficiency	10-35% > fixed system	25-45% > fixed system	10-45% > fixed system
Design	Simple	Moderate	Complicated	Simple
Maintenance	Less	Moderate	More	Less

Πίνακας 5.3.1: Σύγκριση ηλιακών συστημάτων

Το paper αυτό εξηγεί την λειτουργία ενός ηλιακού ανιχνευτή ενός άξονα βασισμένου στον υπολογιστή. Η δομή του συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



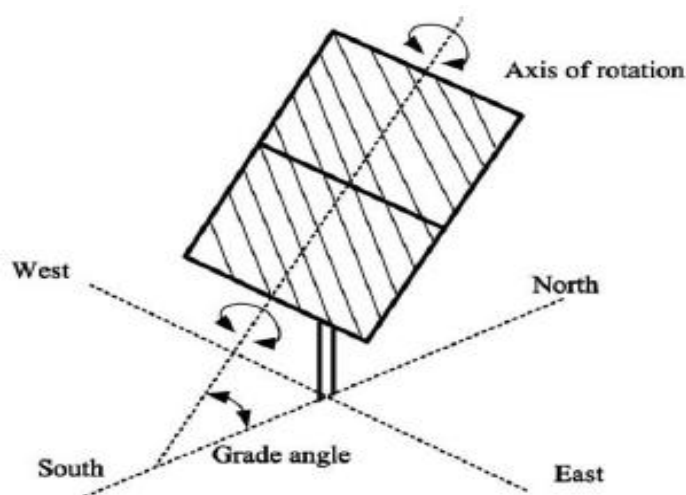
Σχήμα 5.3.6: Δομή συστήματος παρακολούθησης του ήλιου ενός άξονα

Η λειτουργία του συστήματος είναι ως εξής: Τα δεδομένα που συλλέγονται από τον μικρο-ελεγκτή και το σύστημα ελέγχου μεταφέρονται στον υπολογιστή που χρησιμοποιεί μία σειριακή σύνδεση

(RS 485), στην οποία τα δεδομένα αποθηκεύονται. Επιπρόσθετα, ένα ανεπτυγμένο λογισμικό (C#) εμφανίζει την θέση, τα ρεύματα και τις τάσεις του συστήματος στον υπολογιστή χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση.

Το ηλιακό πλαίσιο είναι τοποθετημένο στο σύστημα ανίχνευσης του ήλιου που ελέγχεται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος για να ακολουθεί τον ήλιο κατά την διάρκεια ολόκληρης της ημέρας. Η ενέργεια που αποκτάται από το πάνελ αποθηκεύεται στις μπαταρίες και μετά χρησιμοποιείται για τα φορτία, όποτε αυτά χρειάζονται για την σύνδεση, την μονάδα ελέγχου και τον φορτιστή των μπαταριών. Όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες, η ενέργεια που παράγεται μεταφέρεται είτε απευθείας στο φορτίο, είτε στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω του αντιστροφέα (inverter). Ενώ, όταν οι μπαταρίες είναι αποφορτισμένες, η απαιτούμενη ενέργεια από το φορτίο παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι, η ενέργεια μπορεί να ρέει και στις δύο κατευθύνσεις, ανάμεσα δηλαδή στον ηλεκτρικό σταθμό και στο δίκτυο.

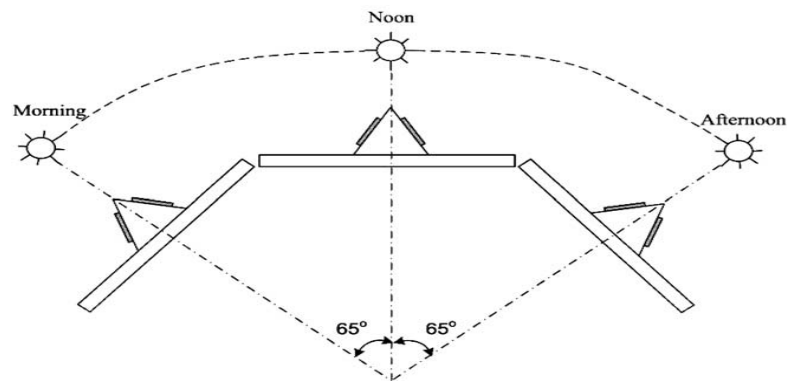
Ηλεκτρομηχανικό σύστημα: Σχεδιάστηκε για να αποκτά την μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο και να λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο. Αποτελείται από 14 ηλιακά πλαίσια με 185W και συνολική ισχύ 2500W. Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος με 24V και 50W κινεί το ηλιακό πάνελ σε ανατολικές ή δυτικές κατευθύνσεις. Επιλέχθηκε ανιχνευτής ενός άξονα (και όχι δύο αξόνων), λόγω του μεγάλου βάρους του συστήματος, που ανέρχεται σε 3500 kg και φαίνεται ολοκληρωμένο στην παρακάτω φωτογραφία.



Σχήμα 5.3.7: one axis solar tracker

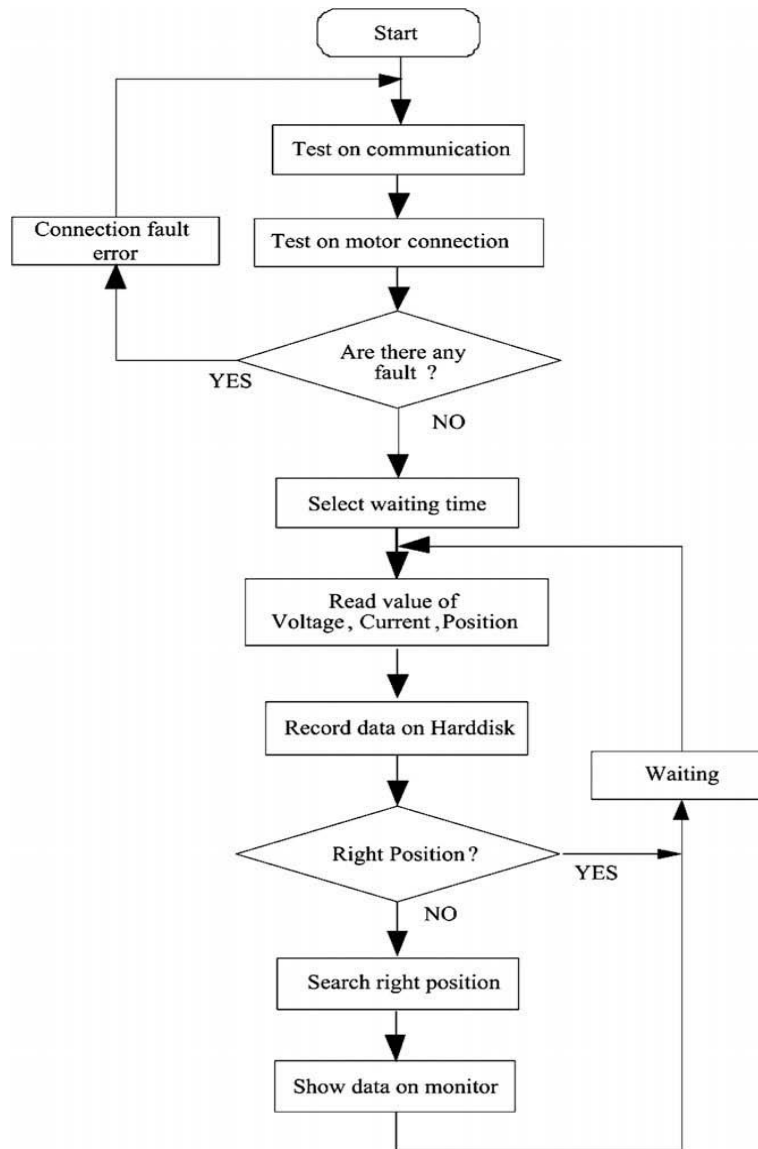
Σχεδίαση της μονάδας επεξεργασίας για τα σήματα των αισθητήρων: Όλη η διαδικασία της κίνησης ελέγχεται από δύο φωτο-αντιστάσεις, οι οποίες συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και ένα σημείο

σύνδεσης επιλέγεται στη μέση τους. Οι φωτο-αντιστάσεις δηλαδή χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες και είναι τοποθετημένες σε διάταξη πυραμίδας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



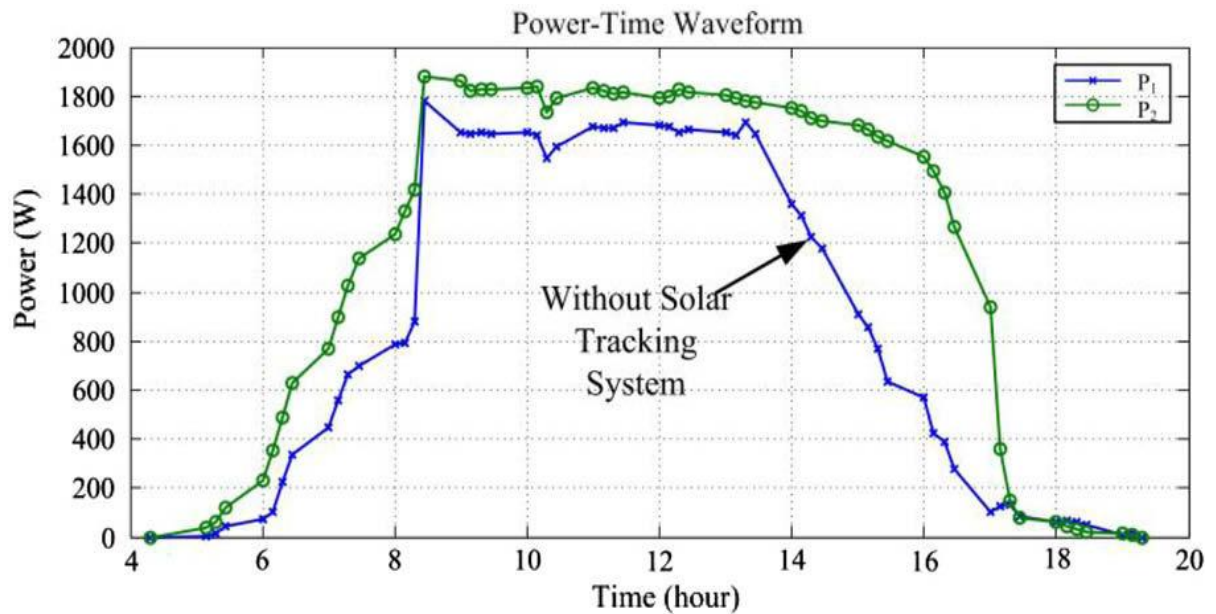
Σχήμα 5.3.8: Διάταξη φωτο-αντιστάσεων

Όταν, δηλαδή οι φωτο-αντιστάσεις εκτίθενται στον ήλιο εξίσου, οι τάσεις τους είναι ίσες και το πάνελ παραμένει στην συγκεκριμένη θέση. Σε αντίθετη περίπτωση, το πάνελ συνεχίζει την κίνησή του ώσπου να επιτευχθεί ίδια τιμή τάσης και στις δύο φωτο-αντιστάσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος του υπολογιστή που ελέγχει την κίνηση του συστήματος.



Σχήμα 5.3.9: Διάγραμμα ροής προγράμματος για την εκκίνηση του συστήματος

Αποτελέσματα: Έγιναν μετρήσεις στο σύστημα με και χωρίς την χρήση του ανιχνευτή για συνεχή λειτουργία 15 λεπτών μέσα στην διάρκεια της μέρας. Η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια του συστήματος με τον ανιχνευτή ήταν περίπου 17248kW και χωρίς τον ανιχνευτή 11862kW. Οι μετρήσεις αυτές δείχνουν ότι το σύστημα ανίχνευσης παράγει περίπου 45% περισσότερη ενέργεια από ότι ένα σταθερό σύστημα. Το διάγραμμα των μετρήσεων παρουσιάζεται παρακάτω.

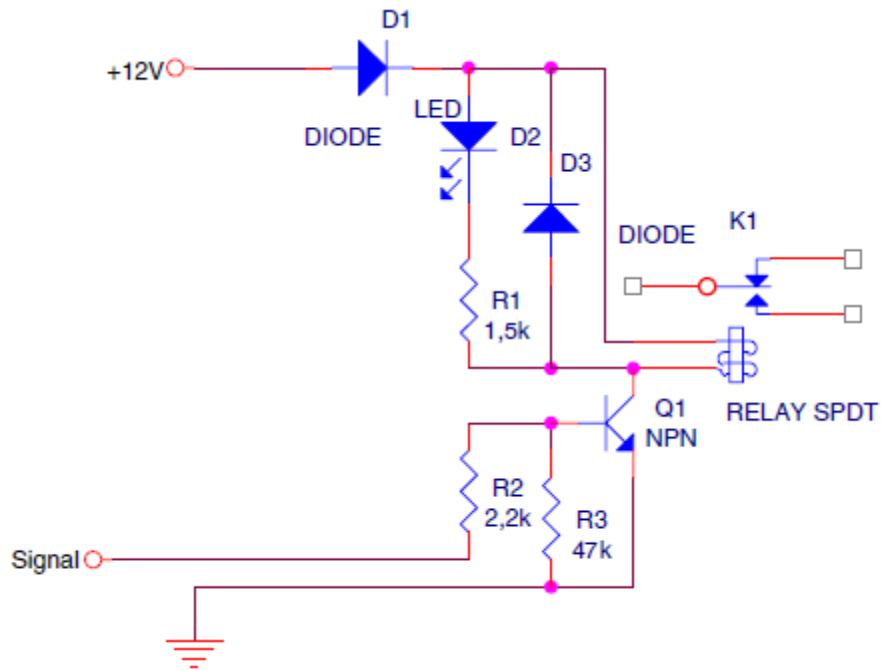


Διάγραμμα 5.3.2: Relationship between the tracking system and the fixed system

Γ) Σχεδιασμός και κατασκευή ενός συστήματος δυο αξόνων παρακολούθησης του ήλιου για την βελτίωση της απόδοσης ενός συλλέκτη παραβολικού κυλίνδρου. [34]

Ενώ, ο ανιχνευτής ενός άξονα ακολουθεί την κίνηση του ήλιου από την Ανατολή προς την Δύση, ο ανιχνευτής δύο αξόνων (two-axis tracker) ακολουθεί επίσης και την μεταβαλλόμενη γωνία ύψους του ήλιου. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να παρουσιάσει την εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης του ήλιου δύο αξόνων, το οποίο βασίζεται στην συνδυασμένη χρήση φωτο-αντιστάσεων και μίας προγραμματιστικής μεθόδου ελέγχου που λειτουργεί αποδοτικά σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τρία μέρη:

Ηλεκτρο-μηχανικός μηχανισμός κίνησης: Αποτελείται από τέσσερα ρελέ και δύο ηλεκτρικά κυκλώματα, όπου το πρώτο συνδέεται με τον υπολογιστή και το άλλο στους αισθητήρες. Τα ρελέ συνδέουν τους κινητήρες με τον μηχανισμό και σκοπό έχουν να κινούν τον ηλιακό συλλέκτη προς τις τέσσερις κατευθύνσεις (πάνω, κάτω, δεξιά, αριστερά). Ακόμα, οδηγούνται μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, το οποίο αποτελείται από οκτώ όμοια υποκυκλώματα, ένα από τα οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3.10: Sub-circuit for relay driving.

Τα υποκυκλώματα αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αποτελείται από δύο υποκυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση του ανακλαστήρα από αριστερά προς τα δεξιά και συνδέονται στον υπολογιστή. Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται και αυτή από δύο υποκυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση του ανακλαστήρα από πάνω προς τα κάτω (North-South) και συνδέονται επίσης στον υπολογιστή. Η τρίτη κατηγορία αποτελείται από δύο υποκυκλώματα για την οδήγηση του ανακλαστήρα σύμφωνα με το σήμα των αισθητήρων. Υπάρχει ακόμα ένα υποκύκλωμα που συνδέει το σύστημα των αισθητήρων στον υπολογιστή και ένα άλλο που αποφασίζει αν οι αισθητήρες θα ενεργοποιηθούν, ανάλογα από το επίπεδο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι πιθανοί συνδυασμοί των λογικών καταστάσεων των αντιστάσεων R2,R5,R8,R11 (όπου οι R5,R8,R11 αντιστοιχούν στα υπόλοιπα τρία υποκυκλώματα οδήγησης των ρελέ), οι αντίστοιχες καταστάσεις των ρελέ και οι κινήσεις του ανακλαστήρα.

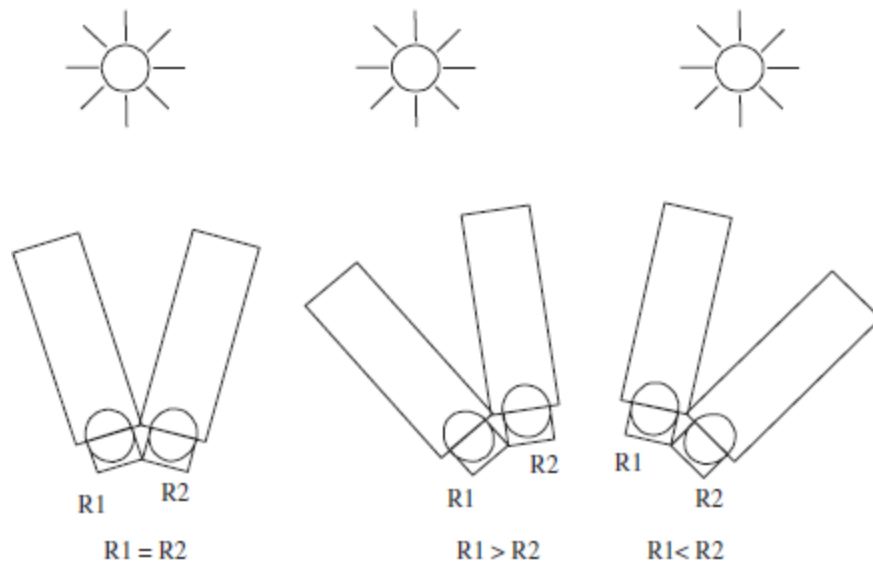
Logic state combinations

Logic state of R2	Logic state of R5	Logic state of R8	Logic state of R11	Logic state of relay for horizontal movement (H1)	Logic state of relay for horizontal movement (H2)	Logic state of relay for vertical movement (V1)	Logic state of relay for vertical movement (V2)	State of operation
0	X	0	X	0	0	0	0	Idle
1	0	0	X	1	0	0	0	Left movement
1	1	0	X	0	1	0	0	Right movement
0	X	1	0	0	0	1	0	Up movement
0	X	1	1	0	0	0	1	Down movement

"X"—no influence to system operation, "1"—5V DC/220V AC, "0"—0V DC,0V AC

Πίνακας 5.3.2: Συνδυασμοί κίνησης

Μονάδα επεξεργασίας σήματος των αισθητήρων: Το σύστημα των αισθητήρων αποτελείται από δύο φωτο-αντιστάσεις που συνδέονται σε σειρά με τάση U_c . Όταν οι αντιστάσεις βλέπουν εξίσου τον ήλιο, η τάση στην μέση τους είναι $U_c/2$. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα κινείται, ώσπου η ίδια τιμή αντίστασης να επιτευχθεί και στις δύο φωτο-αντιστάσεις.



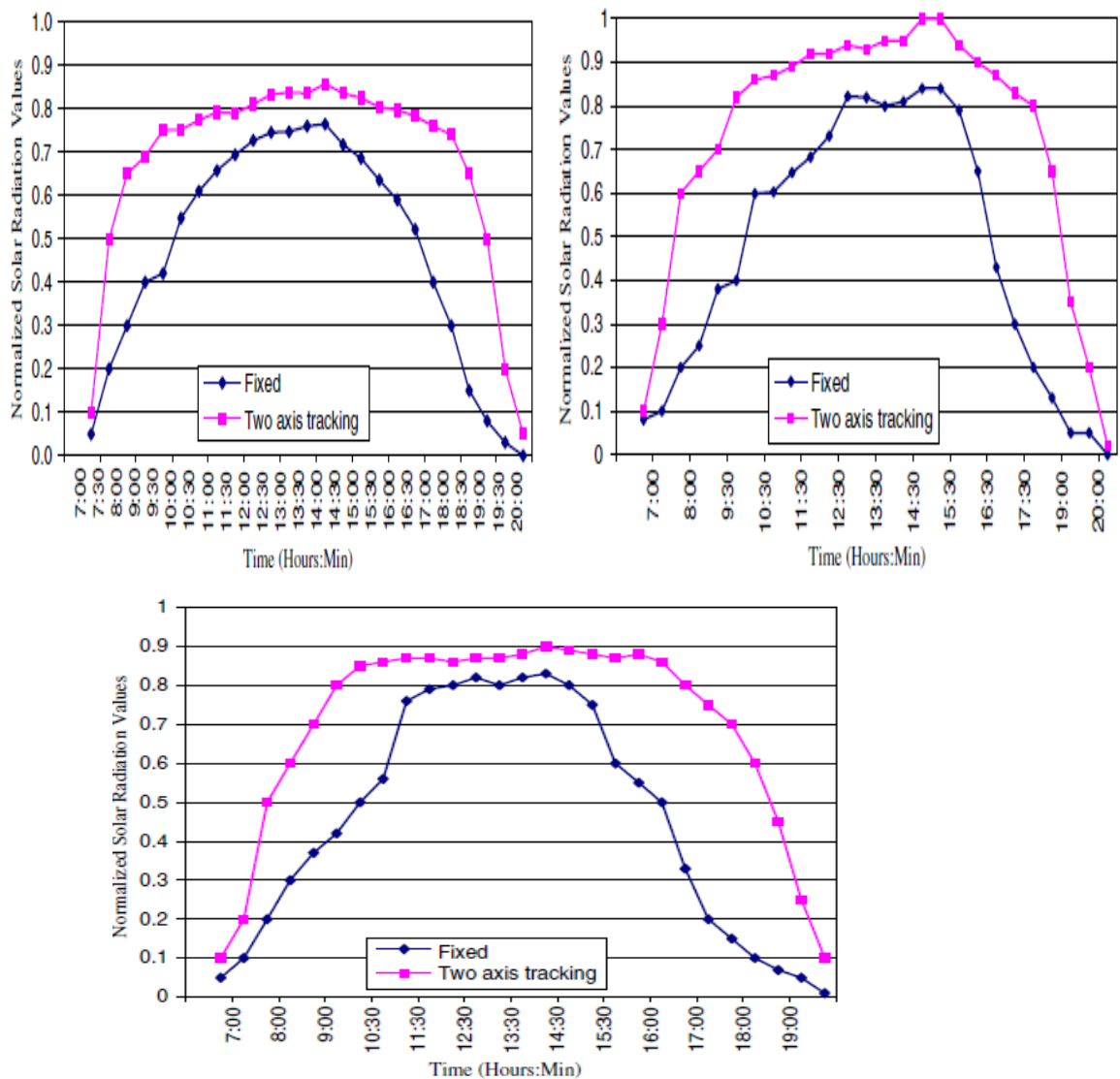
Σχήμα 5.3.11: Περιπτώσεις φωτο-αντιστάσεων

Η σύγκριση των τιμών των αντιστάσεων γίνεται με την χρήση ενός κυκλώματος. Το σύστημα των αισθητήρων λειτουργεί όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ξεπεράσει την ελάχιστη τιμή των $400W/m^2$, το οποίο και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός κυκλώματος.

Λογισμικό του συστήματος: Είναι γραμμένο στην γλώσσα προγραμματισμού Visual C ++.

Πειραματικά αποτελέσματα και αξιολόγηση: Τα πειράματα έγιναν σε μία βιομηχανική περιοχή της Ξάνθης και χρησιμοποιήθηκαν δύο μετρητές της ηλιακής ακτινοβολίας (pyranometers). Ο ένας τοποθετήθηκε στη μέση της βάσης του παραβολικού καθρέφτη και ο άλλος σε σταθερή επιφάνεια 40° προς το Νότο. Έγιναν δύο σετ μετρήσεων. Το ένα (α) υπό καλές καιρικές συνθήκες και το άλλο (β) υπό έντονη συννεφιά και βροχή.

(α) Έγιναν μετρήσεις τρεις διαφορετικές ημέρες κατά τις ώρες 6.30-19.30 με τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας (22°C -45%, 25°C -50%, 23°C -50%) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.3.3: Αποτελέσματα μετρήσεων τριών ημερών

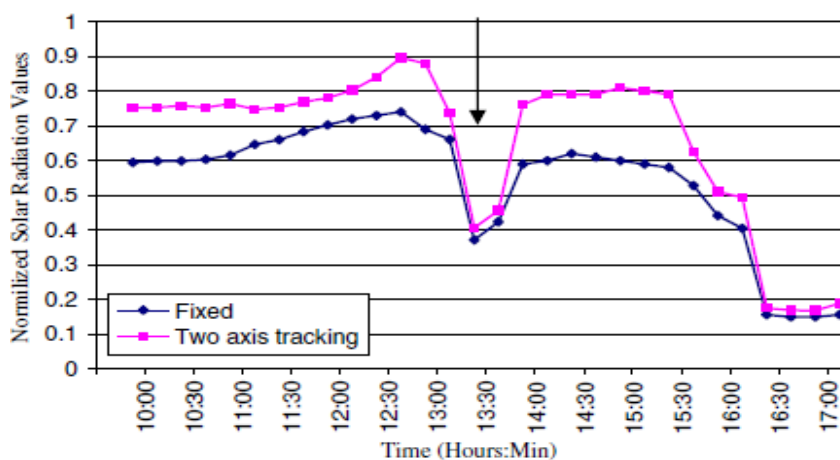
Παρατηρούμε ότι το σύστημα με τον ανιχνευτή ήλιου παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη απόδοση από το σταθερό σύστημα. Η απόδοση βελτιώνεται περισσότερο, όταν η κλίση του ήλιου αυξάνεται σε σχέση με την κλίση 40⁰ του σταθερού συστήματος, γεγονός το οποίο συμβαίνει ιδιαίτερα νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της συλλογής ηλιακής ενέργειας των δύο συστημάτων και τις τρεις ημέρες.

Experimental average daily total solar radiation in MJ/m²

Date	Two axis tracking (MJ/m ²)	Fixed at 40° latitude (MJ/m ²)	Gain (%)
20-04-04	34.07	23.52	44.86
12-05-04	35.76	24.55	45.66
01-06-04	38.15	25.63	48.85
Average	35.99	24.57	46.46

Πίνακας 5.3.3: Συγκριτικά αποτελέσματα των δύο συστημάτων

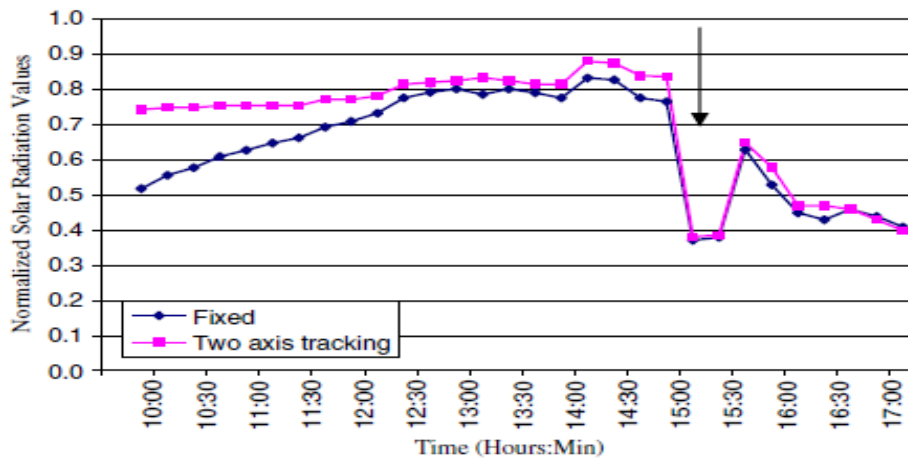
(β) Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Το πρώτο έγινε κατά τις ώρες 09.45-17.00 με θερμοκρασία 19⁰C, υγρασία 50% και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5.3.4: Αποτελέσματα πρώτου πειράματος

Παρατηρούμε ότι η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας μειωνόταν μετά τις μεσημεριανές ώρες, λόγω της παρουσίας σύννεφων και βροχής αργότερα τις απογευματινές ώρες. Φαίνεται επίσης, ότι μετά την μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, το ανεπτυγμένο λογισμικό βοηθούσε τον ανακλαστήρα να ακολουθεί τον ήλιο μέχρι το τέλος της ημέρας, παρόλο που η ηλιακή ένταση δεν επέτρεπε την λειτουργία των αισθητήρων.

Το δεύτερο πείραμα έγινε τις ίδιες ώρες, με θερμοκρασία 26 ⁰C και υγρασία 40%, αλλά χωρίς τη χρήση του λογισμικού και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5.3.5:

Experimental results using only sensor mode of operation without software support.

Εδώ μπορεί να παρατηρηθεί ότι κατά την διάρκεια των απογευματινών ωρών, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται, λόγω της βροχής παρόλο που την υπόλοιπη μέρα ο καιρός ήταν αρκετά καλός.

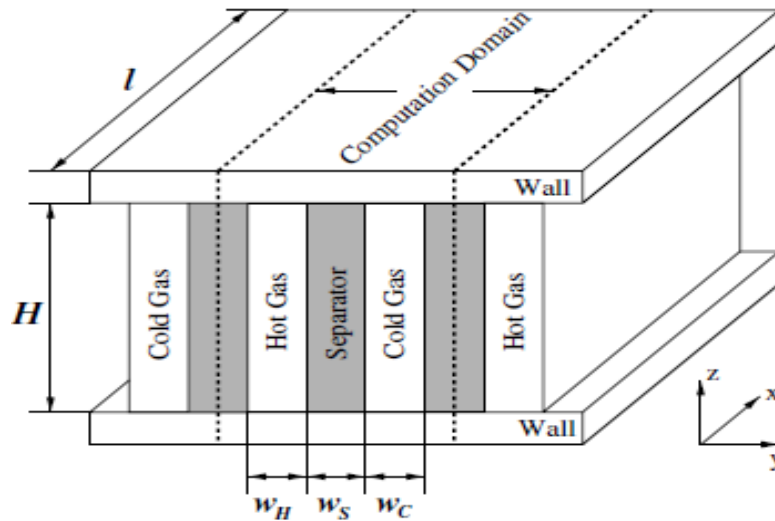
5.4 Μικρο-εναλλάκτες Θερμότητας

A) *Βελτιστοποίηση μικρο-εναλλάκτη: Υπολογιστική ρευστοδυναμική, αναλυτική προσέγγιση και εξελικτικοί αλγόριθμοι.* [35]

Η ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στον σχεδιασμό ενός συγκεντρωτικού συστήματος. Σε αυτά τα συστήματα, οι ηλιακές κυψέλες δέχονται υψηλή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται υπερβολικά η θερμοκρασία τους και να μειώνεται η ενεργειακή τους απόδοση. Έτσι, η εγκατάσταση ενός θερμικού συστήματος κρίνεται απαραίτητη. Μία πρόταση για την επίτευξη του σκοπού αυτού είναι η χρήση ενός μικρο-εναλλάκτη (μHEX). Φυσικά, η γεωμετρία και χαρακτηριστικά του εναλλάκτη παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην βελτιστοποίηση της ροής θερμότητας. Ο σκοπός αυτού του paper είναι η παρουσίαση δύο μεθόδων για τον καθορισμό των βέλτιστων χαρακτηριστικών ενός μικρο-εναλλάκτη, ώστε να μεγιστοποιείται η ροή θερμότητας.

Η πρώτη μέθοδος συνδυάζει την υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) με την αναλυτική λύση μίας απλής εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας (Samalam). Αυτή η προσέγγιση βελτιστοποιεί τις διαστάσεις των μικρο-αγωγών με προκαθορισμένη γεωμετρία και χωρίζεται σε τρία στάδια. (Στο πείραμα, ο μικρο-εναλλάκτης αποτελείται από Inconel

πάχους 0.1mm και σαν θερμό ρευστό χρησιμοποιείται άζωτο και σαν ψυκτικό, διοξείδιο του άνθρακα.)

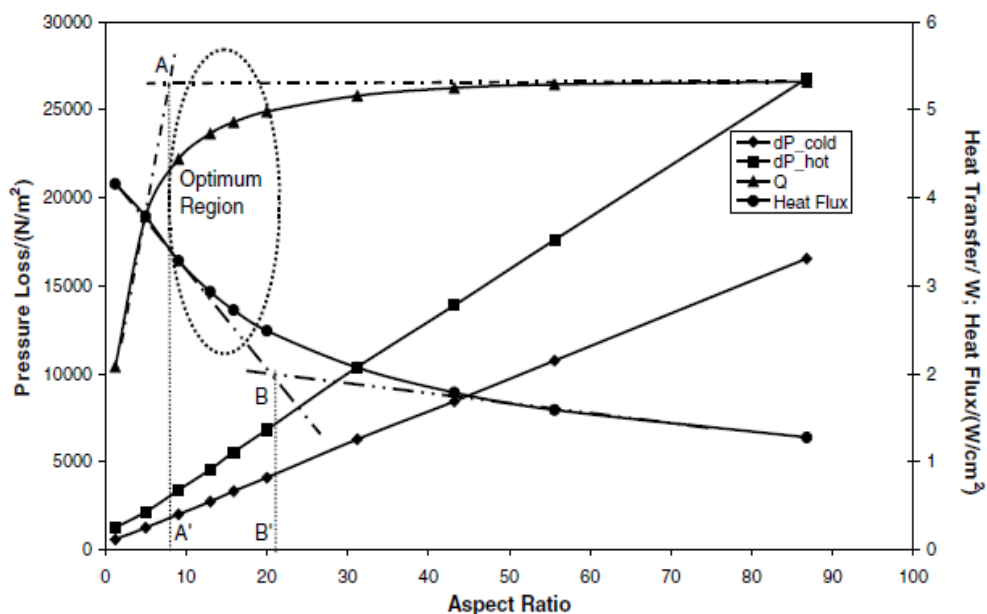


Σχήμα 5.4.1: Δομή μικρο-εναλλάκτη

α) Προσδιορισμός βέλτιστου λόγου διαστάσεων (aspect ratio) των μικρο-αγωγών υπό σταθερό όγκο: Σε αυτή τη μελέτη κάθε μικρο-αγωγός έχει σταθερό όγκο 50mm^3 . Θεωρώντας, δηλαδή σταθερό μήκος 40mm για κάθε αγωγό, έχουμε σταθερή διατομή $1,25\text{mm}^2$. Ο λόγος διαστάσεων κάθε αγωγού καθορίστηκε ως η αναλογία του ύψους προς το πλάτος του .

$$AR = \frac{H}{w_c}$$

Αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο AR έχει ορθό εύρος τιμών από 1,25 έως 86,8. Έτσι, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η αναλογία της ροής θερμότητας και της πτώσης πίεσης κάθε αγωγού με τον AR.

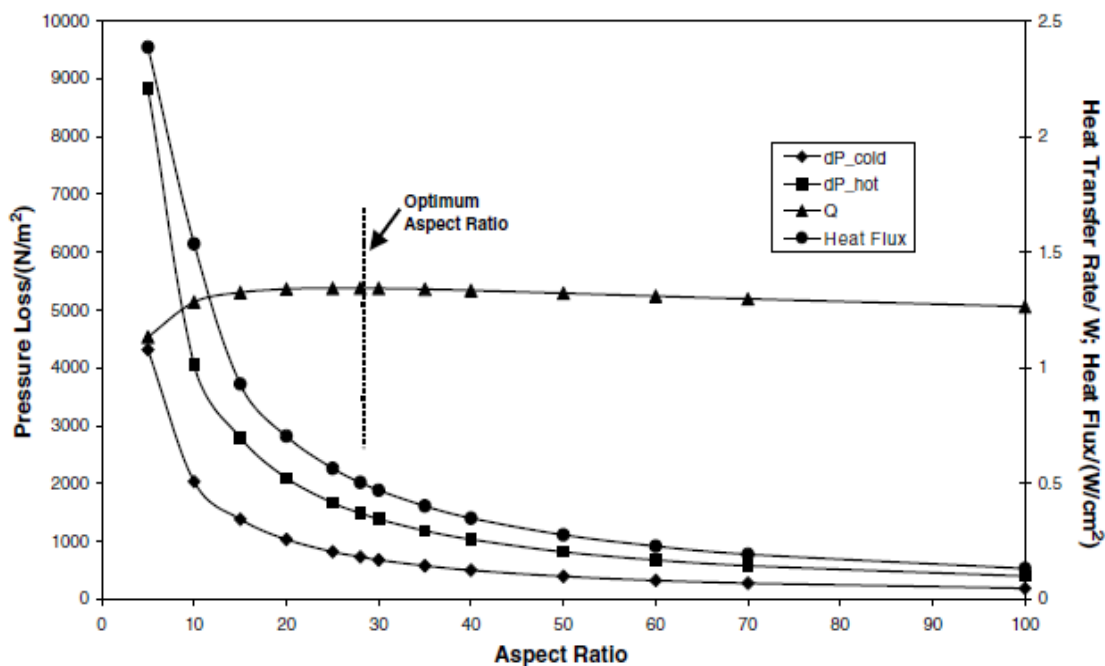


Διάγραμμα 5.4.1: Variation of pressure loss, heat transfer rate and heat flux with channel aspect ratio (constant volume)

Είναι φανερό από το διάγραμμα, ότι καθώς αυξάνεται ο AR, παρουσιάζεται μία γρήγορη μείωση της ροής θερμότητας, μαζί με μία ταυτόχρονη αύξηση της πτώσης της πίεσης. Καθώς αυτοί οι δύο παράγοντες παρουσιάζουν αντίθετη τάση, θα πρέπει να υπάρχει μία ισορροπία ανάμεσά τους κατά την επιλογή του βέλτιστου AR. Έτσι, έχει σημειωθεί το βέλτιστο εύρος τιμών του AR πάνω στο διάγραμμα (A`B`) και παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές των διαστάσεων των μικρο-αγωγών εντός αυτού του εύρους.

- (1) Optimal height = 3.38 mm, optimal width = 0.37 mm, AR = 9.1,
- (2) Optimal height = 4.03 mm, optimal width = 0.31 mm, AR = 13.0,
- (3) Optimal height = 4.46 mm, optimal width = 0.28 mm, AR = 15.9,
- (4) Optimal height = 5.00 mm, optimal width = 0.25 mm, AR = 20.0.

β) Μεταβλητός όγκος των μικρο-αγωγών: Σε αυτή την μελέτη ο όγκος του εναλλάκτη μεταβάλλεται, αλλά φυσικά μέσα στα επιτρεπτά όρια ($1\mu\text{m} \leq d_h \leq 1000\mu\text{m}$). Το μήκος των μικρο-αγωγών παρέμεινε σταθερό, ενώ η διατομή τους έγινε μεταβλητή. Ακόμα, ο AR μεταβαλλόταν με την μεταβολή του ύψους των αγωγών, ενώ το πλάτος παρέμενε σταθερό 0,25mm. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 5.4.2: Variation of pressure loss, heat transfer rate and heat flux with channel aspect ratio (variable volume)

Καθώς ο AR αυξάνει παρατηρείται μία αύξηση του ποσού μεταφοράς θερμότητας έως ένα μέγιστο σημείο, μετά από το οποίο εντοπίζεται μείωση, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μείωση της ταχύτητας του ρευστού (συνεπώς και του αριθμού Reynolds της ροής) που οδηγεί σε ένα χαμηλότερο συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας. Η διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα εντοπίζει τον βέλτιστο AR που αντιπροσωπεύει το μέγιστο ποσό μεταφοράς θερμότητας.

γ) Βέλτιστες διαστάσεις: Μετά τον προσδιορισμό του βέλτιστου AR, χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική προσέγγιση του Samalam, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

Για $AR \leq 10$ οι βέλτιστες διαστάσεις δίνονται:

$$w_c = b, \quad \text{and} \quad w_s = H \sqrt{\frac{k_f Nu}{6k_s}}$$

$$\text{where } b^4 = \frac{12\mu k_f Nu l^2}{\rho c_p \Delta P}.$$

The above is valid for

$$\frac{H}{b} \ll \pi^2 \left[\frac{k_s}{6k_f Nu} \right]^{1/2}.$$

Για $AR > 10$:

$$w_s = \frac{w_c}{2}, \quad \text{and} \quad w_c = \frac{2^{1/6} b^{4/3}}{\alpha^{1/6} H^{1/3}}, \quad \text{where } \alpha = \frac{k_f Nu}{k_s}.$$

$$\text{με} \quad \frac{H}{b} \gg \frac{\pi^{3/4}}{(2\alpha)^{1/4}}.$$

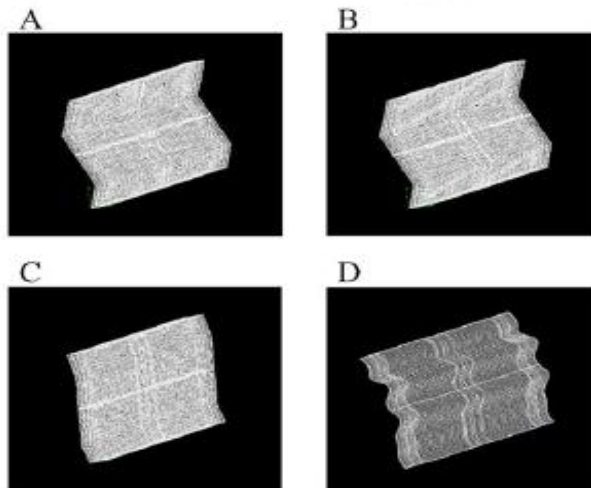
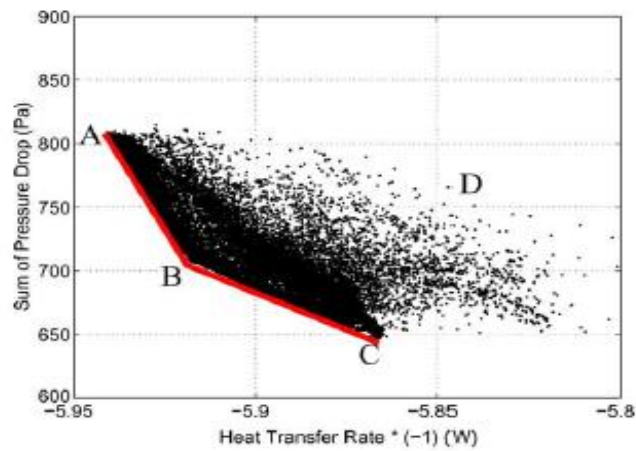
Έτσι, τα τελικά αποτελέσματα για τη θερμή και ψυχρή μεριά των μικρο-αγωγών είναι:

$$\text{Hot side: } H = 14.80 \text{ mm}, \quad w = 0.53 \text{ mm}, \quad s = 0.26 \text{ mm},$$

$$\text{Cold side: } H = 11.76 \text{ mm}, \quad w = 0.42 \text{ mm}, \quad s = 0.21 \text{ mm}.$$

Η δεύτερη μέθοδος είναι πιο περίπλοκη και εστιάζει επιπρόσθετα στο βέλτιστο σχήμα του μικρο-εναλλάκτη. Χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος NSGA-II για τον προσδιορισμό του μετώπου Pareto που είναι η βέλτιστη καμπύλη ανάμεσα στις δύο προδιαγραφές του προβλήματος (τη μεταφορά θερμότητας και το άθροισμα της πτώσης πίεσης). Ξεκινώντας από ένα αρχικό σχήμα, τα εργαλεία

βελτιστοποίησης μπορούσαν να δημιουργούν διαφορετικές γεωμετρίες, έως να φτάσουν στη βέλτιστη. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου.



Point	$HTR(W)$	$\Delta P_h(Pa)$	$\Delta P_c(Pa)$	Heat Flux ($10^{-8}W/m^2$)
A	5.941	458.6	350.4	1.106
B	5.918	386.6	321.1	1.101
C	5.866	357.5	289.4	1.161
D	5.840	431.6	343.1	1.031

Πίνακας 5.4.1: Αποτελέσματα της δεύτερης μεθόδου

Παρουσιάζονται τρεις αντιπροσωπευτικές λύσεις πάνω στο μέτωπο Pareto (κόκκινη γραμμή) και μία μακριά από αυτό. Είναι φανερό, ότι κάθε γεωμετρική αλλαγή που αυξάνει το ποσό μεταφοράς θερμότητας οδηγεί σε αύξηση της πτώσης της πίεσης και αντίστροφα. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητες οι ανεπτυγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό ενός μικρο-εναλλάκτη.

B) Πειραματική διερεύνηση της ροής και της μεταφοράς θερμότητας σε έναν μικρο-εναλλάκτη θερμότητας μονοφασικής υγρής ροής. [36]

Στα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα, παραπάνω από την μισή ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια και στην συνέχεια χάνεται στο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, η δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος (HCPV) που θα εκμεταλλεύεται και την ενέργεια αυτή, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Η εταιρεία **Zenith Solar** έχει αναπτύξει την τεχνολογία αυτή, ολοκληρώνοντας την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος στο Kibbutz Yavne του Ισραήλ. Συγκεκριμένα, το σύστημα αποτελείται από δύο παραβολικά πιάτα 11m^2 στηριγμένα σε βάση ανίχνευσης του ήλιου δύο αξόνων (dual axis solar tracker) και έναν δέκτη, ο οποίος αποτελείται από ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επιστρώσεων και από πίσω τους έναν μικρο-εναλλάκτη θερμότητας. Η απόδοση του συστήματος ξεπερνάει το 72% και παρουσιάζεται στην παρακάτω φωτογραφία.

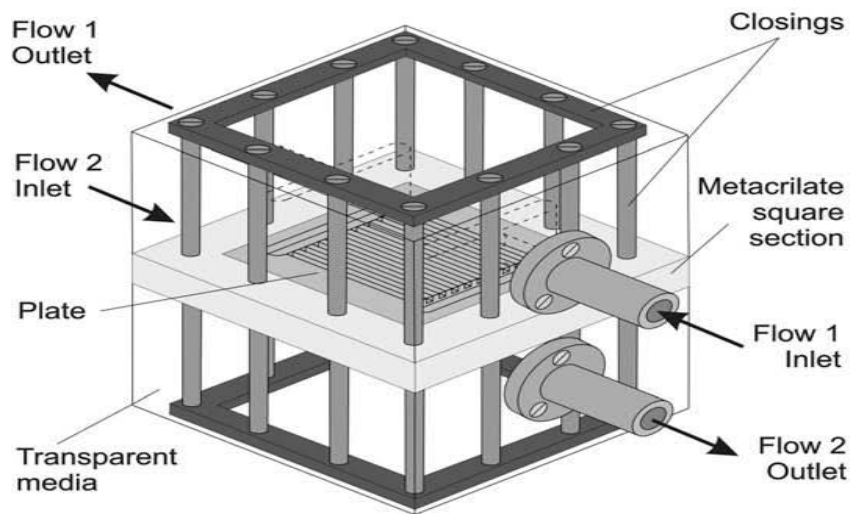


Εικόνα 5.4.1: Υβριδικό σύστημα εταιρίας Zenith Solar

Έτσι, στο συγκεκριμένο paper θα μελετηθούν τα κριτήρια σχεδιασμού ενός μικρο-εναλλάκτη θερμότητας. Συγκεκριμένα, θα ελέγχουν δύο μικρο-εναλλάκτες που αποτελούνται από μικρο-αγωγούς 100×100 και 200×200 μm αντίστοιχα και θα μελετηθεί η συμπεριφορά τους όσον αφορά την μεταφορά θερμότητας και την πτώση της πίεσης. Η μελέτη θα γίνει ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο και όχι στο εσωτερικό των μικρο-αγωγών.

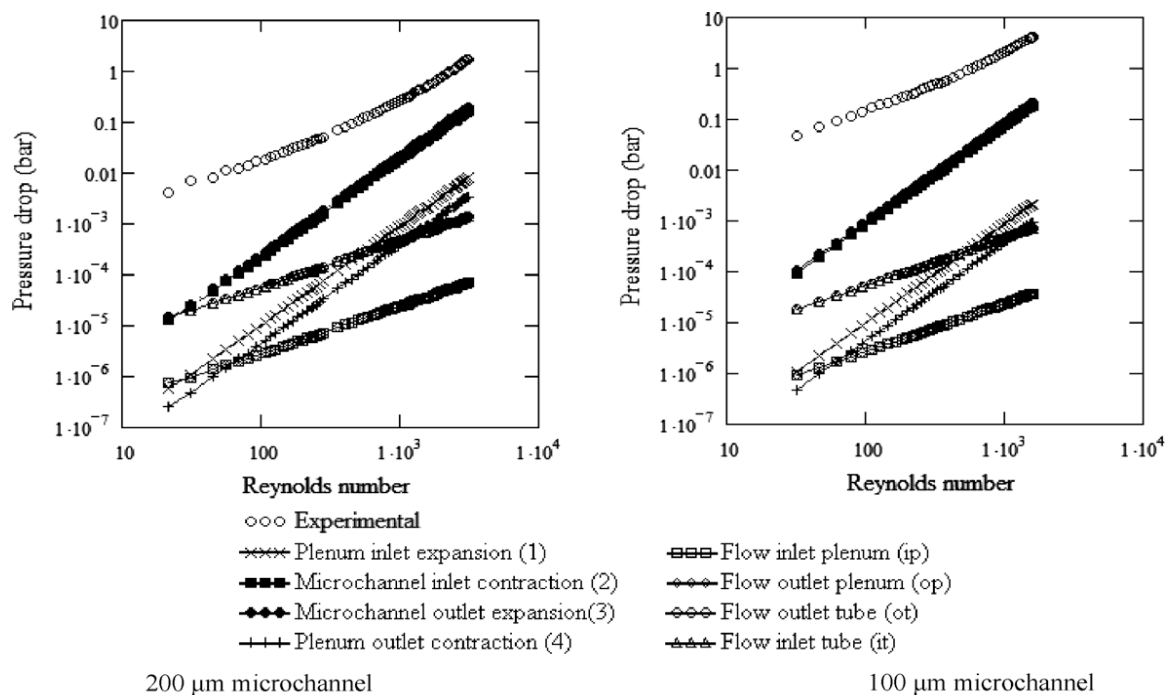
Ο πρώτος (α) εναλλάκτης έχει 100 μικρο-αγωγούς με πλευρά $100\mu\text{m}$ και τετραγωνική διατομή για κάθε πλευρά της πλάκας και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ ο δεύτερος (β) έχει 50 μικρο-αγωγούς με πλευρά $200\mu\text{m}$. Το μήκος όλων των μικρο-αγωγών είναι 16mm . Το πάχος της πλάκας είναι 4mm , έτσι ώστε να μην περιορίζεται ο μηχανισμός των αγωγών και είναι κατασκευασμένη από υλικό με μεγάλη

αγωγιμότητα. Η υδροδυναμική και θερμική συμπεριφορά των δύο μικρο-εναλλακτών αναλύεται για ένα μεγάλο εύρος αριθμών Reynolds και των δύο ρευμάτων.



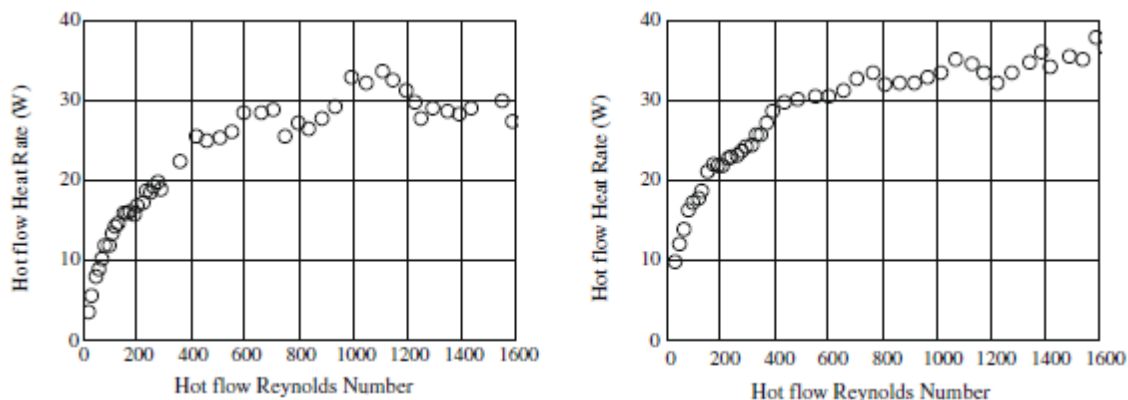
Σχήμα 5.4.2: Design of the micro-heat exchanger, showing the principal parts and a picture of the 100 μm prototype

Πτώση πίεσης στους μικρο-αγωγούς: Πτώση της πίεσης δεν συμβαίνει μόνο κατά μήκος των μικρο-αγωγών, αλλά κατά μήκος ολόκληρου του εναλλάκτη. Όμως, σημαντική είναι η πτώση της πίεσης που δημιουργείται μόνο στην είσοδο και στην έξοδο των μικρο-αγωγών, λόγω της ξαφνικής συστολής και διαστολής αντίστοιχα και στο εσωτερικό τους. Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τις μεταβολές αυτές σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds της κάθε ροής.

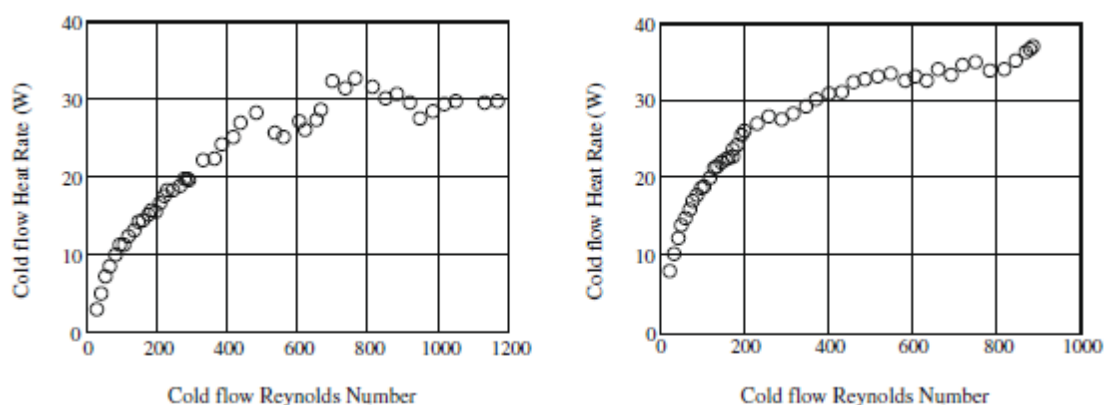


Διάγραμμα 5.4.3: Pressure drop along the heat exchanger

Πειραματικά αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας: Η μεταφερόμενη θερμότητα από τον μικρο-εναλλάκτη μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση $Q = m C_p (T_{in} - T_{out})$. Τα πειραματικά αποτελέσματα για την μεταφορά θερμότητας από το θερμό ρεύμα στο ψυχρό παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

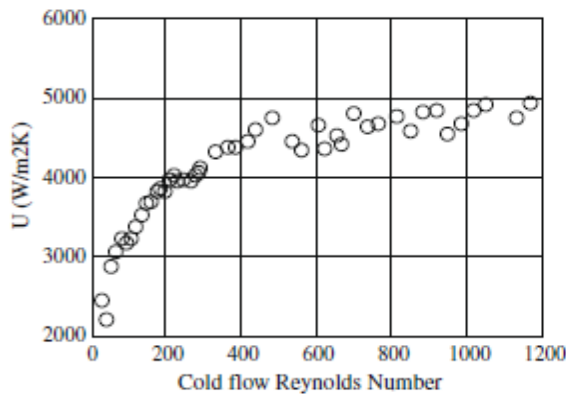


Διάγραμμα 5.4.4: Experimental measurements of the heat transferred from the hot flow

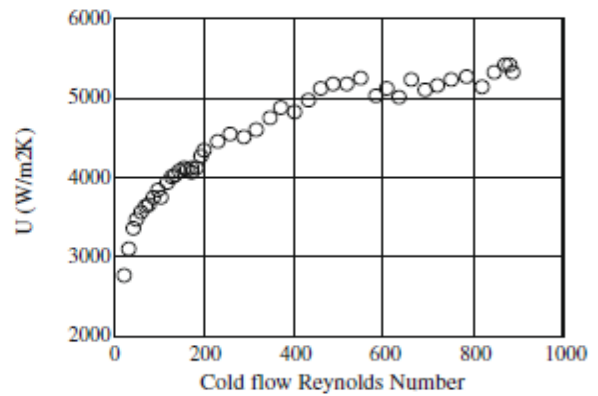


Διάγραμμα 5.4.5: Experimental measurements of the heat transferred to the cold flow

Θερμική αποτελεσματικότητα των μικρο-εναλλακτών: Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας των δύο εναλλακτών. Παρατηρείται ότι για μικρούς αριθμούς Reynolds, ο συντελεστής αυξάνει απότομα, ενώ για μεγαλύτερους ($Re > 400$) σταθεροποιείται σε τιμές που είναι περίπου ίδιες και για τους δύο εναλλάκτες (λίγο μεγαλύτερες στον (α)).



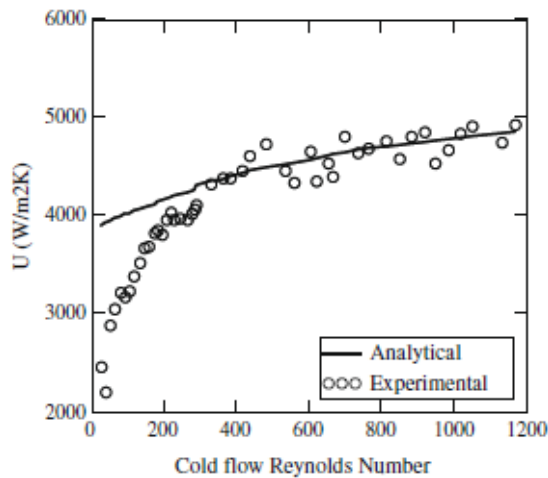
200 microns heat exchanger



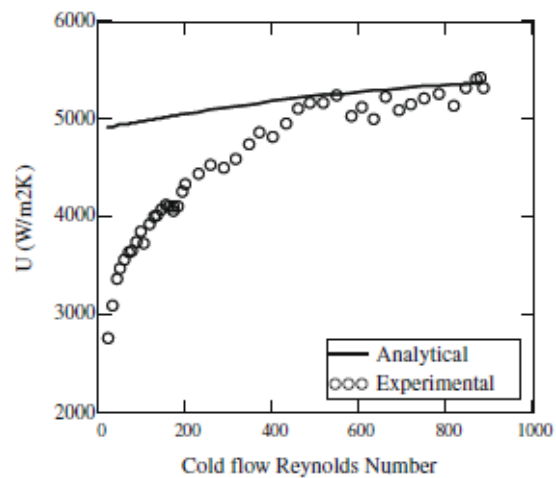
100 microns heat exchanger

Διάγραμμα 5.4.6: Overall heat transfer coefficients.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών που προέκυψαν από αναλυτικές εξισώσεις της βιβλιογραφίας. Και στους δύο εναλλάκτες οι αναλυτικές τιμές του συντελεστή συμφωνούν με τις πειραματικές για μεγάλους αριθμούς Reynolds, ενώ για μικρούς παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις. Αυτό συμβαίνει εντονότερα στον (α) εναλλάκτη ($Re < 400$ για τον (α) και $Re < 200$ για τον (β)).



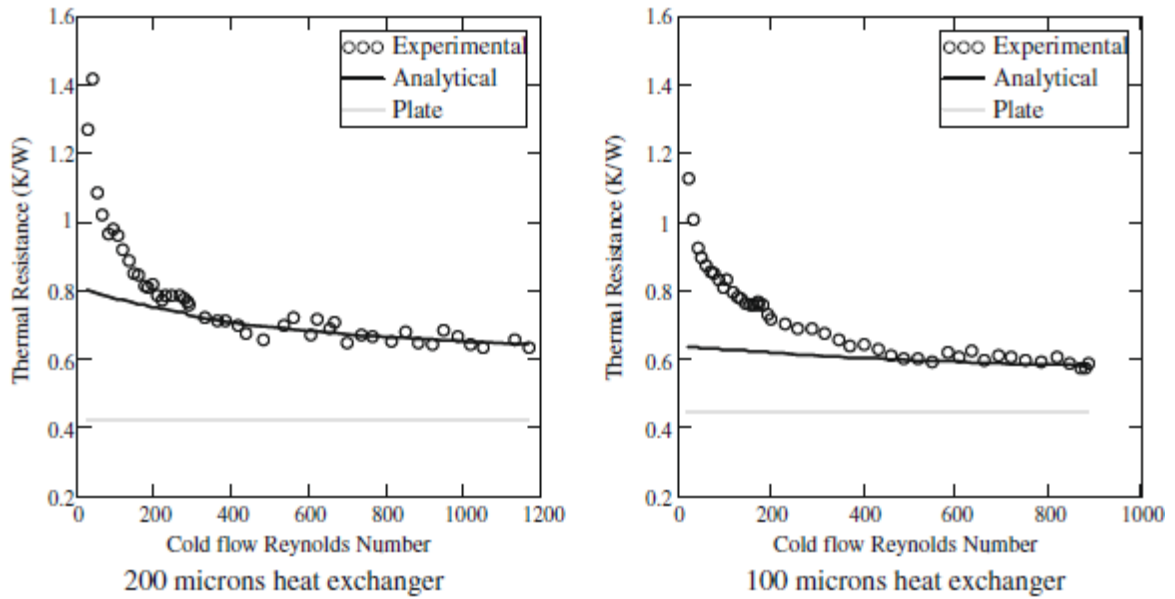
200 microns heat exchanger



100 microns heat exchanger

Διάγραμμα 5.4.7: Experimental and analytical overall heat transfer coefficients

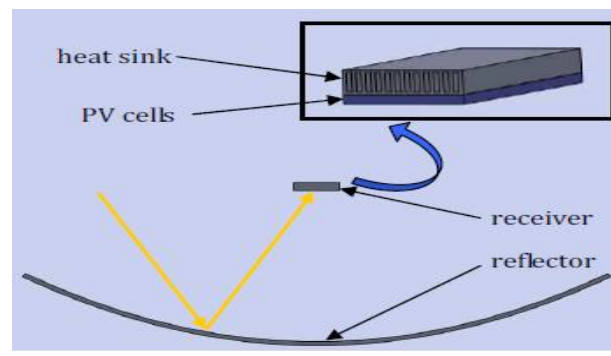
Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται αν εξετάσουμε τα παρακάτω διαγράμματα για τις συνολικές θερμικές αντιστάσεις. Γίνεται έτσι κατανοητό ότι η αντίσταση της θερμικής αγωγιμότητας της πλάκας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό ενός μικρο-εναλλάκτη. Η κατασκευαστική διαδικασία θα πρέπει να επιτρέπει μικρότερο πάχος της πλάκας (περίπου 1mm) και να χρησιμοποιούνται υλικά με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα (περίπου 100W/mK).



Διάγραμμα 5.4.8: Total thermal resistances and plate conduction resistance

Γ) Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση ενός μικρο-εναλλάκτη θερμότητας για ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό/θερμικό (CPVT) σύστημα. [37]

Το συγκεκριμένο επιστημονικό άρθρο πραγματεύεται την μελέτη ενός μικρο-εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται για ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα, εξυπηρετώντας δύο σκοπούς: α) την ψύξη των ηλιακών κυψελών του πλαισίου και β) την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας. Ο μικρο-εναλλάκτης βρίσκεται κολλημένος στο πίσω μέρος του πλαισίου, το οποίο δέχεται μία σταθερή ροή ηλιακής ακτινοβολίας. Το 15- 20% της ακτινοβολίας αυτής απορροφάται από τις ηλιακές κυψέλες και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα, την οποία εκμεταλλεύεται ο μικρο-εναλλάκτης.



Εικόνα 5.4.2: Εικόνα του CPVT συστήματος

Το εμβαδόν του μικρο-εναλλάκτη, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού (237 W/mK), είναι $0.5 \times 0.06 \text{ m}^2$, ενώ του παραβολοειδούς ανακλαστήρα 1 m^2 , ώστε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να δέχεται σταθερά ακτινοβολία ισχύος 33 kW/m^2 . Για ψυκτικό μέσο έχει επιλεγεί το νερό με παροχή 30 ml/s , η οποία είναι αρκετή για την θέρμανση του νερού στους 60°C για οικιακή χρήση. Ο αριθμός των μικρο-αγωγών του εναλλάκτη αποφασίζεται από τον παρακάτω τύπο:

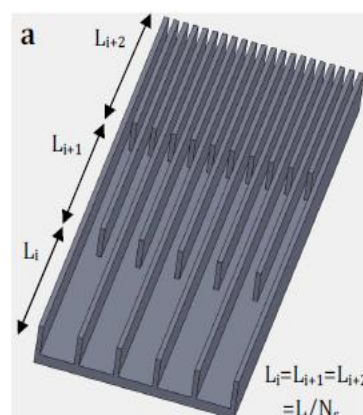
$$N = \frac{W_{tot} - \alpha W_{ch}}{(a+1) W_{ch}}, \text{ όπου } \alpha = \frac{W_w}{W_{ch}}, W_{ch} \rightarrow \text{πλάτος του καναλιού,}$$

$W_w \rightarrow$ το πλάτος του τοιχώματος του καναλιού και $W_{tot} \rightarrow$ το συνολικό

πλάτος, ενώ ο αριθμός Reynolds της ροής υπολογίζεται:

$$Re = \frac{(\dot{V}/N) D_h}{A_{ch} \nu}.$$

Ο μικρο-εναλλάκτης μελετάται με δύο ειδών γεωμετρίες των μικρο-αγωγών: μία με σταθερό πλάτος (FW_w) και μία με μεταβλητό (VW_w). Επιπρόσθετα, αρχικά παρουσιάζεται μία μονοδιάστατη μελέτη της ροής στο εσωτερικό του μικρο-εναλλάκτη και στην συνέχεια μία τρισδιάστατη μόνο για τη γεωμετρία με τους αγωγούς σταθερού πλάτους.



Εικόνα 5.4.3: Αυλάκια με μεταβλητό πλάτος

Μονοδιάστατη ανάλυση: Για την βελτιστοποίηση αρχικά γίνεται αριθμητική προσέγγιση με αναλυτικές εξισώσεις και στην συνέχεια με ανεπτυγμένους αλγόριθμος (Pareto front). Οι τιμές που παίρνει το πλάτος για την βελτιστοποίηση δεν ξεπερνάει το παρακάτω εύρος:

$$100\mu\text{m} \leq W_{ch} \leq 500\mu\text{m}$$

$$100\mu\text{m} \leq W_w \leq 500\mu\text{m}$$

$$1000\mu\text{m} \leq W_{ch,mit} \leq 5000\mu\text{m}$$

Τα αποτελέσματα της θερμικής αντίστασης για την μεταφορά θερμότητας και της πτώσης της πίεσης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα και συγκρίνονται επίσης, με τις πειραματικές τιμές που είχαν

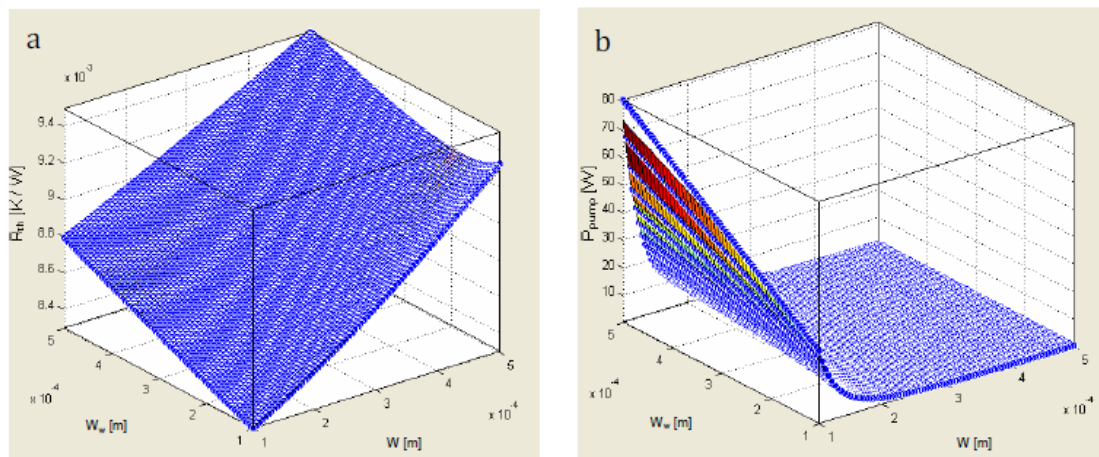
εκδώσει οι Tuckerman και Pease, οι οποίοι ερεύνησαν την συμπεριφορά ενός μικρο-εναλλάκτη πυριτίου με διαστάσεις $(1\text{cm}) \times (1\text{cm})$, με ψυκτικό υγρό νερό στους 296 K. Στον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε ότι τα δύο αποτελέσματα συμφωνούν αρκετά καλά μεταξύ τους.

Validation of the analytical model.

W_{ch} (μm)	W_w (μm)	H (μm)	q' (W/cm^2)	\dot{V}_{tot} (mL/s)	R_{th} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)		Δp (Pa)	
					Experimental	1-D model	Experimental	1-D model
56	44	320	181	4.7	0.110	0.110	103421	92620

Πίνακας 5.4.2: Αποτελέσματα μονοδιάστατης ανάλυσης

Το ύψος των μικρο-αγωγών επιλέχθηκε να είναι έξι φορές μεγαλύτερο από το πλάτος στους FW_{μ} και δύο φορές μεγαλύτερο στους VW_{μ} . Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη μορφή η θερμική αντίσταση και η πτώση της πίεσης για τον μικρο-εναλλάκτη FW_{μ} .



Διάγραμμα 5.4.9:

Response surfaces (a) for the thermal resistance and (b) for the pressure drop of the FW_{μ} heat sink.

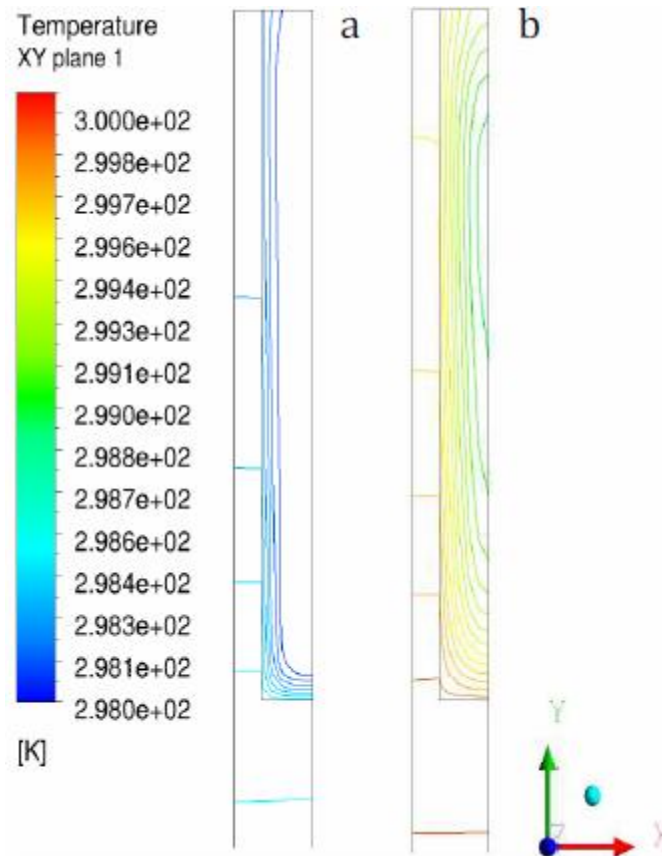
Τρισδιάστατη ανάλυση: Οι βέλτιστες γεωμετρικές παράμετροι του μικρο-εναλλάκτη FW_{μ} χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου. Επίσης, η κατασκευή του μοντέλου έγινε με τις υποθέσεις για ασυμπίεστη και στρωτή ροή, σταθερά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά για το ρευστό και το στερεό και ο αριθμός Reynolds της ροής να μην ξεπερνάει την τιμή 320. Τελικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικρο-εναλλάκτη FW_{μ} που θεωρήθηκαν τα βέλτιστα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της θερμικής αντίστασης και της πτώσης της πίεσης της μονοδιάστατης προσέγγισης :

Comparison of the numerical values to the analytical ones.

W_{ch} (μm)	W_w (μm)	H (μm)	Q (W/cm^2)	\dot{V}_{tot} (mL/s)	R_{th} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)		Δp (Pa)	
					Numerical	1-D model	Numerical	1-D model
314	169	1884	2.833	30.0	0.0090	0.0088	22809	21944

Πίνακας 5.4.3: Συγκριτικά αποτελέσματα αριθμητικών μετρήσεων με αυτά της μονοδιάστατης ανάλυσης

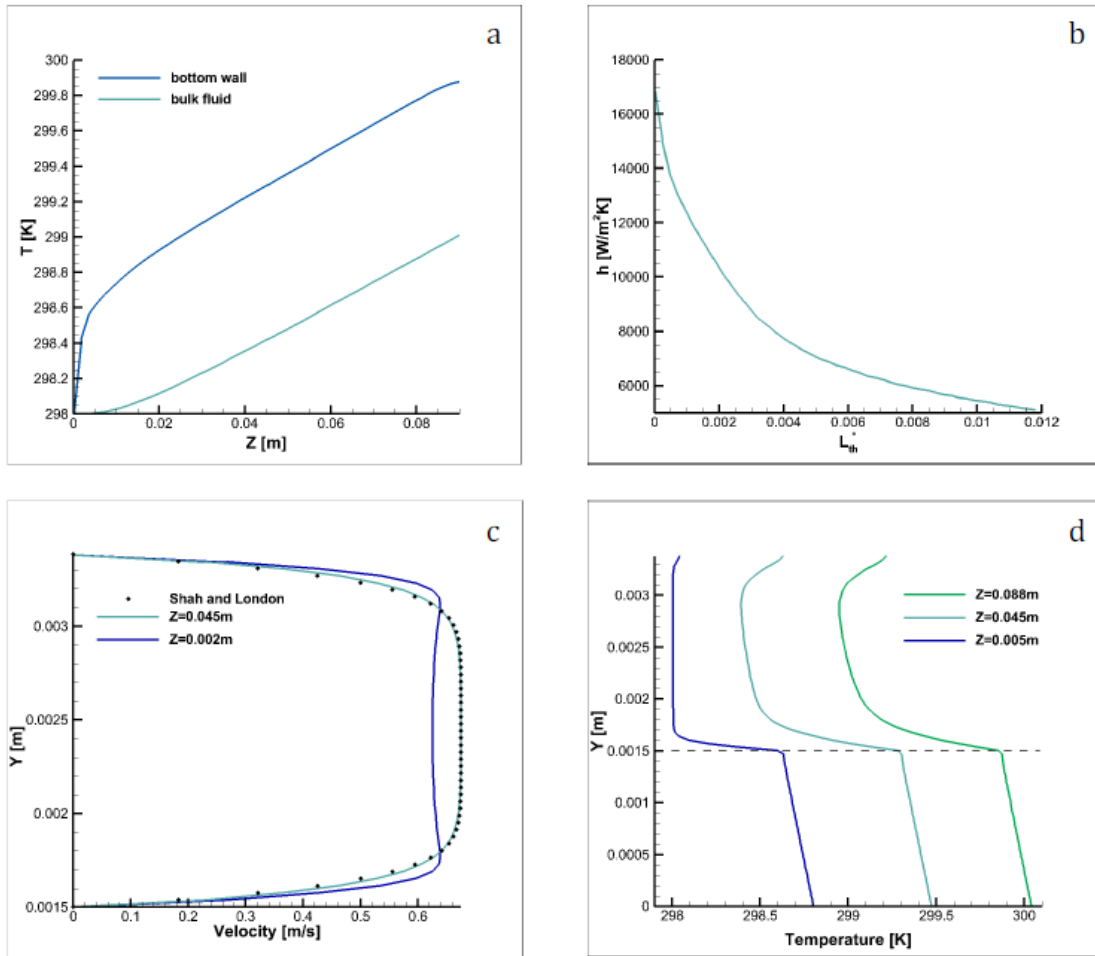
Θα σχεδιαστούν συνολικά 124 παράλληλοι μικρο-αγωγοί και ο αριθμός Reynolds που θα χαρακτηρίζει την ροή στον καθένα θα είναι 245 (ταχύτητα εισόδου 0.409 m/s). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικές όψεις, κοντά στην είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν, η ροή φτάνει την μέγιστη θερμοκρασία στην έξοδο του μικρο-αγωγού.



Εικόνα 5.4.4: Temperature contours on two planes, transversal to the flow: (a) $Z=0.002\text{m}$ and (b) $Z=0.088\text{m}$.

Τέλος, παρουσιάζονται και τα απαραίτητα διαγράμματα των θερμοκρασιών, του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και της ταχύτητας για την τελική γεωμετρία του μικρο-εναλλάκτη FW_{μ} .

Διαγράμματα 5.4.10:



Results on the central symmetry plane along the flow direction as obtained from the 3-D model: (a) bottom wall and bulk fluid temperature distributions, (b) local heat transfer coefficient in the developing region, (c) velocity profiles and (d) temperature profiles.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Το υπολογιστικό μέρος της παρούσας διπλωματικής ασχολείται αρχικά με το σχεδιασμό ενός μικρο-εναλλάκτη θερμότητας και στην συνέχεια με την προσομοίωση της ροής στο εσωτερικό του. Ο εναλλάκτης θα βρίσκεται κολλημένος στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό δύο βασικούς στόχους: α) την ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών και β) την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας για την θέρμανση νερού. Για το σχεδιαστικό μέρος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **SolidWorks 2011** και για την προσομοίωση το πρόσθετο **SolidWorks Flow Simulation**.

Ο σχεδιασμός του μικρο-εναλλάκτη αποτελεί βασικό παράγοντα για την συνολική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή της γεωμετρίας του γίνεται με γνώμονα τρεις παραμέτρους:

- Την θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του μικρο-εναλλάκτη
- Την ομοιομορφία της θερμοκρασίας στην πλάκα που έρχεται σε επαφή με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και
- Την πτώση της πίεσης του ρευστού στο εσωτερικό του.

Εδώ έχει γίνει ο σχεδιασμός τριών μικρο-εναλλακτών με διαφορετική γεωμετρία ο καθένας. Το πρόσθετο Flow Simulation επιτρέπει, με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ροής που παρέχει, την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας πάντα με γνώμονα τις παραπάνω παραμέτρους.

6.2 Το SolidWorks

6.2.1 Γενικά

Το SolidWorks αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μηχανολογικό πρόγραμμα, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται από περισσότερους από 1.3 εκατομμύρια μηχανικούς και σχεδιαστές και από περισσότερες από 130 χιλιάδες επιχειρήσεις παγκοσμίως. Διαθέτει ένα CAD (Computer-Aided Design) – CAE (Computer-Aided Engineering) – CAM (Computer-Aided Manufacturing) – FLOW λογισμικό, το οποίο αποβλέπει στον πλήρη σχεδιασμό μηχανημάτων, τόσο δισδιάστατα (2-D) όσο και τρισδιάστατα (3-D), αλλά και στην τεκμηριωμένη μελέτη αυτών.

6.2.2 Σχεδιασμός (Design)

Το SolidWorks παρέχει ένα πολύ έξυπνο και φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον σχεδίασης. Διαθέτει ένα ολοκληρωμένο σύστημα βοήθειας, αλλά και έτοιμα παραδείγματα σχεδίασης που διευκολύνουν το νέο χρήστη στην εκμάθηση του προγράμματος. Για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μηχανολογικού εξαρτήματος ή μηχανήματος είναι πολύ σημαντικό ότι δίνει την δυνατότητα για σχεδίαση, αρχικά των επιμέρους απλών εξαρτημάτων (parts) και έπειτα την εύκολη ενοποίησή τους στο αρχικό ζητούμενο (assemblies). Επιπρόσθετα, διαθέτει μία βιβλιοθήκη με έτοιμα εργαλεία συγκολλήσεων και μεταλλικών συσκευών, σχεδίασης καλουπιών, σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών και τυποποιημένων μηχανολογικών εξαρτημάτων (κοχλίες, ρουλεμάν, σπειρώματα, κτλ.), αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την ταχύτητα σχεδίασης. Τέλος, προσφέρει άριστη εποπτεία του αντικειμένου κατά την διάρκεια της σχεδίασης και επιτρέπει εύκολα και γρήγορα αλλαγές στο σχέδιο, αφού το κάθε βήμα σχεδίασης είναι διακριτό.

6.2.3 Προσομοίωση της ροής (Flow Simulation)

Το SolidWorks διαθέτει διάφορες πρόσθετες εφαρμογές παρέχοντας έτσι στον χρήστη την δυνατότητα να επεξεργάζεται τα μηχανήματα που κατασκευάζει εύκολα και γρήγορα. Ένα από τα πρόσθετα αυτά είναι και το Flow Simulation. Το πρόσθετο αυτό επιτρέπει στον χρήστη να παρακάμπτει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Προσομοιώνει την ροή του ρευστού, την μετάδοση θερμότητας και τις δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα (internal analysis), υπολογισμοί δηλαδή που είναι καθοριστικοί για την επιτυχία του σχεδιασμού. Επιπλέον, αναλύει τις επιπτώσεις που έχει η ροή του ρευστού στο περιβάλλον γύρω από το αντικείμενο που μελετάται (external analysis). Τέλος, παρέχει πλήρη εποπτεία του αντικειμένου στον χρήστη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και στην συνέχεια προβάλλει τα αποτελέσματα όλων των παραμέτρων σε πίνακες και διαγράμματα.

6.3 Σχεδιασμός των μικρο-εναλλακτών

6.3.1 Προσδιορισμός αρχικών παραμέτρων

Ο μικρο-εναλλάκτης θα βρίσκεται, όπως έχει προαναφερθεί, κολλημένος στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Το

συγκεντρωτικό πιάτο θα έχει εμβαδόν 1m^2 και θα δέχεται ισχύ $1000\text{W}/\text{m}^2$ από την ηλιακή ακτινοβολία. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει επιλεγεί να έχει διαστάσεις $4.5 \times 4.5\text{cm}^2$ ώστε να επιτυγχάνεται συγκέντρωση περίπου 500 ήλιων (suns), το οποίο υπολογίστηκε ως εξής:

$$S_{\text{pv}} = \frac{1\text{m}^2}{500} = 0.002\text{m}^2 = 20\text{cm}^2 \approx 4.5 \times 4.5\text{cm}^2$$

Οπότε το φωτοβολταϊκό θα δέχεται ισχύ $500\text{ kW}/\text{m}^2$ ή 1000 W . Οι ηλιακές κυψέλες τριπλής στρώσης έχουν επιλεγεί να έχουν απόδοση 30% και έτσι αμελώνοντας τις απώλειες, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο μικρο-εναλλάκτης θα δέχεται στην πλάκα που θα έρχεται σε επαφή με το πλαίσιο 700 W .

Επιπρόσθετα, αν θεωρήσουμε ότι το νερό εισέρχεται με θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C) στον μικρο-εναλλάκτη, θέλουμε να θερμανθεί στο εσωτερικό του κατά 50°C και άρα να εξέλθει περίπου με θερμοκρασία 70°C . Τελικά, με τα δεδομένα αυτά προκύπτει η παροχή του νερού με τον εξής τρόπο:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{700\text{ J/s}}{4.2\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} 50\text{K}} \Leftrightarrow \dot{m} = 0.0033333\frac{\text{kg}}{\text{s}} \Leftrightarrow \dot{m} = 12\frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Τέλος, ο αριθμός των καναλιών του εναλλάκτη καθορίζεται από

$$\text{τον τύπο: } N = \frac{W_{\text{tot}} - \alpha W_{\text{ch}}}{(\alpha + 1) W_{\text{ch}}}, \text{ όπου } \alpha = \frac{W_w}{W_{\text{ch}}}, W_{\text{ch}} \rightarrow \text{πλάτος του καναλιού,}$$


$W_w \rightarrow$ το πλάτος του τοιχώματος του καναλιού και $W_{\text{tot}} \rightarrow$ το συνολικό

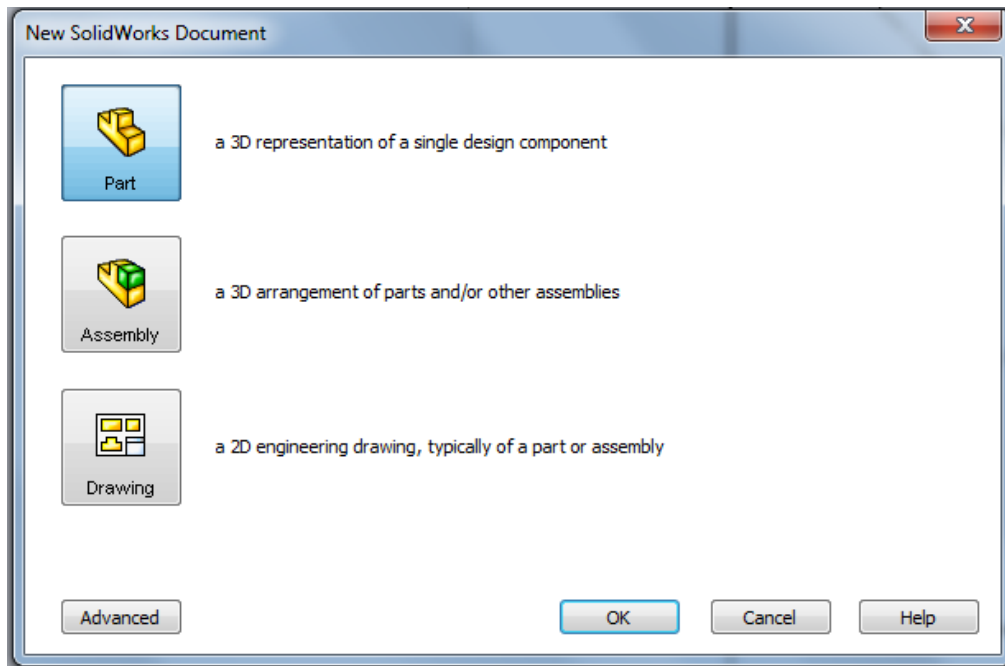
πλάτος. Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν τα αντίστοιχα πλάτη από το

επιστημονικό άρθρο 37 της βιβλιογραφίας [37] που είναι τα εξής:


$W_{\text{ch}} = 314\mu\text{m}$ και $W_w = 169\mu\text{m}$, οπότε προκύπτει $N = 91$ channels.

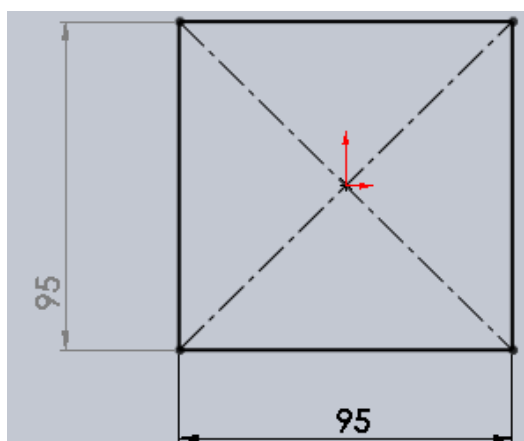
6.3.2 Σχεδιασμός του πρώτου μικρο-εναλλάκτη

Στο SolidWorks , για την δημιουργία ενός νέου σχεδίου, επιλέγουμε την εντολή New SolidWorks Document (). Στη συνέχεια επιλέγουμε αν επιθυμούμε να σχεδιάσουμε Part, Assembly ή Drawing, όπως φαίνεται παρακάτω:



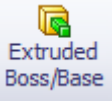

Εικόνα 6.3.1: Επιλογή τύπου σχεδίασης

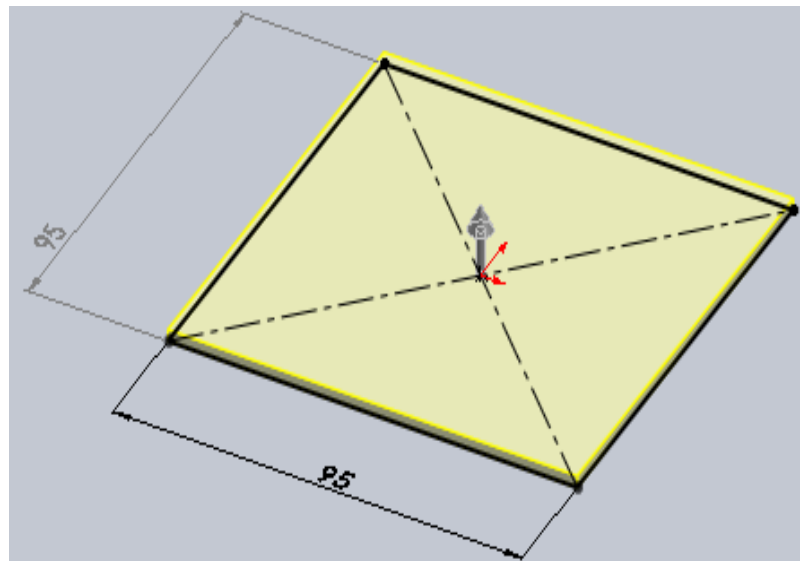
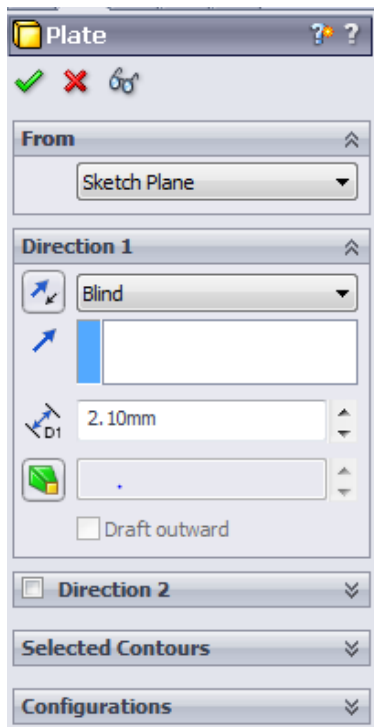
Για τον σχεδιασμό του πρώτου εναλλάκτη επιλέγουμε Part, ώστε να φτιάξουμε την κάτω πλάκα και ξεκινάμε με την δημιουργία ενός τετραγώνου με διαστάσεις $95 \times 95 \text{ mm}^2$, χρησιμοποιώντας την εντολή Center Rectangle ():



Εικόνα 6.3.2: Εντολή Center Rectangle

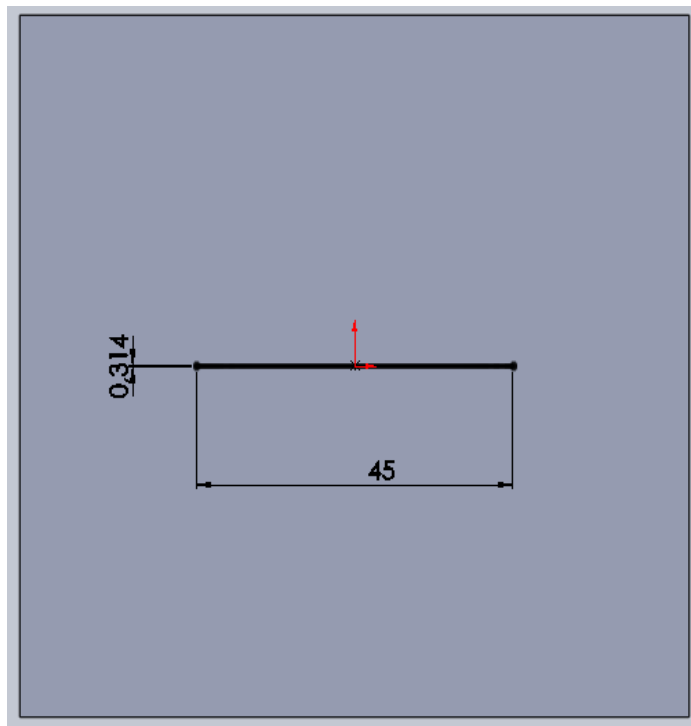
Στην συνέχεια με την εντολή

Extruded Boss/Base () μετατρέπουμε το σχέδιο σε τρισδιάστατο και επιλέγουμε το ύψος του τεμαχίου στο πεδίο D1 () ίσο με 2.10mm:

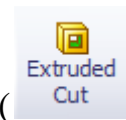


Εικόνα 6.3.3: Εντολή Extruded Boss/Base

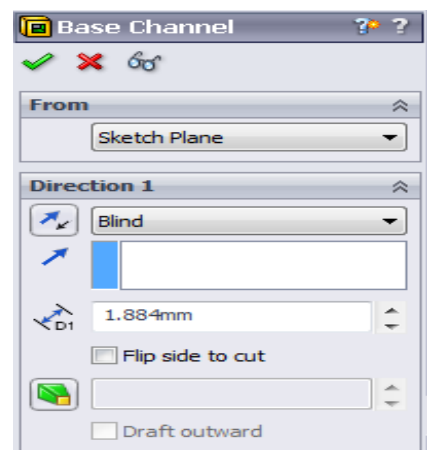
Έπειτα, στο κέντρο της πλάκας, χρησιμοποιώντας ξανά την εντολή **Center Rectangle**, κατασκευάζουμε ένα ορθογώνιο με τις διαστάσεις του καναλιού (micro channel):



και με την εντολή



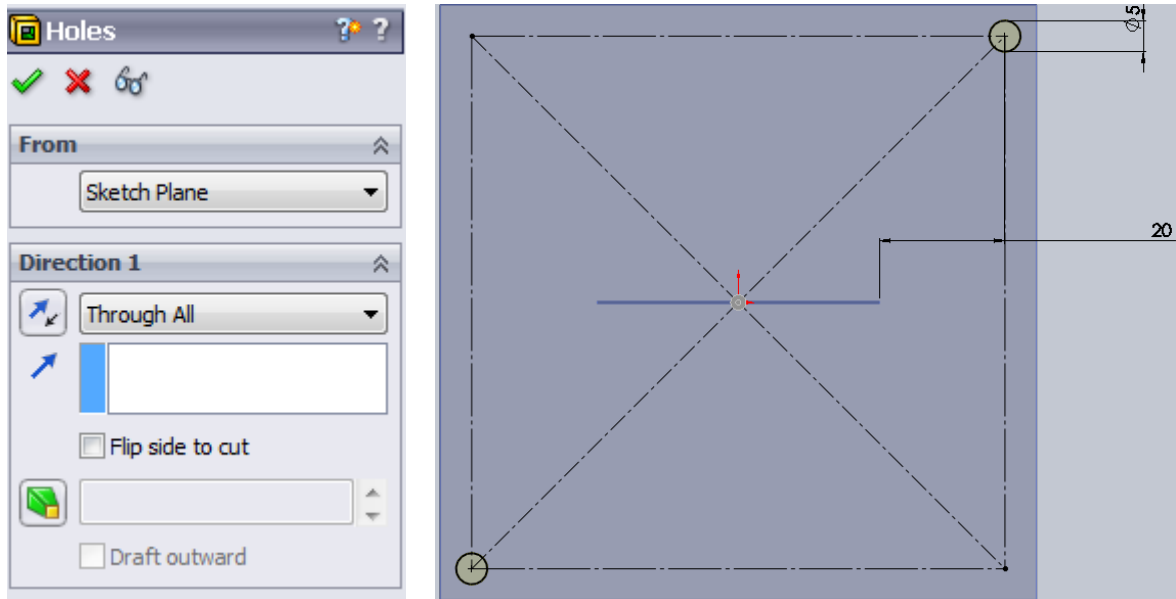
Extruded Cut (δημιουργούμε το κανάλι σε βάθος 1.884mm:



Εικόνα 6.3.4: Εντολή Extruded Cut για την δημιουργία του κεντρικού αυλακίου


Συνεχίζοντας, για την δημιουργία της εισόδου και της εξόδου του μικρο-εναλλάκτη, σχεδιάζουμε δύο κύκλους με διάμετρο 5mm και με την

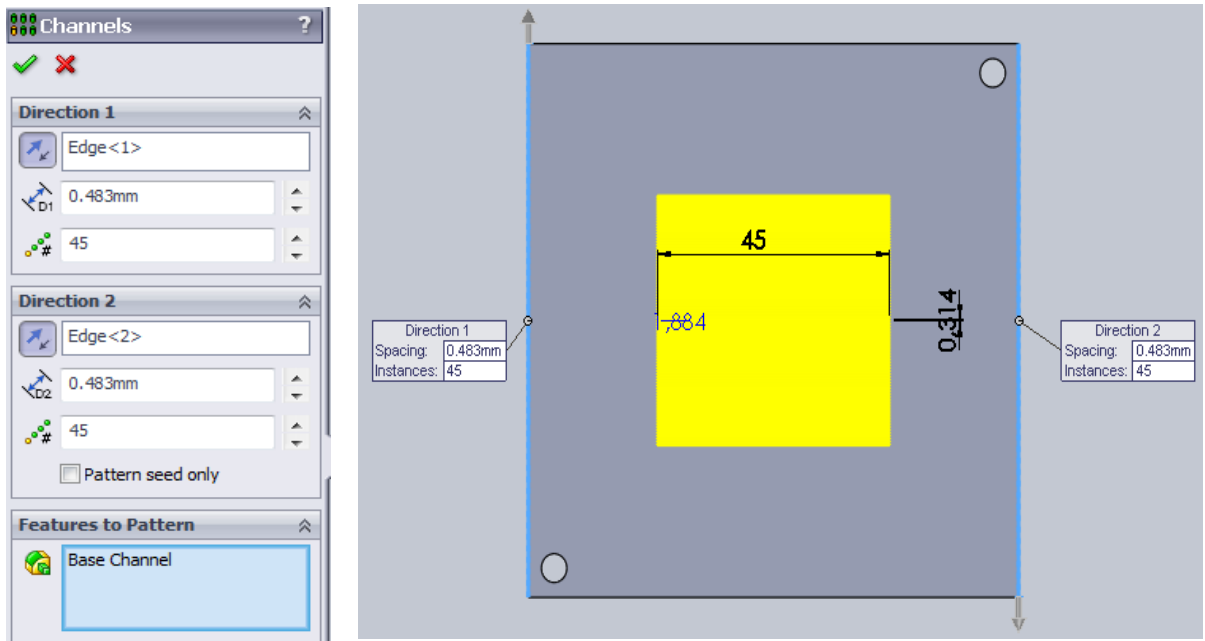
εντολή **extruded cut**, εφαρμόζοντας την επιλογή **through all** για το βάθος της κοπής, δημιουργούνται οι δύο απαιτούμενες οπές:



Εικόνα 6.3.5: Εντολή Extruded Cut για την δημιουργία των οπών εισόδου και εξόδου

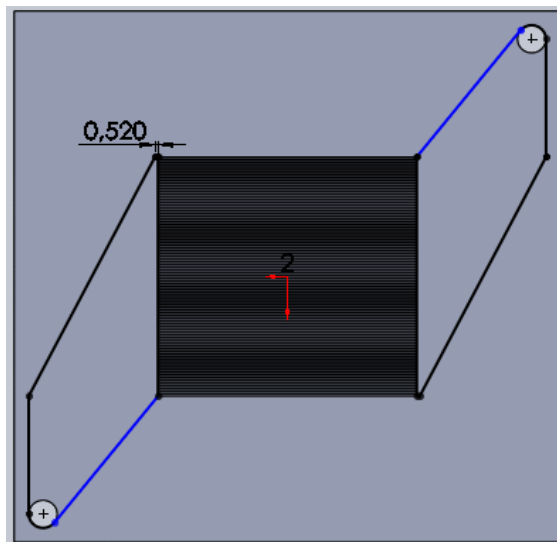
Έχει προαναφερθεί ότι απαιτούνται 91 αυλάκια για τον μικρο-εναλλάκτη. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, χρησιμοποιείται η

εντολή **Linear Pattern** () ,η οποία ουσιαστικά θα αντιγράψει 45 φορές προς την πάνω και την κάτω κατεύθυνση, το αυλάκι που έχει σχεδιαστεί, λαμβάνοντας υπόψη το πάχος του αυλακιού και του τοιχώματος($0.314+0.169 = 0.483$):



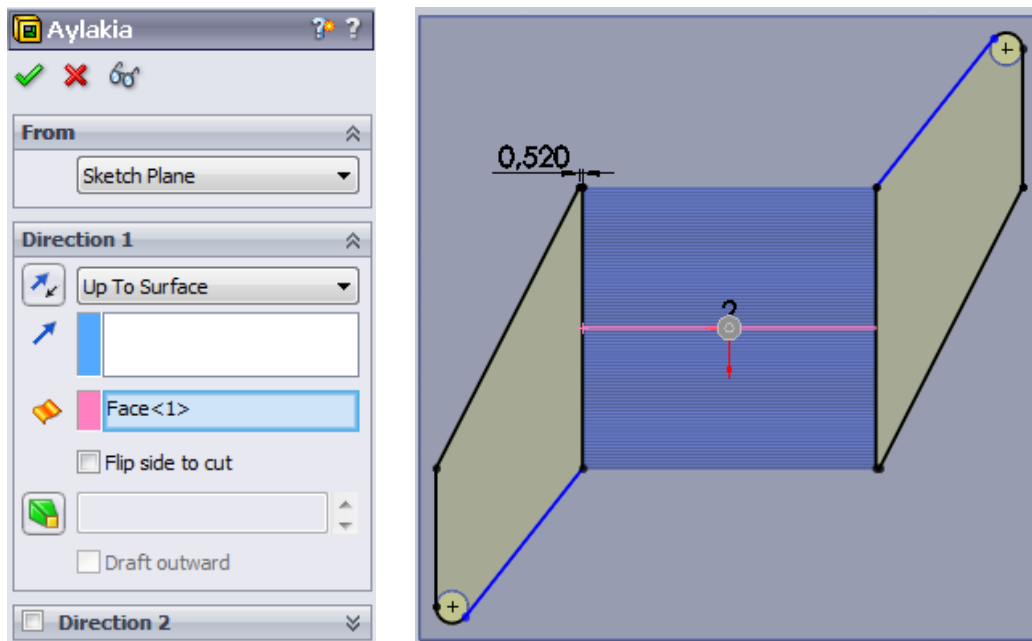
Εικόνα 6.3.6: Εντολή Linear Pattern

Τέλος, κατασκευάζεται η μορφοποίηση της εισόδου και της εξόδου για την ομαλοποίηση της ροής του ρευστού στα κανάλια, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



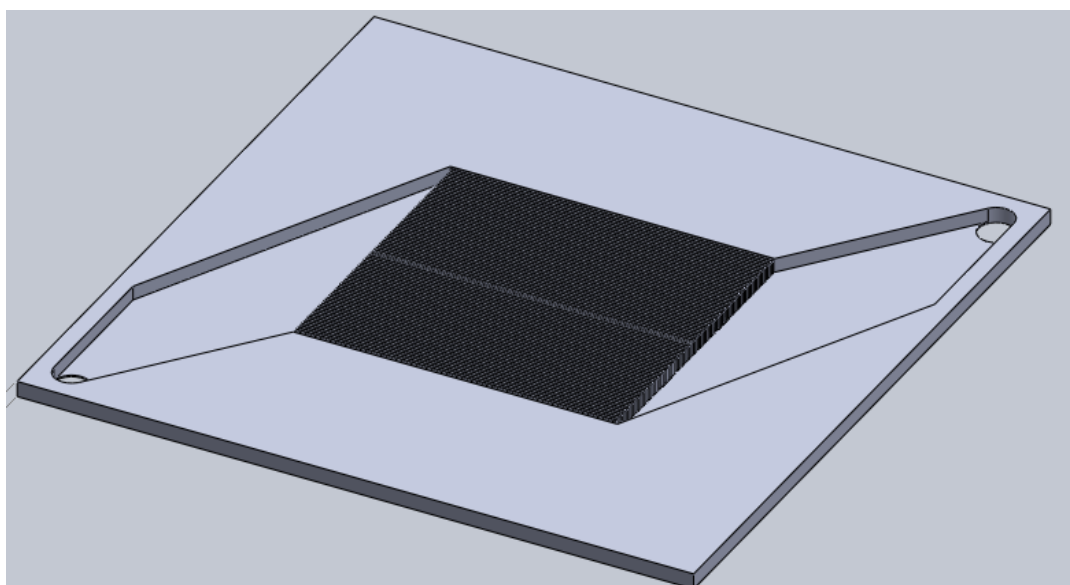
Εικόνα 6.3.7: Κατασκευή μορφοποίησης εισόδου και εξόδου

και στην συνέχεια με την εντολή extruded cut και την επιλογή -up to surface- κόβεται το υλικό μέχρι την επιφάνεια που έχουν φτάσει και τα αυλάκια:



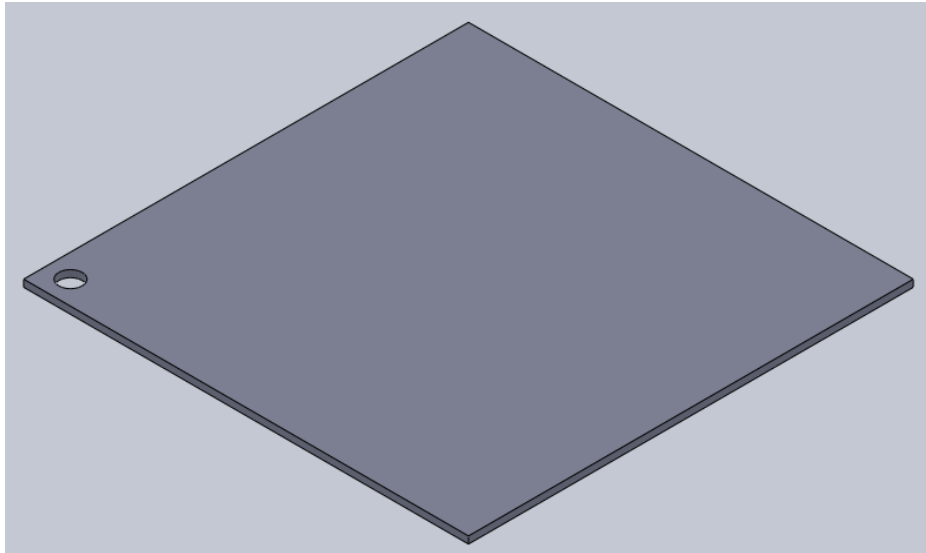
Εικόνα 6.3.8: Εντολή Extruded Cut

Έτσι, προκύπτει η τελική μορφή της κάτω πλάκας του πρώτου εναλλάκτη και παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα:

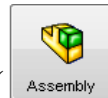


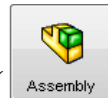

Εικόνα 6.3.9: Τελική μορφή 1^{ου} μικρο-εναλλάκτη

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης της κάτω πλάκας του μικρο-εναλλάκτη, χρειάζεται ακόμα και η σχεδίαση του καπακιού, το οποίο θα κλείσει την ροή. Το καπάκι θα έχει ακριβώς τις διαστάσεις της κάτω πλάκας και θα διαθέτει μόνο μία οπή στο κάτω αριστερό μέρος του, για να επιτρέπει την έξοδο της ροής.

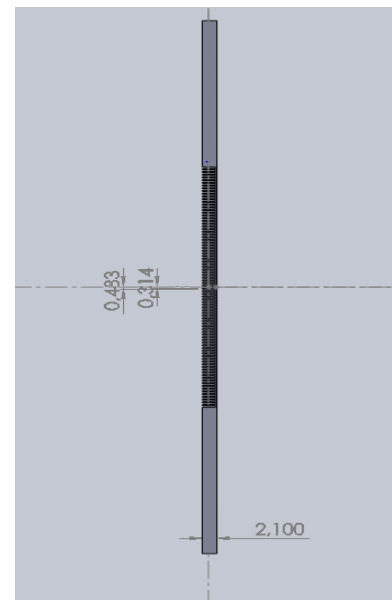
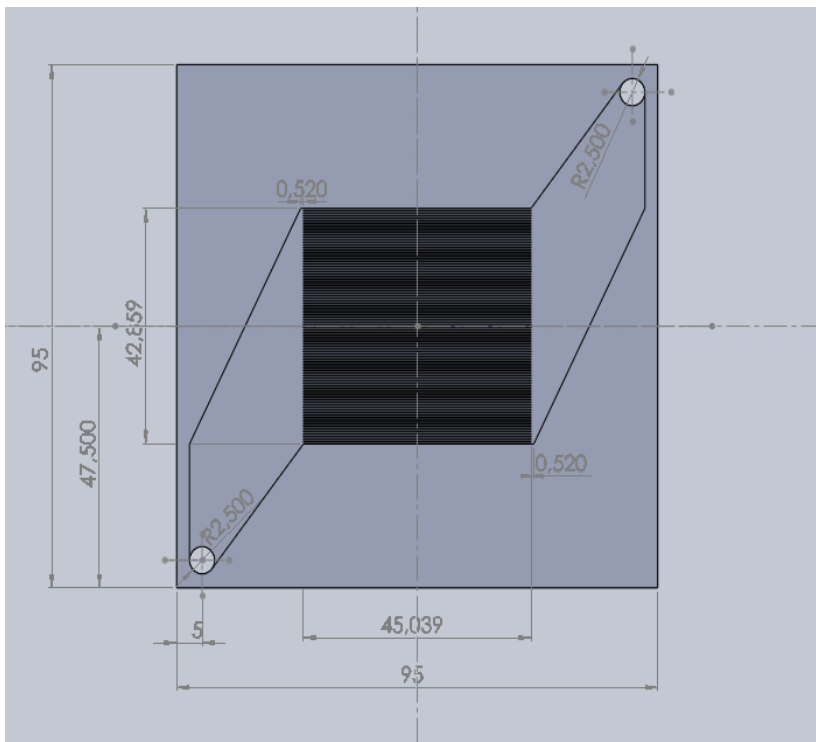


Εικόνα 6.3.10: Καπάκι του 1^{ου} μικρο-εναλλάκτη



Με την εντολή **–create an assembly** ()- και την επιλογή **mate** (),ενώνουμε τελικά συμμετρικά τα δύο τεμάχια και προκύπτει ο πρώτος μικρο-εναλλάκτης, έτοιμος πλέον για να εισαχθεί στο πρόσθετο Flow Simulation. Παρακάτω παραθέτονται τα κατασκευαστικά σχέδια της πλάκας και του καπακιού.

Πλάκα

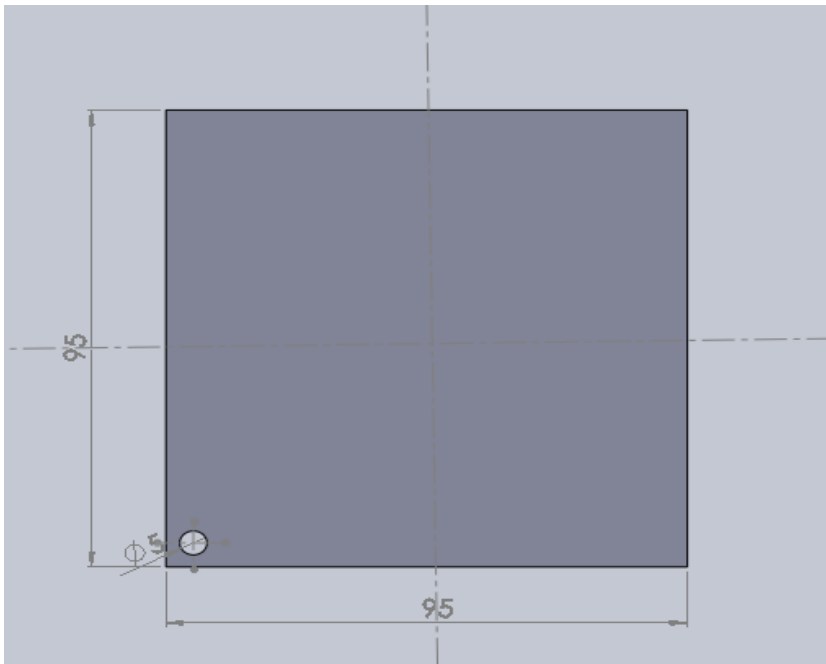


Σχέδιο 6.3.1(α):

Πρόοψη

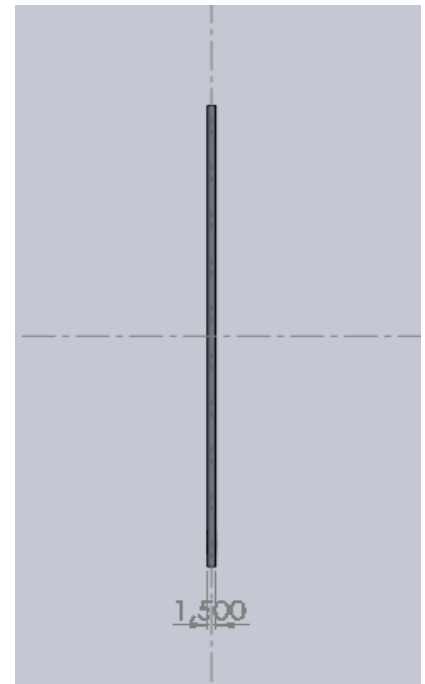
Πλάγια όψη σε τομή

Καπάκι



Σχέδιο 6.3.1 (β):

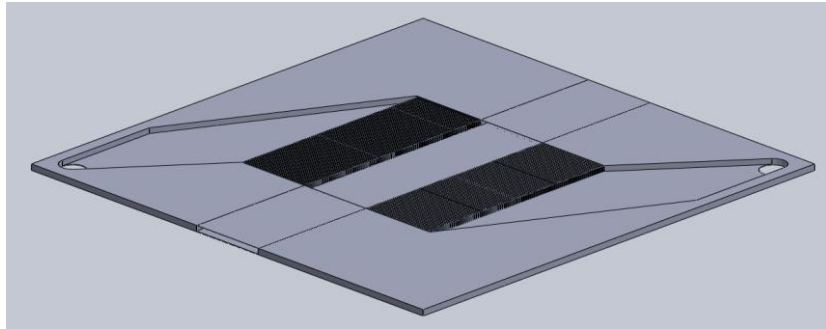
Πρόοψη



Πλάγια όψη

6.3.3 Σχεδιασμός του δεύτερου εναλλάκτη

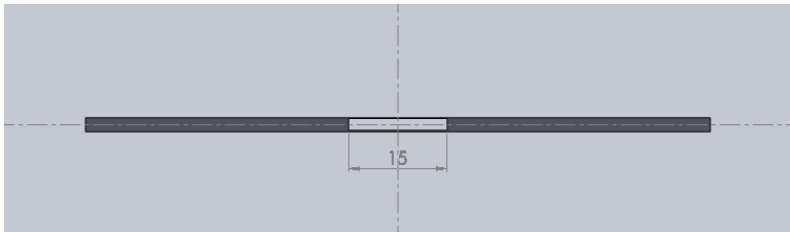
Η γεωμετρία του δεύτερου εναλλάκτη βασίζεται σε αυτήν του πρώτου, με την διαφορά ότι σε αυτόν θα σχεδιαστούν δύο είσοδοι και δύο έξοδοι. Για να γίνει αυτό εργαζόμαστε ως εξής: οι δύο οπές της πλάκας θα είναι οι είσοδοι και για την δημιουργία των δύο εξόδων χωρίζουμε το τμήμα των αυλακίων (45×45) σε τρία ίσα μέρη (15×15), όπου στο μεσαίο αφαιρούνται τα αυλάκια και στα πλάγια σχεδιάζονται δύο καινούργιες οπές. Το καπάκι παραμένει το ίδιο (95×95), χωρίς όμως να περιέχει την οπή. Για τον σχεδιασμό του τμήματος αυτού χρησιμοποιήθηκε η εντολή **extruded cut**, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Ο δεύτερος εναλλάκτης παρουσιάζεται στην παρακάτω φωτογραφία και στην συνέχεια παραθέτονται τα κατασκευαστικά σχέδια της πλάκας.



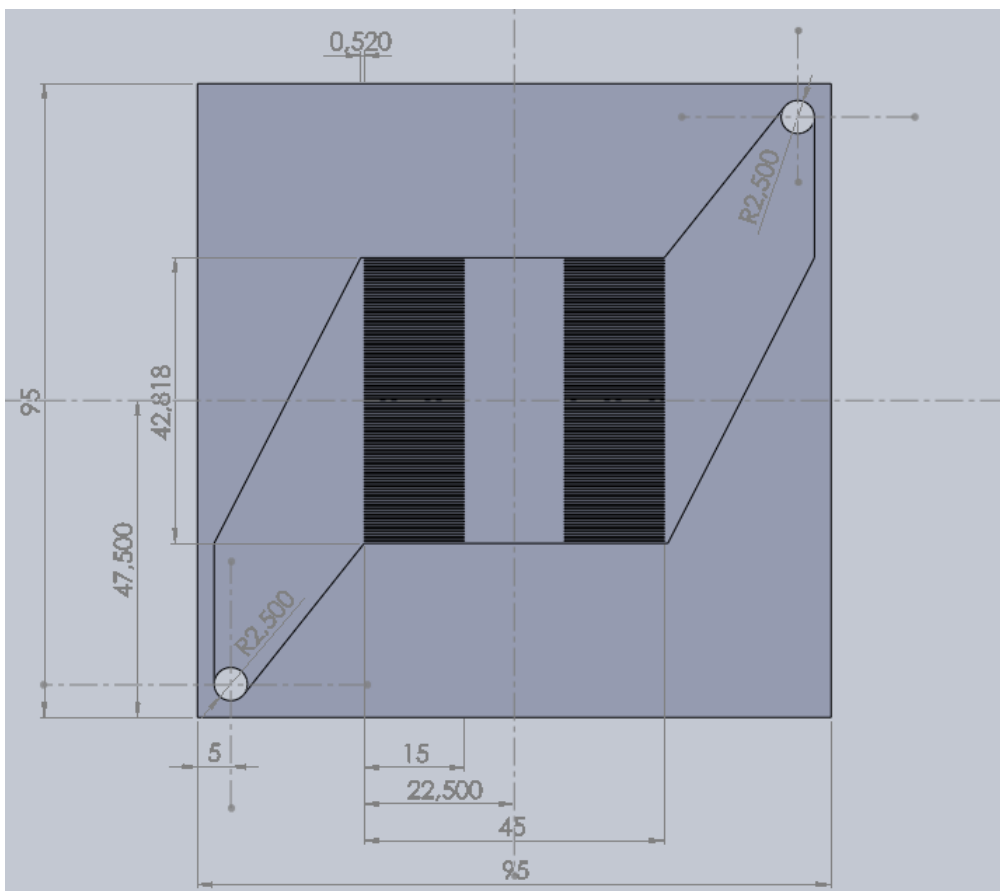
Εικόνα 6.3.11: Μορφή 2^ο μικρο-εναλλάκτη

Κατασκευαστικά σχέδια πλάκας

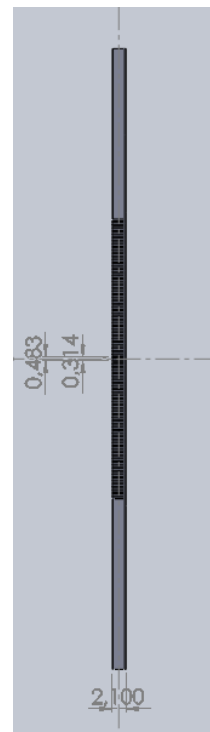
Σχέδιο 6.3.2: 2^ο μικρο-εναλλάκτης



Κάτοψη



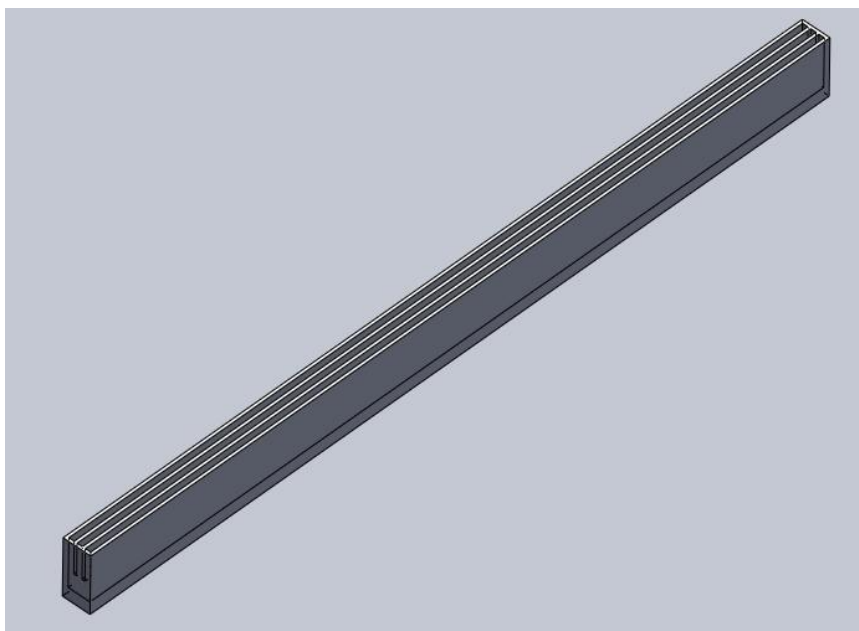
Πρόοψη



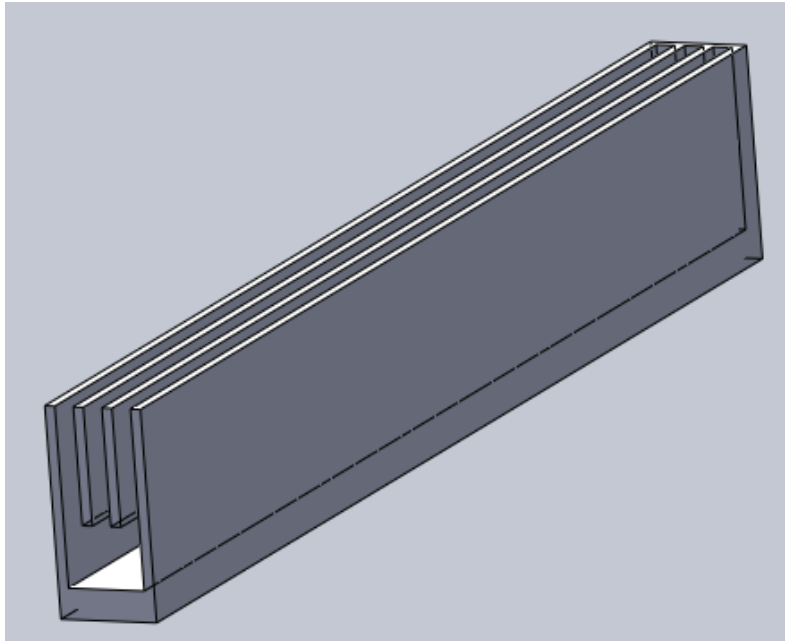
Πλάγια όψη
σε τομή

6.3.4 Σχεδιασμός του τρίτου εναλλάκτη

Η γεωμετρία του τρίτου εναλλάκτη είναι τελείως διαφορετική από αυτή των δύο προηγούμενων. Συγκεκριμένα, η πλάκα που έρχεται σε επαφή με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν περιέχει πλέον τα αυλάκια (micro-channels) και είναι τελείως λεία. Τα αυλάκια είναι τοποθετημένα στο πάνω μέρος του μικρο-εναλλάκτη και τα ίδια αποτελούν τις εισόδους και τις εξόδους της ροής. Η λογική είναι ότι η ροή θα εισέρχεται από ένα αυλάκι, θα προσκρούει πάνω στην πλάκα και στην συνέχεια θα διαχωρίζεται και θα εξέρχεται από τα αυλάκια που βρίσκονται δεξιά και αριστερά από την είσοδο. Θα υπάρχουν, δηλαδή συνολικά 45 εισοδοί και 46 εξοδοί. Λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων των αυλακίων και για καλύτερη οπτική παρουσίαση, σχεδιάζεται και μελετάται ο μικρο-εναλλάκτης με μία είσοδο και δύο εξόδους και τα αποτελέσματα γενικεύονται και για την περίπτωση με 91 συνολικά αυλάκια. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται ο τρίτος μικρο-εναλλάκτης ολόκληρος και σε τομή και έπειτα ακολουθούν τα κατασκευαστικά σχέδιά του.



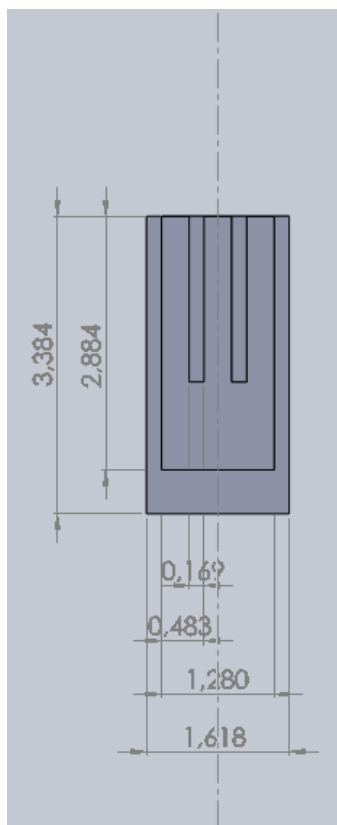
Εικόνα 6.3.12: Μορφή 3^{ου} μικρο-εναλλάκτη



Εικόνα 6.3.13: 3^{ος} μικρο-εναλλάκτης σε τομή

Στα παρακάτω κατασκευαστικά σχέδια, η πρόοψη παρουσιάζεται σε μεγένθυση, λόγω της μεγάλης διαφοράς της τάξης μεγέθους των διαστάσεων.

Σχέδιο 6.3.3:



Πρόοψη σε τομή (υπό μεγέθυνση)




Πλάγια όψη

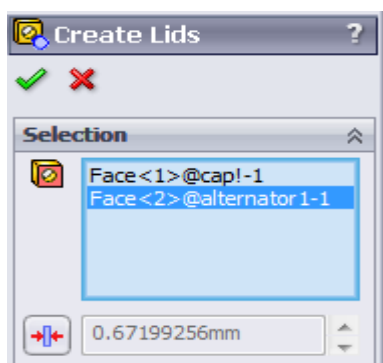
6.4 Προετοιμασία της προσομοίωσης των μικρο-εναλλακτών στο Flow Simulation

Για την εκκίνηση της προσομοίωσης και της λήψης των αποτελεσμάτων στο Flow Simulation απαιτείται κάποια διαδικασία προετοιμασίας. Τα στάδια της συνολικής διαδικασίας προσομοίωσης παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω και στην συνέχεια αναλύονται ένα προς ένα.

- Προετοιμασία του μοντέλου για εσωτερική ή εξωτερική ανάλυση
- Εγκατάσταση του σχεδίου προσομοίωσης της ροής
- Προσδιορισμός οριακών συνθηκών
- Ορισμός υπολογιστικών στόχων
- Εκτέλεση της προσομοίωσης
- Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

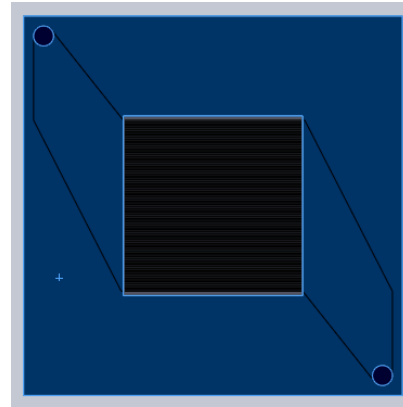
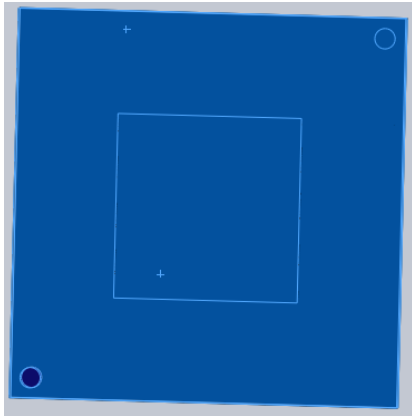
6.4.1 Προετοιμασία του μοντέλου

Το Solid Works Flow Simulation δίνει την δυνατότητα στον χρήστη, όπως προαναφέρθηκε, να κάνει εσωτερική (internal) αλλά και εξωτερική (external) μελέτη της ροής. Για την επεξεργασία των μικρο-εναλλακτών θα πραγματοποιηθεί εσωτερική ανάλυση της ροής. Η εσωτερική ανάλυση απαιτεί το κλείσιμο όλων των ανοιγμάτων (οπών) που υπάρχουν στον εναλλάκτη, διαδικασία που υλοποιείται με την εντολή **create lids** (). Η εντολή αυτή δημιουργεί καπάκια για τις εισόδους και τις εξόδους της ροής, χωρίς να επηρεάζουν φυσικά την γεωμετρία των εναλλακτών και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και βοηθάει μετέπειτα στον καθορισμό των οριακών συνθηκών. Η διαδικασία για την δημιουργία καπακιών και το κλείσιμο της ροής είναι ίδια και για τους τρεις εναλλάκτες και παρουσιάζεται παρακάτω για τον πρώτο μικρο-εναλλάκτη, στον οποίο δημιουργούνται συνολικά τρία καπάκια:




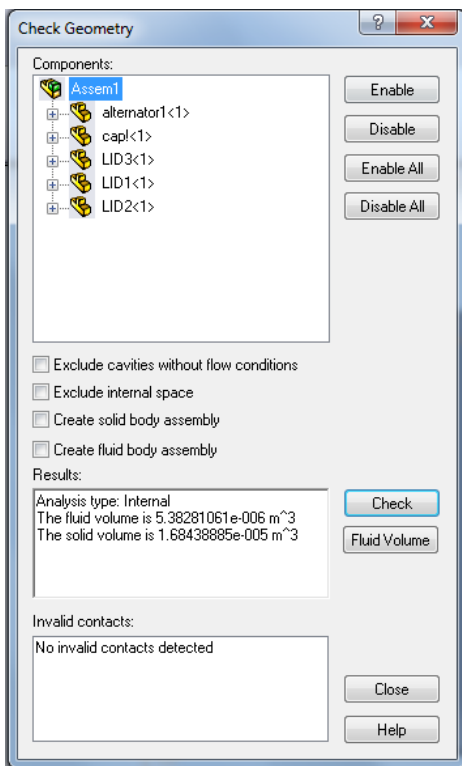
Εικόνα 6.4.1: Εντολή Create Lids

Πατώντας την εντολή με το εικονίδιο **create lids** εμφανίζεται το διπλανό παράθυρο και στην συνέχεια, απλά επιλέγοντας τις επιφάνειες του μικρο-εναλλάκτη που έχουν οπή, το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα καπάκια, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 6.4.2: Κλείσιμο της εξόδου του καπακιού Κλείσιμο της εισόδου και της εξόδου της πλάκας

Τέλος, είναι απαραίτητη η εκτέλεση της εντολής **check geometry** (), με την οποία γίνεται έλεγχος αν το πρόγραμμα έχει κατανοήσει την εσωτερική γεωμετρία του εναλλάκτη. Με την επιλογή της συγκεκριμένης εντολής εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο, στο οποίο δεν πρέπει να υπάρχει κάποιο μήνυμα στο πεδίο “Invalid contacts” και να μην είναι μηδέν οι όγκοι του στερεού και του υγρού:

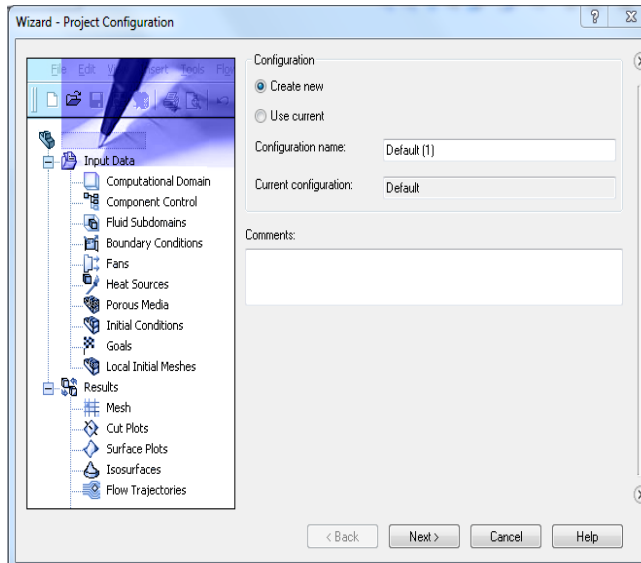



Όπως παρουσιάζεται στην διπλανή εικόνα, πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις και ο μικρο-εναλλάκτης είναι έτοιμος να προχωρήσει στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης.

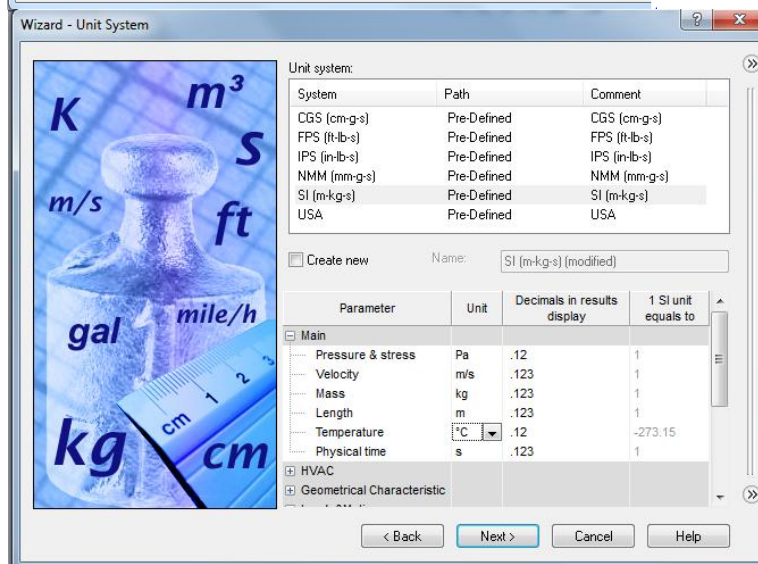
Εικόνα 6.4.3: Η εντολή: Check geometry

6.4.2) Εγκατάσταση του σχεδίου προσομοίωσης της ροής

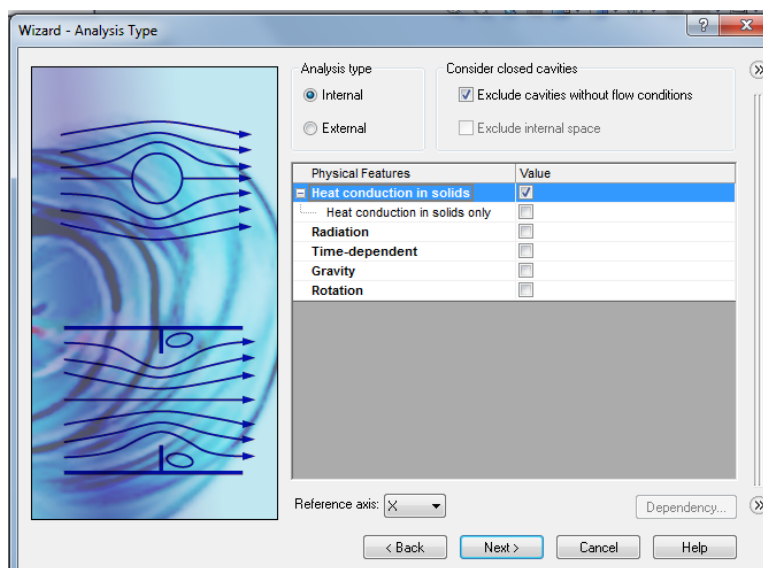
Στο βήμα αυτό περιλαμβάνεται ουσιαστικά η μοντελοποίηση του μικρο-εναλλάκτη, δηλαδή ο καθορισμός των υλικών, του ρευστού, της ακρίβειας των μετρήσεων κτλ. Στην συνέχεια παραθέτονται τα βήματα της διαδικασίας, η οποία είναι ίδια και για τους τρεις μικρο-εναλλάκτες:



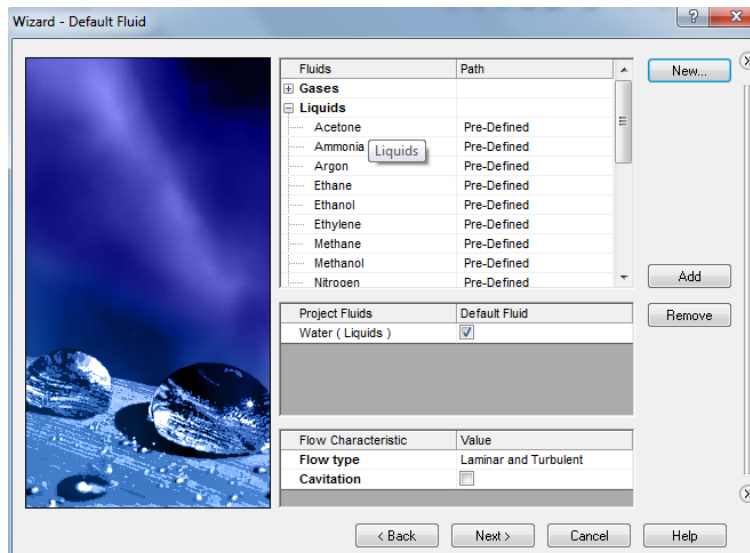
Επιλέγοντας την εντολή **wizard** ( Wizard) (εικόνα 6.4.4) εμφανίζεται το διπλανό παράθυρο, όπου δημιουργείται ένα νέο αρχείο για την αποθήκευση της προσομοίωσης.



Εδώ επιλέγεται το σύστημα των μονάδων (SI) (εικόνα 6.4.5) και συγκεκριμένα οι μονάδες των βασικών μεγεθών (θερμοκρασία \rightarrow °C).



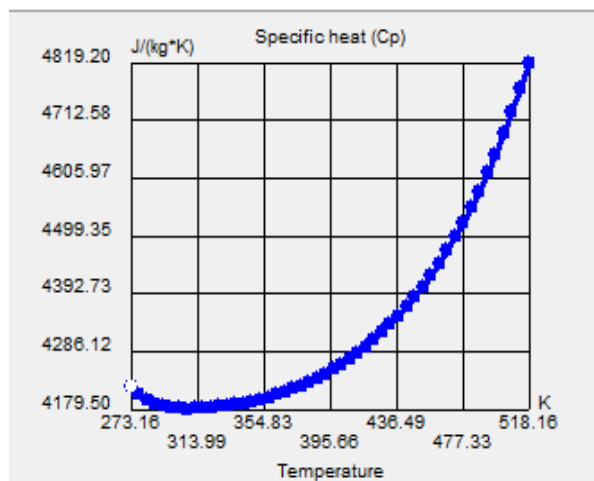
Στην συνέχεια επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης (internal) και να υπάρχει θερμική αγωγιμότητα και στα στερεά τοιχώματα του εναλλάκτη (heat conduction in solids)(εικόνα 6.4.6).



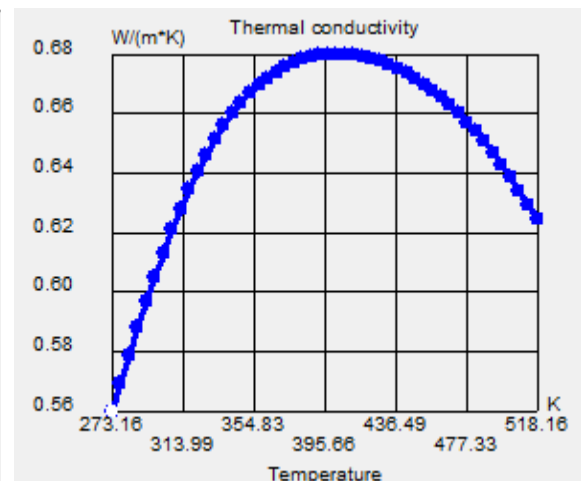
Κατόπιν, γίνεται η επιλογή του ρευστού (water). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ειδικής θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του νερού, όπως

χρησιμοποιούνται

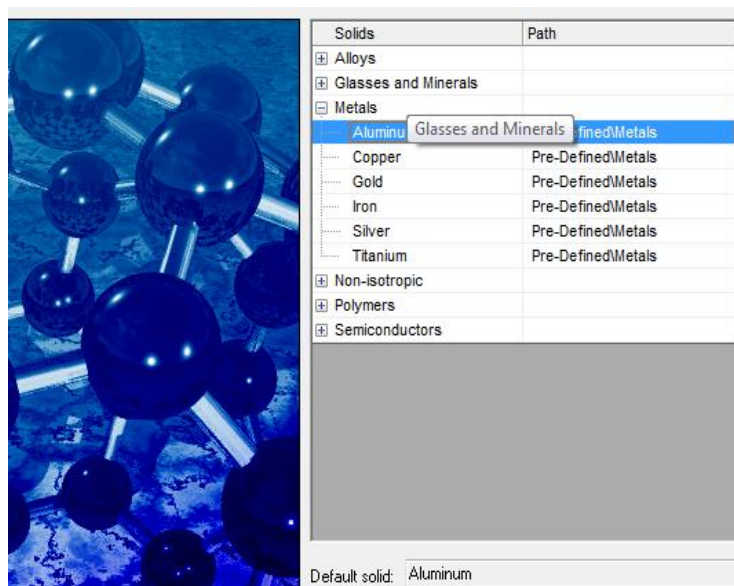
από το SolidWorks (default liquid) (εικόνα 6.4.5):



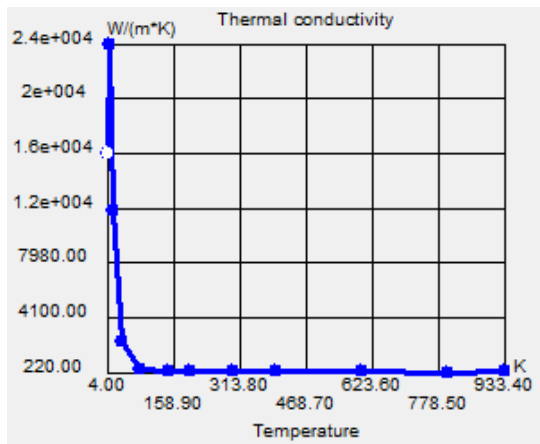
Διάγραμμα 6.4.1: (T-Cp) of water



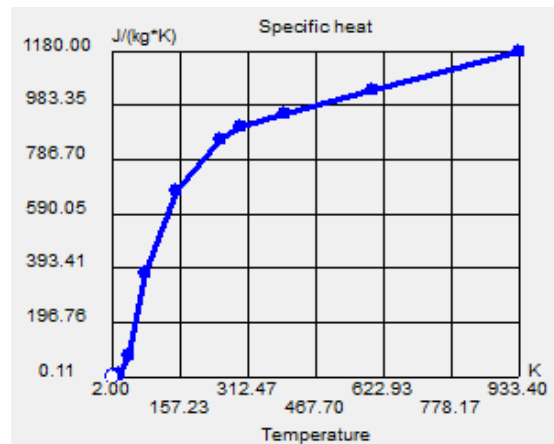
(T-Th.con.) of water



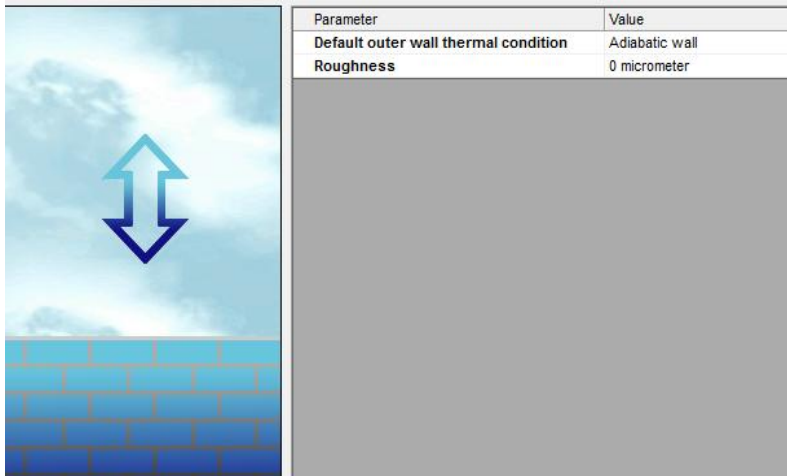
Στο στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή του υλικού του μικρο-εναλλάκτη (αλουμίνιο, λόγω υψηλής θερμικής αγωγιμότητας) (εικόνα 6.4.6) και παραθέτονται επίσης τα προαναφερθέντα διαγράμματα:



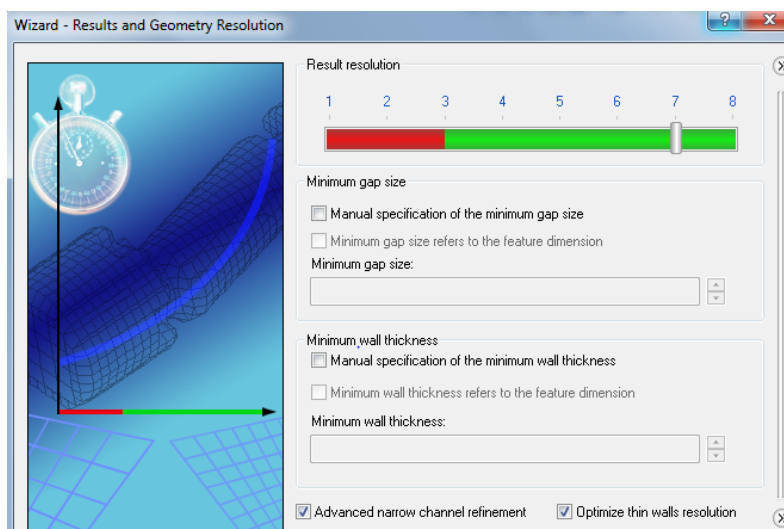
Διάγραμμα 6.4.2: (T-Cp) of aluminum



(T-Th.con.) of aluminum



Στην συνέχεια, επιλέγονται τα εξωτερικά τοιχώματα του μικρο-εναλλάκτη να είναι αδιαβατικά και χωρίς τραχύτητα (εικόνα 6.4.5).



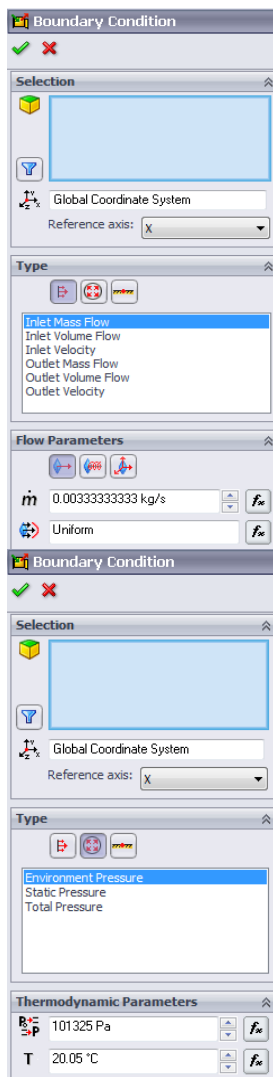
Ουσιαστικά με τις επιλογές αυτές, δημιουργείται ένα πολύ πυκνό πλέγμα (mess) στον μικρο-εναλλάκτη, το οποίο θα μελετηθεί από

Τέλος, τοποθετώντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων (result resolution) στο επίπεδο 7 και επιλέγοντας το κουτί “Advanced narrow channel refinement”, διασφαλίζεται η ορθή ακρίβεια των αποτελεσμάτων (

το πρόγραμμα με το σωστό αριθμό επαναλήψεων ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν με υψηλή ακρίβεια. Με τις επιλογές αυτές, το πλέγμα θα αποτελείται περίπου από 1.000.000 τετράγωνα για τον τομέα του ρευστού και 900.000 για τον τομέα του στερεού. Τέλος, θα γίνουν περίπου 1000 επαναλήψεις.

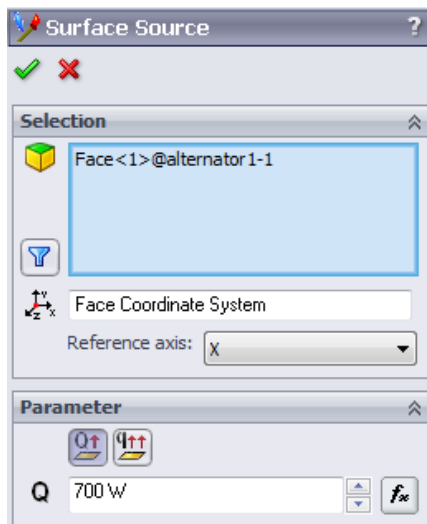
6.4.3 Προσδιορισμός οριακών συνθηκών - Ορισμός υπολογιστικών στόχων

Μετά την ολοκλήρωση του οδηγού Wizard, απομένει μόνο ο καθορισμός των οριακών συνθηκών που έχουν υπολογισθεί στο κεφάλαιο (5.3.1), για την έναρξη της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα πρέπει να ορισθούν η παροχή μάζας και η θερμική ισχύς που δέχεται η πλάκα, αλλά είναι απαραίτητος από το πρόγραμμα επίσης, ο προσδιορισμός της πίεσης σε κάποιο σημείο του μικρο-εναλλάκτη. Ο υπολογιστικός τομέας (computational domain) καθορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα, τελειώνοντας ακριβώς στα άκρα του μικρο-εναλλάκτη. Συνολικά, δηλαδή θα ορισθούν τρεις οριακές συνθήκες, οι οποίες θα είναι οι ίδιες και για τους τρεις εναλλάκτες και παρουσιάζονται παρακάτω.




1^η οριακή συνθήκη (εικόνα 6.4.7): καθορισμός παροχής μάζας στην είσοδο ίση με 12 kg / h → 0.003333333333 kg / s.

2^η οριακή συνθήκη (εικόνα 6.4.8): προσδιορισμός της πίεσης στην έξοδο ίση με την ατμοσφαιρική (P = 101325Pa).



3^η οριακή συνθήκη (εικόνα 6.4.9): καθορισμός της θερμικής ισχύος που δέχεται το τοίχωμα της πλάκας που έρχεται σε επαφή με το φωτοβολταϊκό πάνελ ίση με 700W.

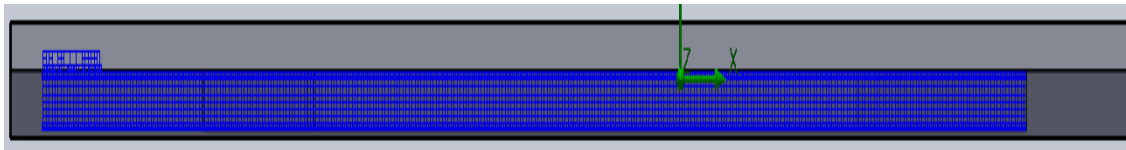
Τέλος, πριν την έναρξη της προσομοίωσης μπορούν να τεθούν στο πρόγραμμα κάποιοι υπολογιστικοί στόχοι. Με τον τρόπο αυτό δίνετε μεγαλύτερη έμφαση στον υπολογισμό των συγκεκριμένων παραμέτρων, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και επίσης γίνεται ταχύτερη η επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους. Εδώ σαν υπολογιστική στόχοι θα ορισθούν: η θερμοκρασία του ρευστού, η θερμοκρασία του τμήματος της πλάκας που δέχεται την θερμική ισχύ και η πίεση του ρευστού στην είσοδο και έξοδο του μικρο-εναλλάκτη.

Η έναρξη της διαδικασίας γίνεται με την εντολή **run** (). Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των υπολογισμών που έχει ορισθεί στο πρόγραμμα. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται. Στην συγκεκριμένη διαδικασία, η κάθε προσομοίωση χρειάστηκε περίπου εννιά ώρες.

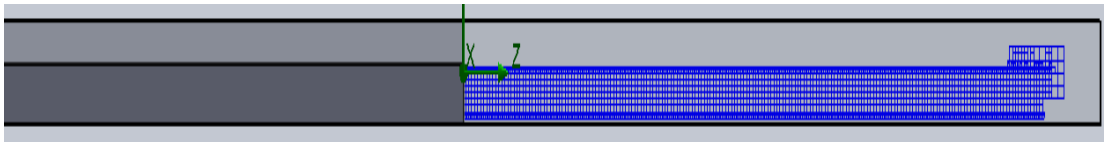
6.5 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

6.5.1 Πρώτος μικρο-εναλλάκτης

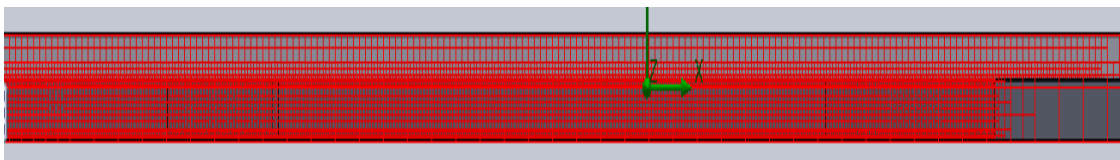
Αρχικά, είναι σημαντικό να παρουσιασθεί το πλέγμα που δημιουργήθηκε για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Λόγω των μικρών διαστάσεων, χρησιμοποιείται μεγέθυνση στις παρακάτω εικόνες για καλύτερη οπτική παρουσίαση. Το μπλε χρώμα αναφέρεται στον τομέα του ρευστού, ενώ το κόκκινο στον τομέα του στερεού.



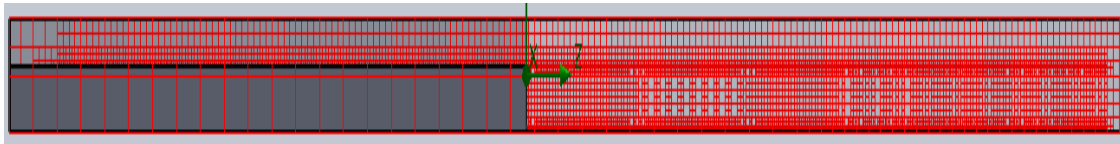
Εικόνα 6.5.1: Κάτοψη σε τομή (ρευστό)



Εικόνα 6.5.2: Πλάγια όψη εξ αριστερόν σε τομή (ρευστό)





Εικόνα 6.5.3: Κάτοψη σε τομή (στερεό)

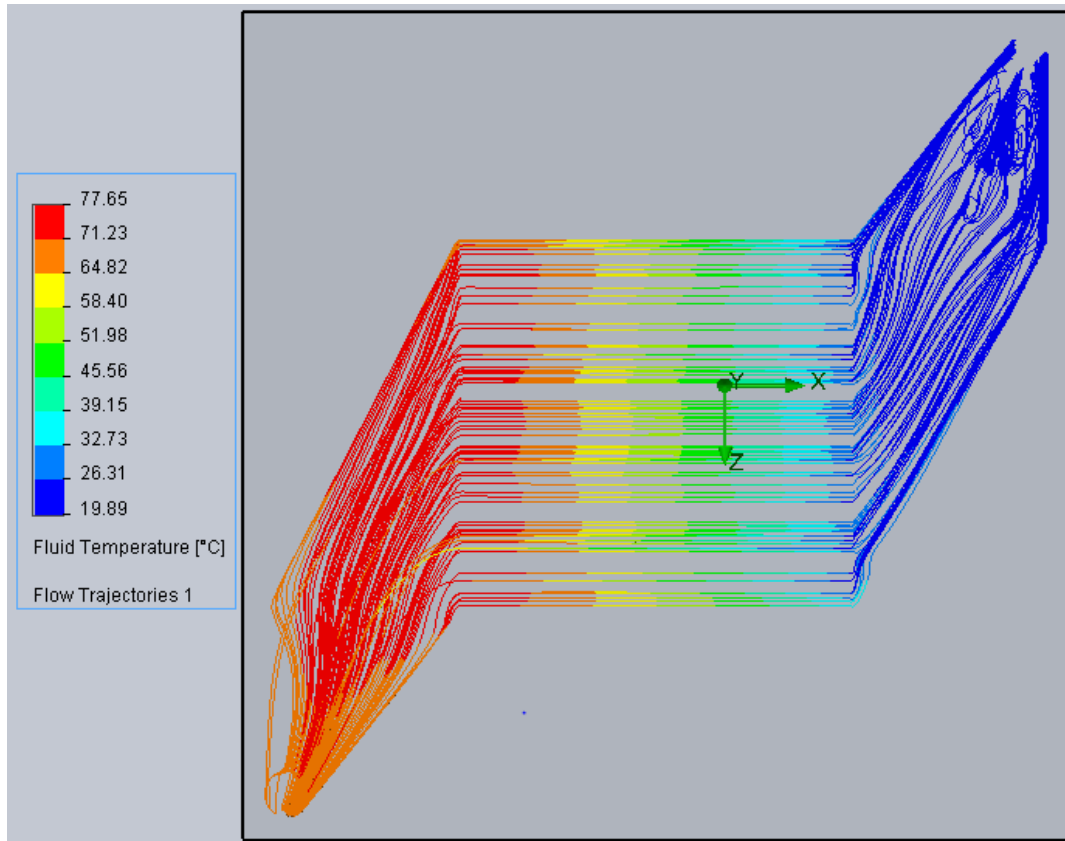


Εικόνα 6.5.4: Πλάγια όψη εξ αριστερόν σε τομή (στερεό)

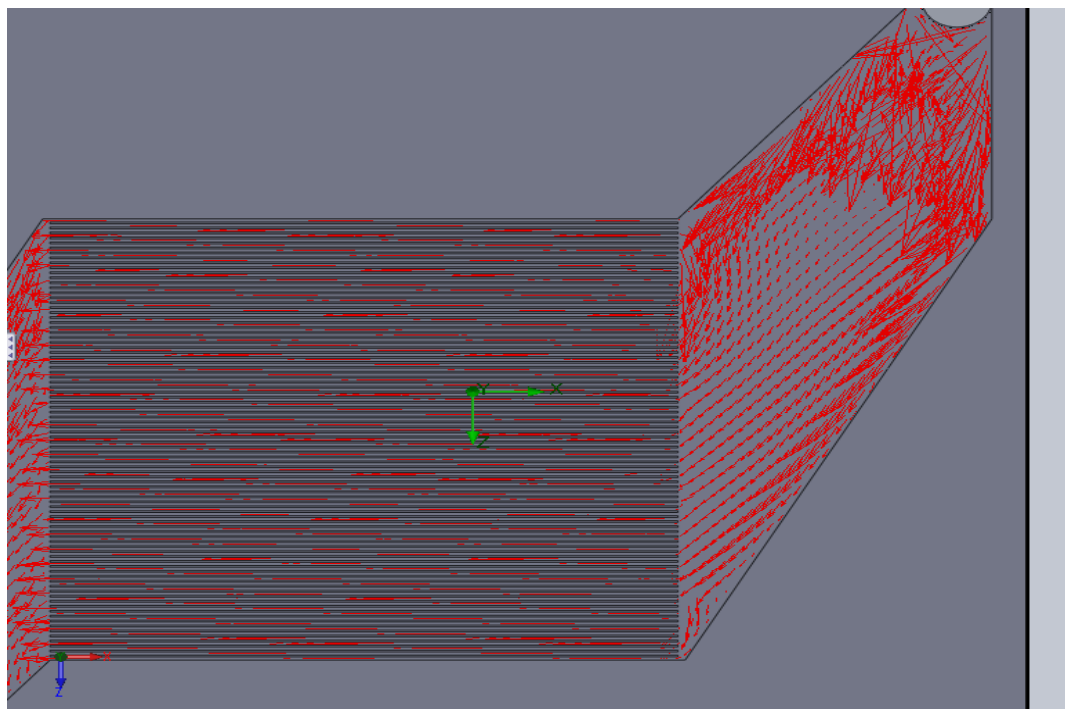
Παρατηρούμε ότι στον τομέα του στερεού το πλέγμα είναι πιο αραιό στα τμήματα που βρίσκονται εκτός του τομέα του ρευστού. Αυτό συμβαίνει, πρώτον λόγω των υπολογιστικών στόχων που έχουν τεθεί και δεύτερον λόγω των αδιαβατικών τοιχωμάτων. Αντίθετα, το πλέγμα του ρευστού είναι πυκνό σε όλο το μήκος του μικρο-εναλλάκτη, εξασφαλίζοντας την μέγιστη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, παραθέτονται οι γραμμές ροής και τα διανύσματα ταχυτήτων του ρευστού. Οι γραμμές ροής δημιουργούνται χρησιμοποιώντας την εντολή **Flow Trajectories** ( Flow Trajectories) και ο χρωματισμός τους παραπέμπει στην θερμοκρασία του ρευστού. Για τα διανύσματα ταχυτήτων χρησιμοποιείται η εντολή **Cut Plot** ( Cut Plots)

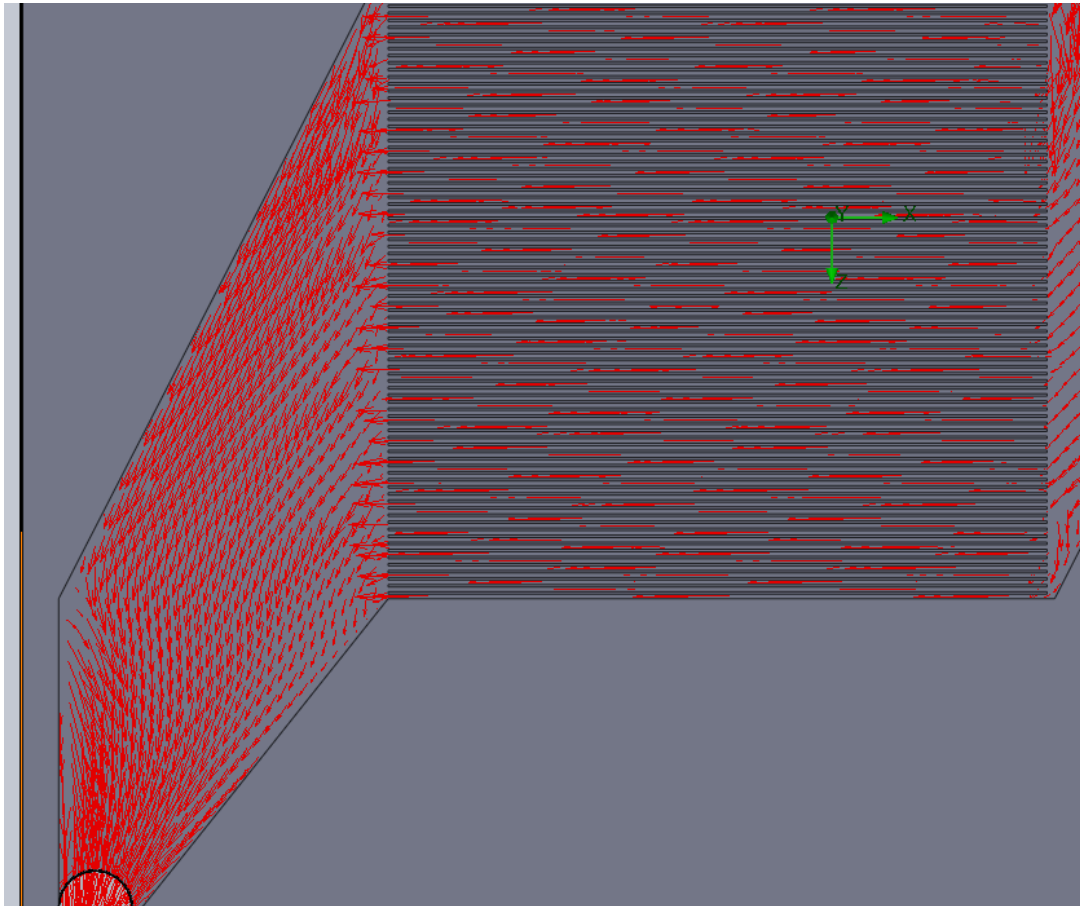
και η επιλογή vectors. Λόγω των μικρών ταχυτήτων, οι εικόνες με τα διανύσματα χωρίζονται σε αυτά της εισόδου και της εξόδου.



Εικόνα 6.5.5: Γραμμές ροής



Εικόνα 6.5.6: Διανύσματα ταχυτήτων στην είσοδο



Εικόνα 6.5.7: Διανύσματα ταχυτήτων στην έξοδο

Από τις γραμμές ροής αλλά και από τα διανύσματα ταχυτήτων παρουσιάζεται ένας στροβιλισμός της ροής στην είσοδο, λόγω της κρούσης στα τοιχώματα. Στην συνέχεια όμως, καθώς η ροή εισέρχεται στην διαμόρφωση των αυλακίων, το πρόβλημα αυτό διορθώνεται και η ροή εξέρχεται ομαλά. Το μέγεθος από τα βέλη εκφράζει το μέτρο της ταχύτητας, η κατανομή της οποίας παρουσιάζεται στην παρακάτω φωτογραφία. Στην είσοδο του μικρο-εναλλάκτη υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{m} = \rho v A \Leftrightarrow v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \Leftrightarrow v = \frac{0.00333333 \text{ kg/s}}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 0.000019625 \text{ m}^2} \Leftrightarrow v = \mathbf{0.1702 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

,όπου

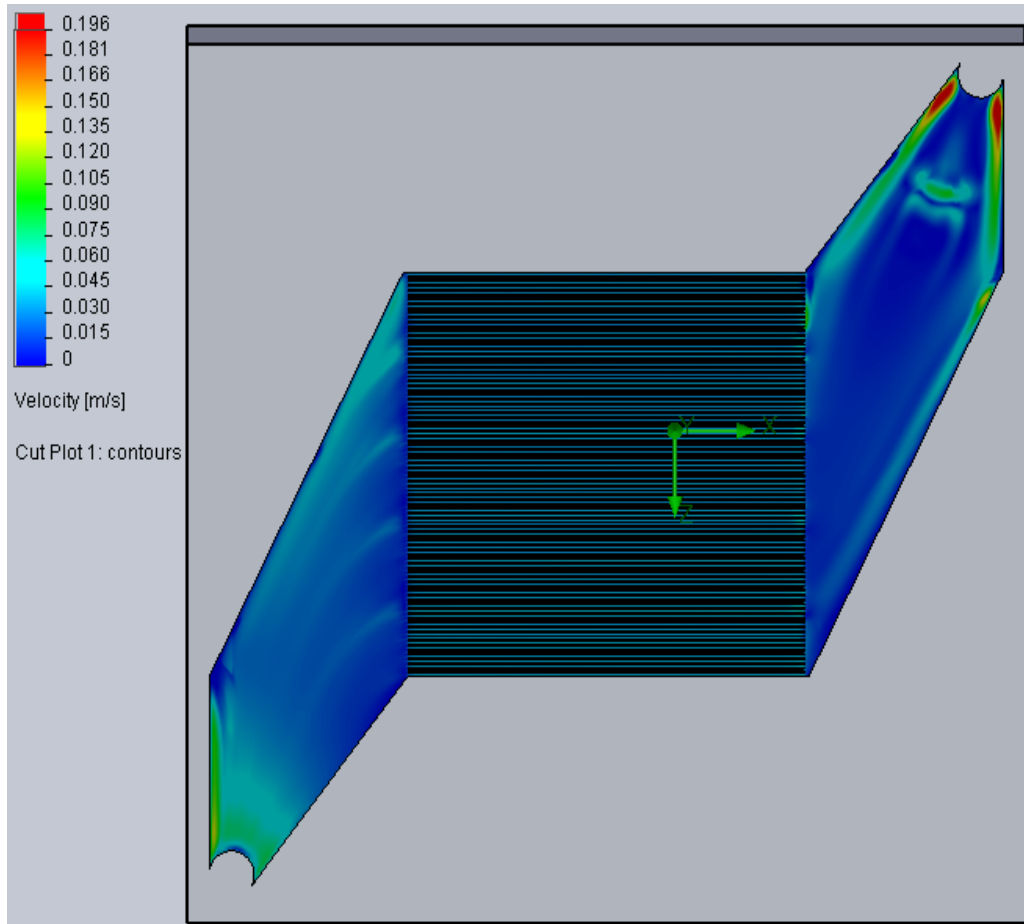
$$A = \pi R^2 = 3.14 \times (0.0025 \text{ m})^2 \Leftrightarrow A = 0.000019625 \text{ m}^2$$

Επιπρόσθετα, ο αριθμός Reynolds της ροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Re} = \frac{v D_h}{\nu} = \frac{0.1702 \frac{m}{s} \cdot 0.005 m}{10^{-6} \frac{m^2}{s}} \Leftrightarrow \text{Re} = 850.96 < \text{Re}_{cr} = 2200, \text{ όπου}$$

$D_h \rightarrow$ υδραυλική διάμετρος εισόδου

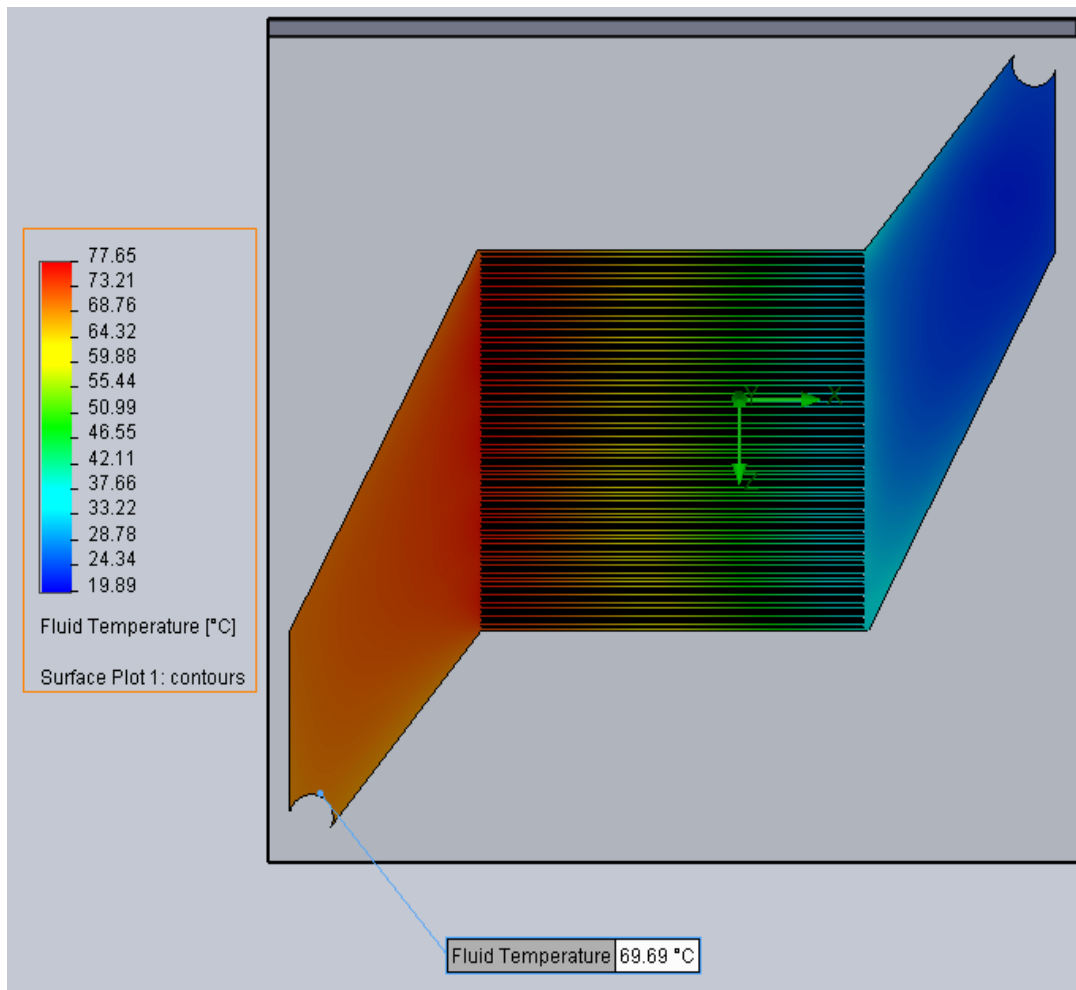
$\nu \rightarrow$ κινηματικό ιξώδες του νερού στους 20°C



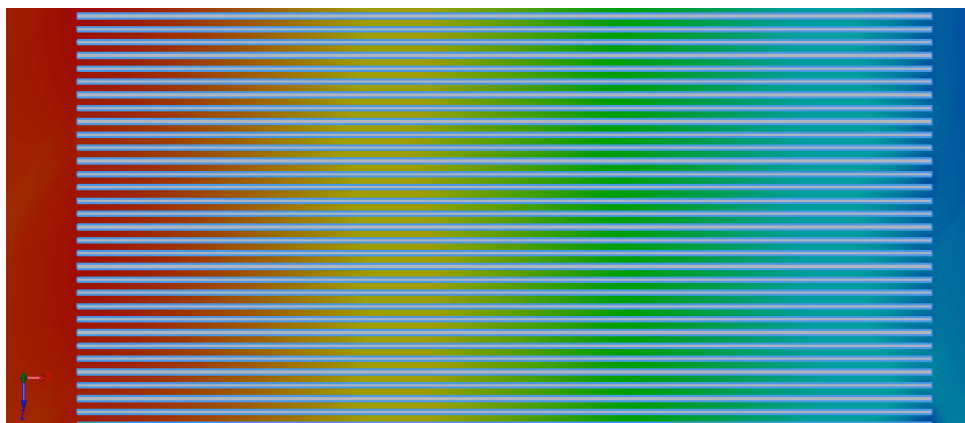
Εικόνα 6.5.8: Κατανομή της ταχύτητας του ρευστού

Παρατηρούμε ότι καθώς η ροή εισέρχεται στην διαμόρφωση εισόδου, η ταχύτητα της μειώνεται και κυμαίνεται περίπου στα 0.012 m/s. Όταν βρίσκεται εντός των αυλακίων παραμένει σταθερή στα 0.019 m/s, ενώ εισρέοντας στην διαμόρφωση εξόδου φτάνει τα 0.015 m/s και τελικά η ροή εξέρχεται με ταχύτητα 0.055 m/s.

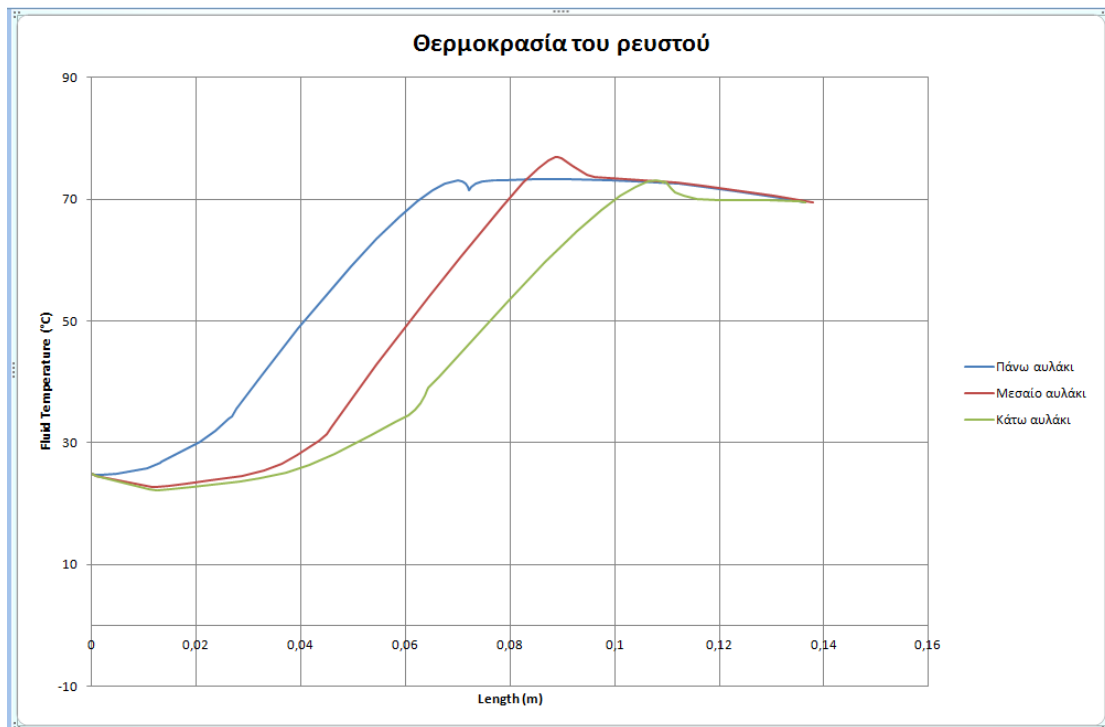
Ακολούθως, θα εξετασθούν τα αποτελέσματα με βάση τα τρία κριτήρια που έχουν τεθεί για την επιλογή του μικρο-εναλλάκτη. Αρχικά, παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού στην παρακάτω εικόνα και το διάγραμμα:



Εικόνα 6.5.9: Κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού

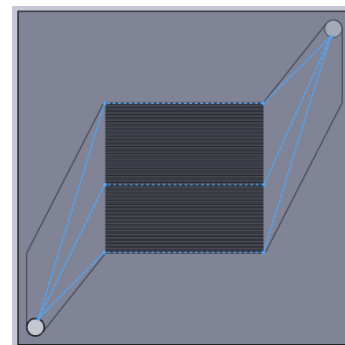


Εικόνα 6.5.10: Κατανομή της θερμοκρασίας εντός των αυλακίων



Διάγραμμα 6.5.1

Για την δημιουργία του παραπάνω διαγράμματος, σχεδιάστηκε οι τρεις γραμμές ροής που φαίνονται στην διπλανή εικόνα, πάνω στις οποίες υπολογίστηκε η θερμοκρασία του ρευστού.



Εικόνα 6.5.11: Γραμμές ροής

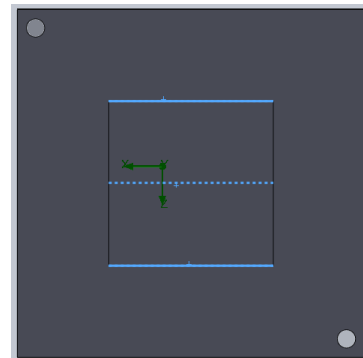
Η παροχή μάζας είχε υπολογισθεί, με βάση ότι το ρευστό θα θερμαινόταν 50°C . Αυτό φαίνεται από την παραπάνω εικόνα ότι επιτυγχάνεται και στην πράξη, αφού η θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι αγγίζει τους 70°C . Από το διάγραμμα γίνεται κατανοητό ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν γραμμική εντός των αυλακίων, αντίθετα με αυτήν στις διαμορφώσεις εισόδου και εξόδου. Αρχικά, η θερμοκρασία του ρευστού ανέρχεται σε 25°C , φτάνει τους 30°C καθώς εισέρχεται στα αυλάκια, ξεπερνάει τους 76°C μόλις εξέρχεται από την περιοχή που δέχεται την θερμική ισχύ (τα αυλάκια δηλαδή) και τελικά φτάνει στην έξοδο στην επιθυμητή θερμοκρασία των 70°C . Επιπλέον, και τα τρία αυλάκια ακολουθούν την ίδια κατανομή θερμοκρασίας, με μοναδική εξαίρεση το μεσαίο αυλάκι, όπου το ρευστό αναπτύσσει μέγιστη θερμοκρασία 76°C . Έτσι, το πρώτο κριτήριο ικανοποιείται από τη γεωμετρία του συγκεκριμένου μικρο-εναλλάκτη.

Το δεύτερο κριτήριο αναφέρεται στην ομοιομορφία της θερμοκρασίας της πλάκας που θα έρχεται σε επαφή με το φωτοβολταϊκό πάνελ. Για την αξιολόγηση της ομοιομορφίας θα χρησιμοποιηθεί το μέγεθος της τυπικής απόκλισης (standard deviation), η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

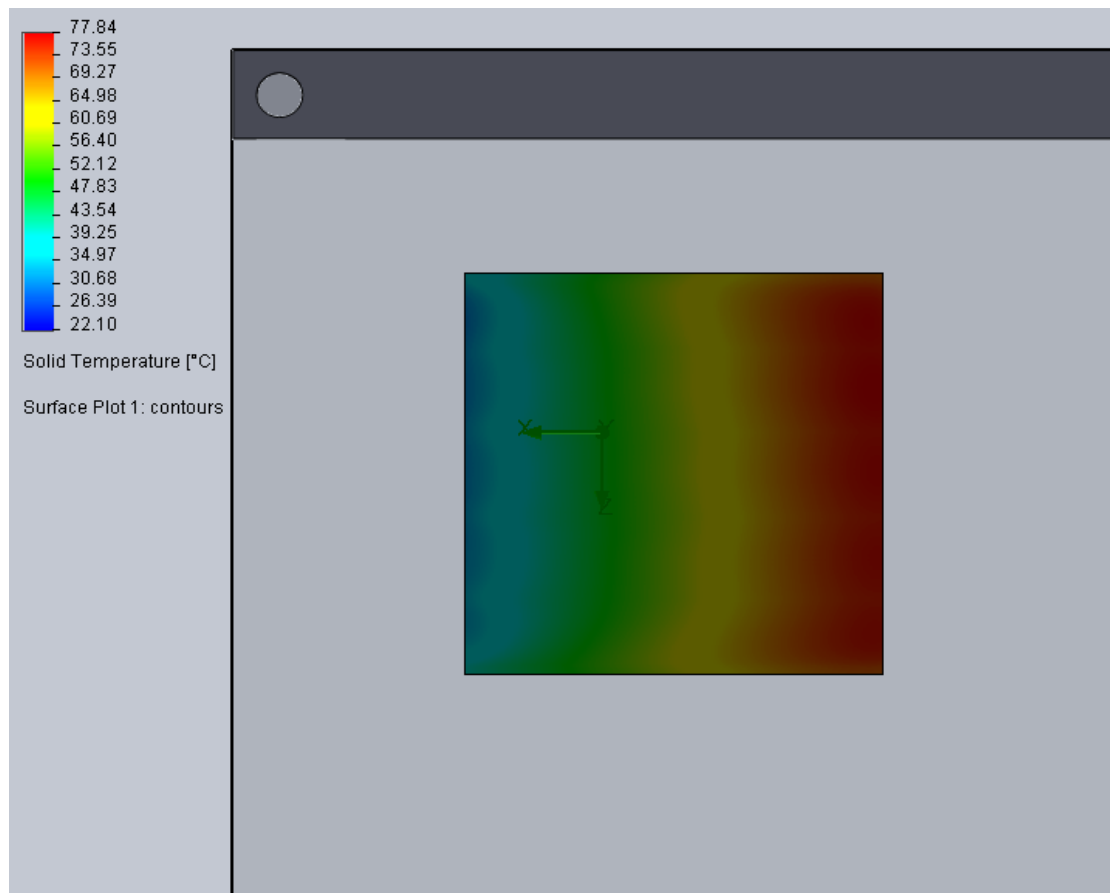
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \text{ όπου}$$

$N \rightarrow$ το πλήθος των τιμών της θερμοκρασίας που προκύπτουν από την επιφάνεια της πλάκας

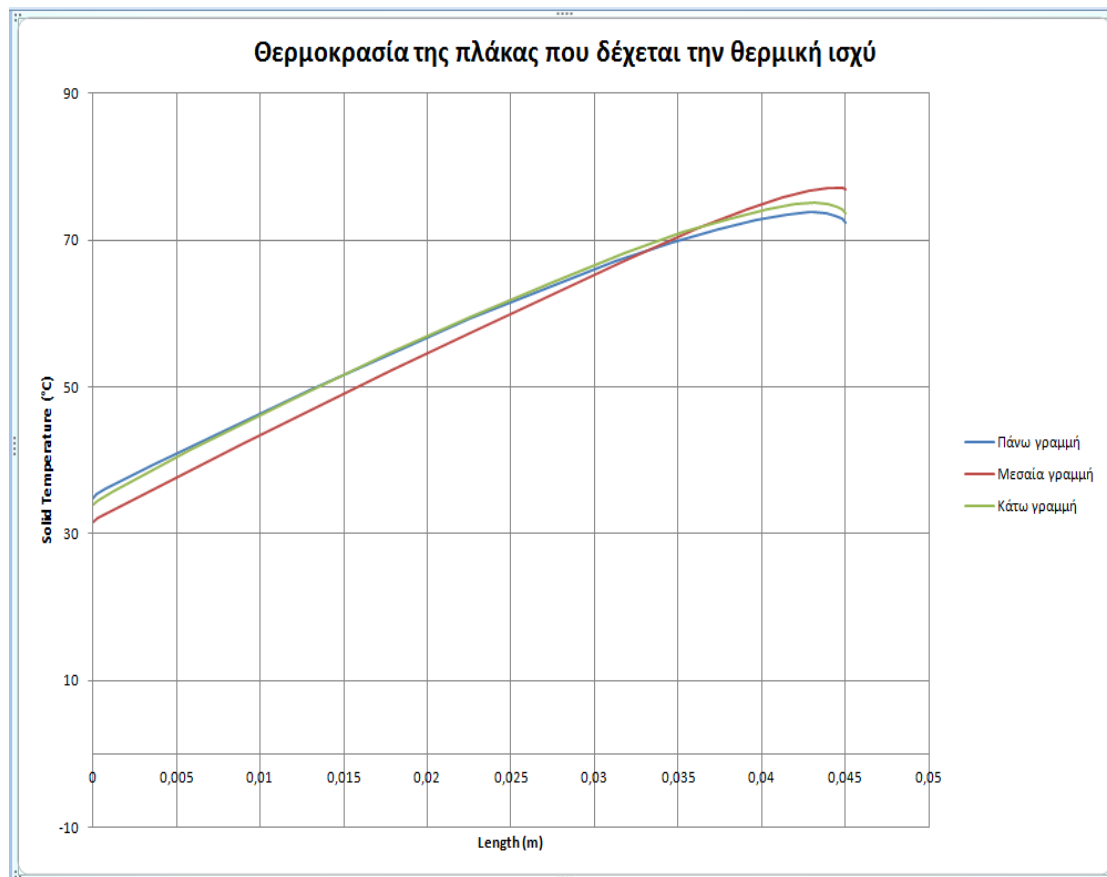
$\bar{x} \rightarrow$ ο μέσος όρος των θερμοκρασιών του δείγματος. (το δείγμα προκύπτει από τις τιμές των θερμοκρασιών που βρίσκονται πάνω στις διπλανές γραμμές (πάνω, μεσαία, κάτω) στην επιφάνεια της πλάκας, οι οποίες χρησιμοποιούνται και για την δημιουργία του παρακάτω διαγράμματος.)



Εικόνα 6.5.12: Υπολογιστικές γραμμές



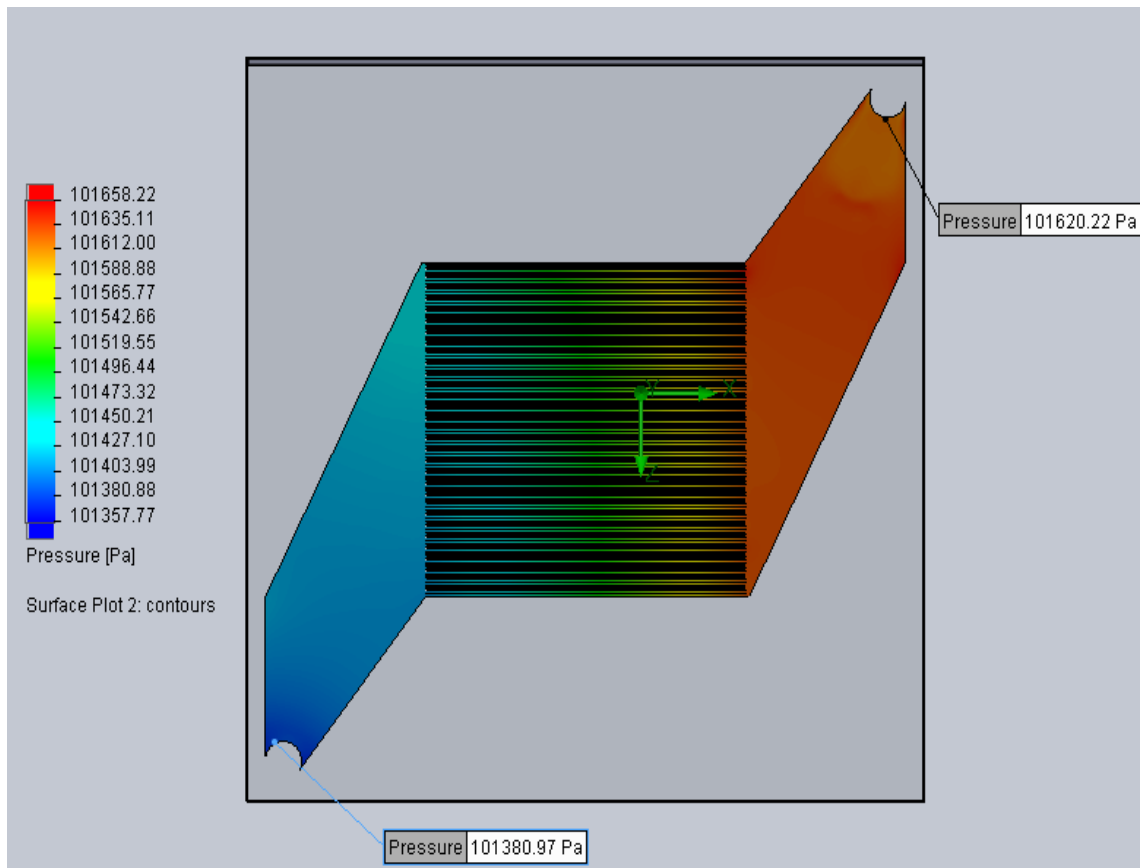
Εικόνα 6.5.13: Θερμοκρασία της πλάκας που δέχεται την θερμική ισχύ



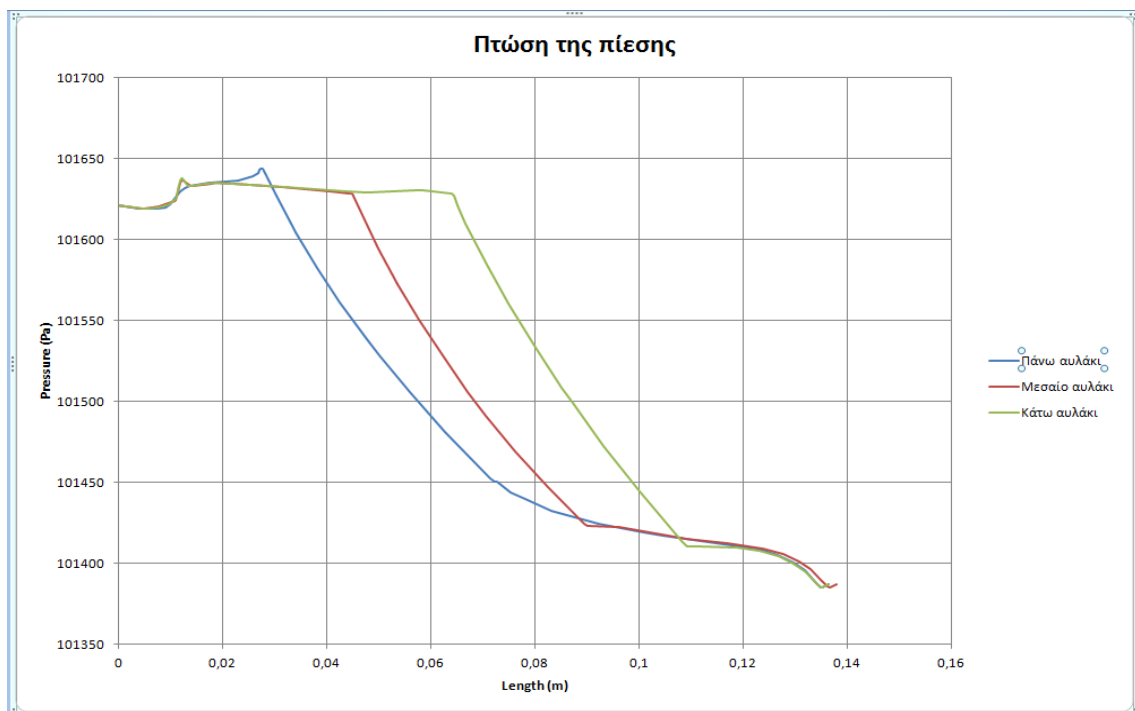
Διάγραμμα 6.5.2

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Microsoft Excel (από την εντολή **STDEV**), η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας υπολογίστηκε $\sigma = 18.02^{\circ}\text{C}$. Η τιμή αυτή καταδεικνύει ότι στην επιφάνεια της πλάκας δεν υπάρχει ομοιομορφία στην θερμοκρασία, γεγονός το οποίο είναι εμφανές και στην παραπάνω εικόνα. Αυτό σημαίνει ότι η ψύξη των ηλιακών κυψελών δεν επιτυγχάνεται με σωστό τρόπο, δηλαδή οι κυψέλες θα λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες, επηρεάζοντας έτσι την απόδοσή τους. Για τον λόγο αυτό συμπεραίνουμε ότι η γεωμετρία του συγκεκριμένου μικρο-εναλλάκτη δεν πληροί το δεύτερο κριτήριο.

Τέλος, θα ελεγχθεί η πτώση πίεσης του ρευστού στο εσωτερικό του μικρο-εναλλάκτη, η οποία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα και το διάγραμμα. Για την δημιουργία του διαγράμματος χρησιμοποιήθηκαν οι γραμμές ροής, που δημιουργήθηκαν προηγουμένως για τη λήψη των τιμών της θερμοκρασίας του ρευστού.



Εικόνα 6.5.14: Πτώση της πίεσης του ρευστού

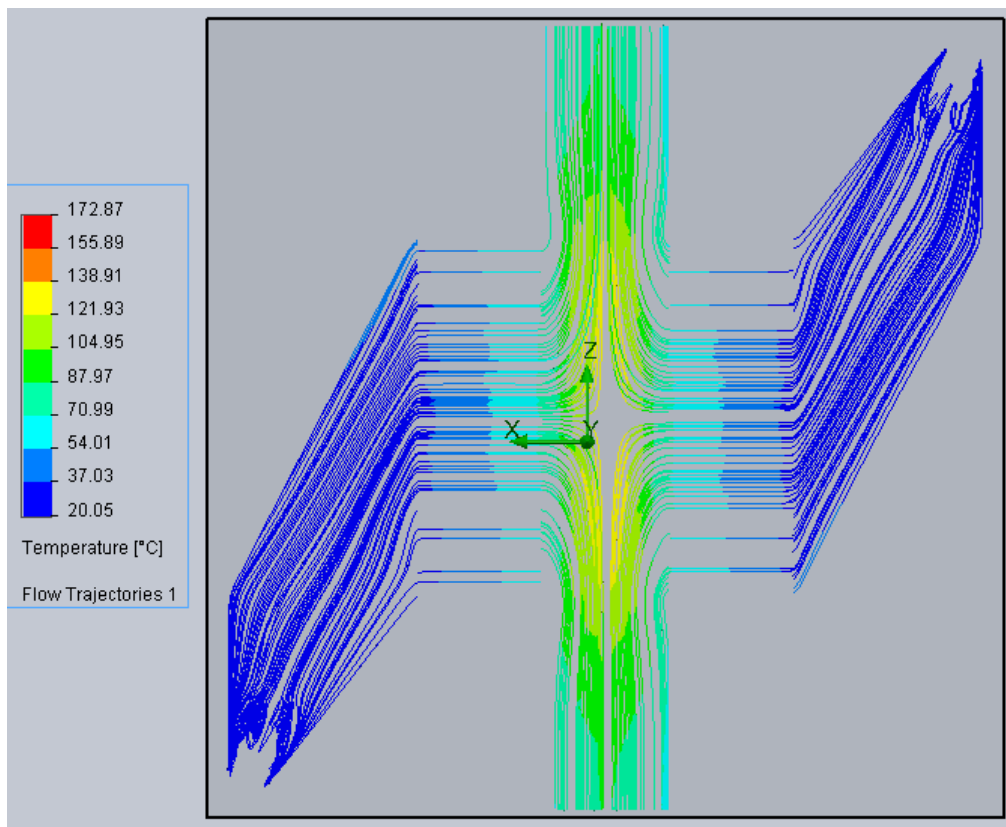


Διάγραμμα 6.5.3

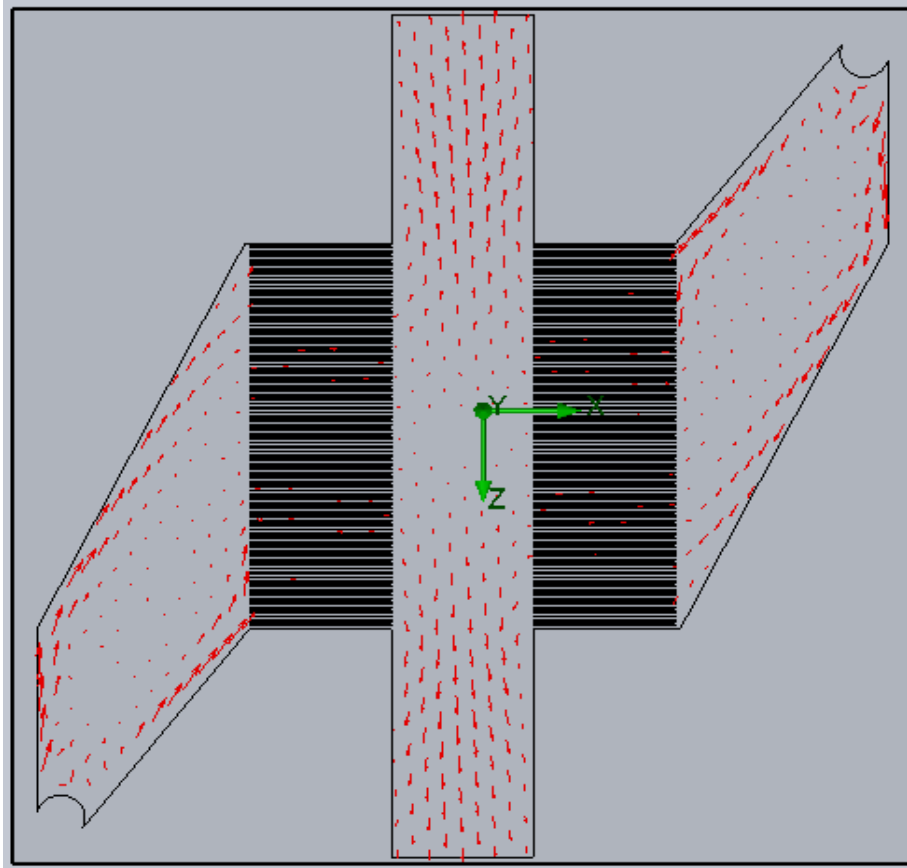
Παρατηρείται ότι η πτώση της πίεσης εντός των αυλακίων είναι σχεδόν γραμμική και συνολικά στο ρευστό ανέρχεται περίπου σε 245 Pa. Επίσης, η πτώση της πίεσης ακολουθεί την ίδια πορεία και στα τρία αυλάκια, γεγονός που καταδεικνύει την ακρίβεια των υπολογισμών. Η τιμή αυτή είναι ικανοποιητική και μπορεί έτσι να θεωρηθεί ότι η γεωμετρία του μικρο-εναλλάκτη πληροί το τρίτο κριτήριο. Συνολικά όμως, ο πρώτος μικρο-εναλλάκτης ικανοποιεί τα δύο από τα τρία κριτήρια και για τον λόγο αυτό **απορρίπτεται**.

6.5.2 Δεύτερος εναλλάκτης

Η γεωμετρία του δεύτερου μικρο-εναλλάκτη επιλέγεται με γνώμονα την καλύτερη ομοιομορφία της θερμοκρασίας της πλάκας που έρχεται σε επαφή με το φωτοβολταϊκό πάνελ. Έτσι, με βάση τη γεωμετρία του πρώτου μικρο-εναλλάκτη, σχεδιάζονται δύο εισοδοί και δύο έξοδοι για να φτάσουμε στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Η παροχή μάζας βέβαια παραμένει συνολικά ίδια (12 m/s), απλά χωρίζεται σε 6 m/s για την κάθε είσοδο. Στην συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες με τις γραμμές ροής και τα διανύσματα ταχυτήτων. Ασφαλώς, η ταχύτητα της ροής και ο αριθμός Reynolds στην κάθε είσοδο έχει μειωθεί στο μισό, λόγω της παροχής μάζας.

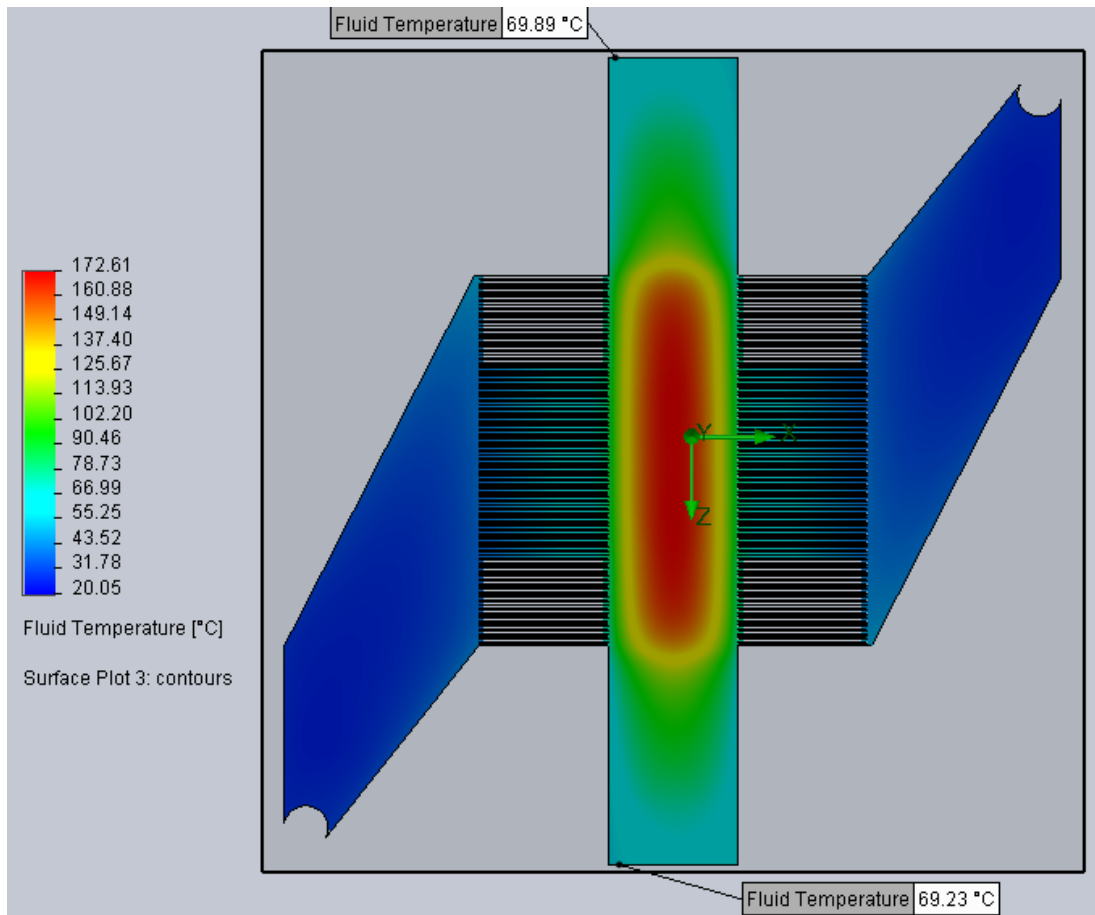


Εικόνα 6.5.15: Γραμμές ροής

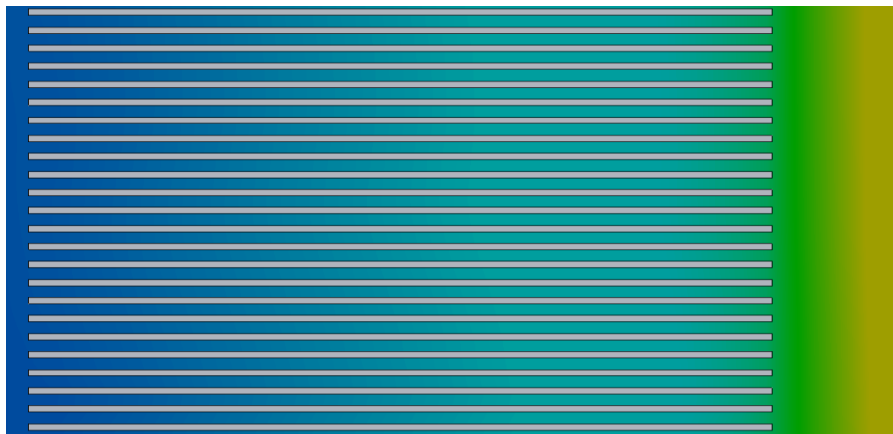


Εικόνα 6.5.16: Διανύσματα ταχυτήτων

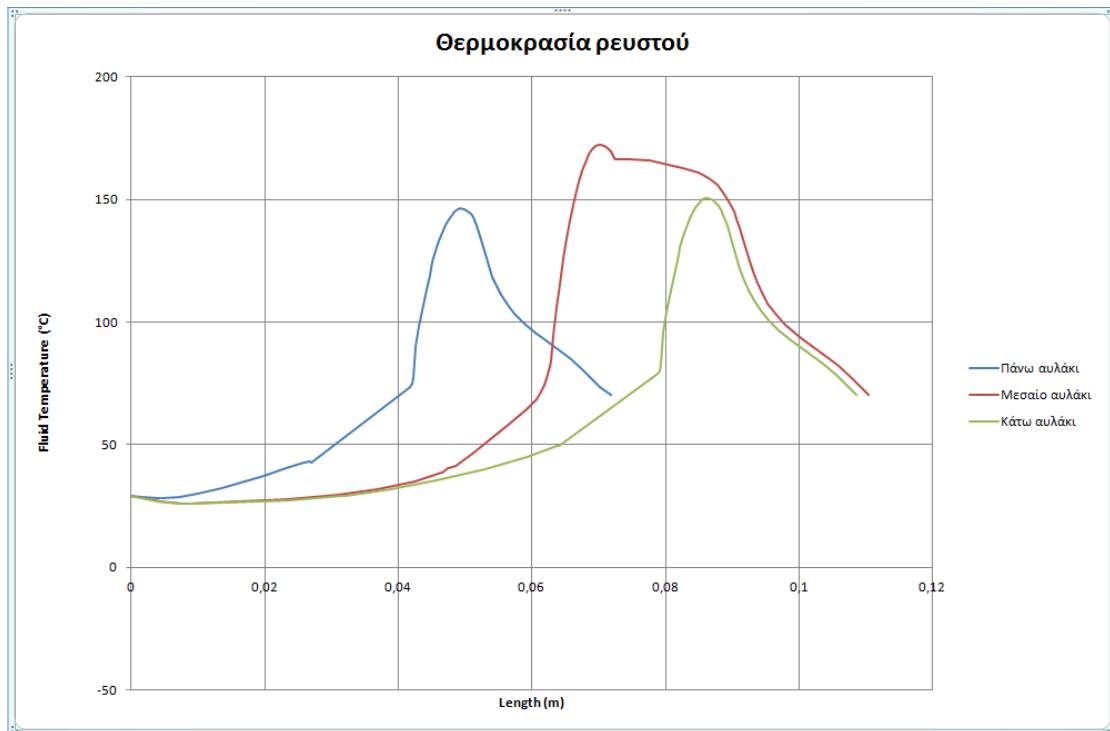
Από τα διανύσματα ταχυτήτων παρατηρούμε ότι δεν δημιουργείται πλέον στροβιλισμός της ροής στις εισόδους, λόγω της μείωσης της παροχής μάζας και της ταχύτητας. Από τις γραμμές ροής, οι οποίες έχουν χρωματιστεί σύμφωνα με την θερμοκρασία του ρευστού, φαίνεται ότι στο κέντρο του μικρο-εναλλάκτη οι ταχύτητες είναι σχεδόν μηδενικές, γεγονός που σημαίνει ότι εκεί αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και δεν επιτυγχάνεται ορθώς η ψύξη της πλάκας. Η κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα και το διάγραμμα:



Εικόνα 6.5.17: Κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού

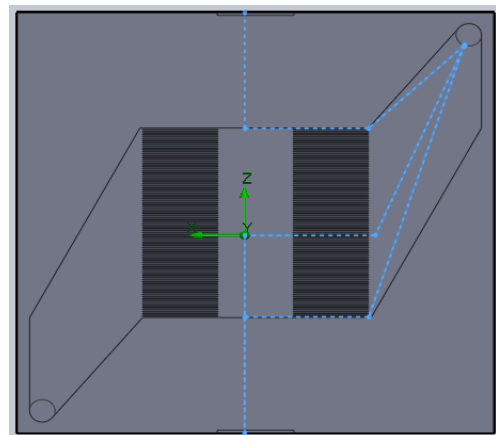


Εικόνα 6.5.18: Κατανομή της θερμοκρασίας εντός των αυλακίων

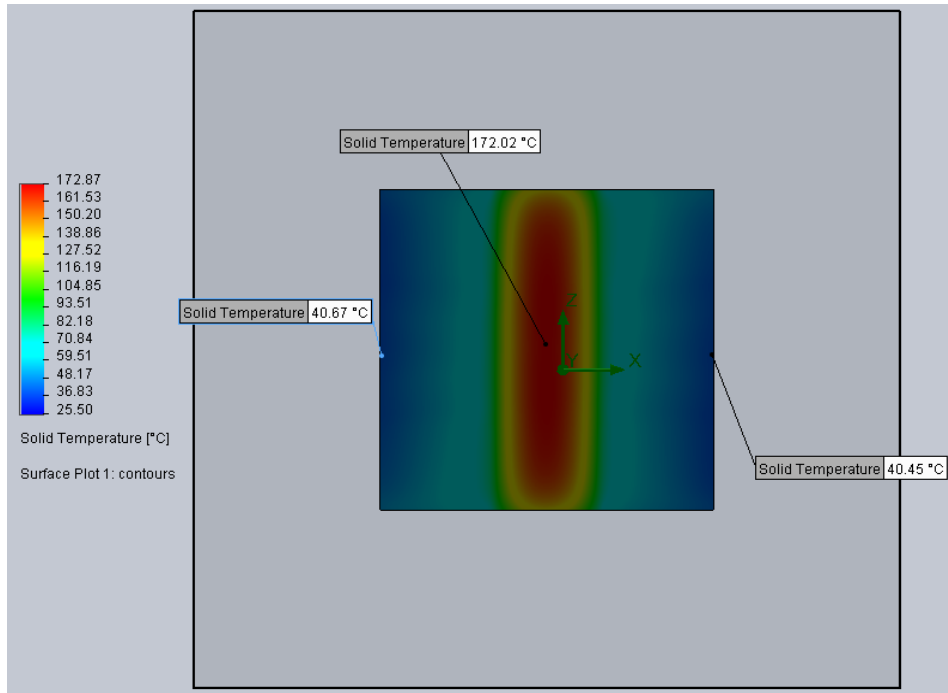


Διάγραμμα 6.5.4

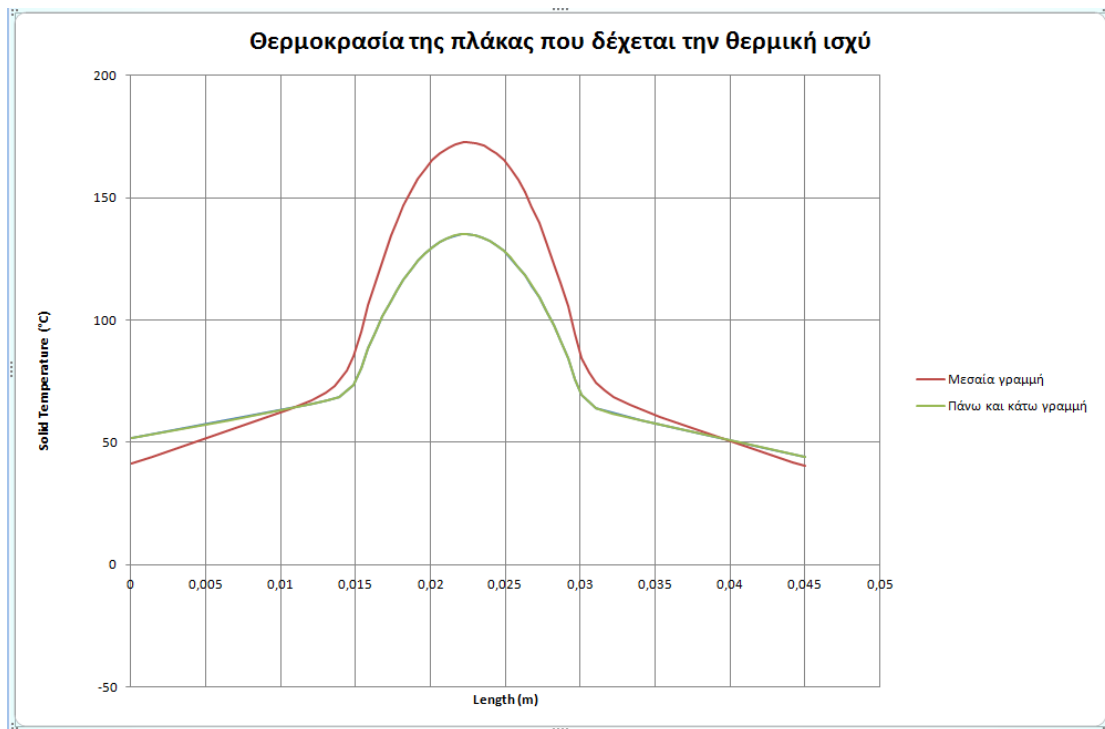
Οι τιμές για το παραπάνω διάγραμμα έχουν ληφθεί από τις τρεις γραμμές ροής που φαίνονται στο διπλανό σχήμα (Εικόνα 6.5.19:). Παρατηρούμε ότι και στις τρεις γραμμές ροής, η θερμοκρασία μέσα στα αυλάκια αυξάνει ομοιόμορφα φτάνοντας στους 80°C . Στην κεντρική περιοχή του μικρο-εναλλάκτη όμως, όπου πλέον δεν υπάρχουν αυλάκια, η θερμοκρασία αυξάνει απότομα ξεπερνώντας τους 145°C . Οι θερμοκρασίες αυτές φυσικά είναι απαγορευτικές, αφού εξατμίζεται το νερό και δεν επιτυγχάνεται η ορθή ψύξη του φωτοβολταϊκού πάνελ. Το ρευστό εξέρχεται τελικά στους 70°C , όπως αναμενόταν από τους υπολογισμούς.



Η θερμοκρασία της πλάκας που δέχεται την θερμική ισχύ παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα και στο διάγραμμα.

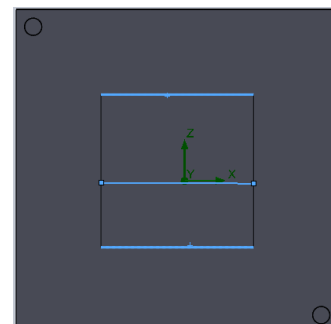


Εικόνα 6.5.20: Κατανομή της θερμοκρασίας της πλάκας που δέχεται την θερμική ισχύ

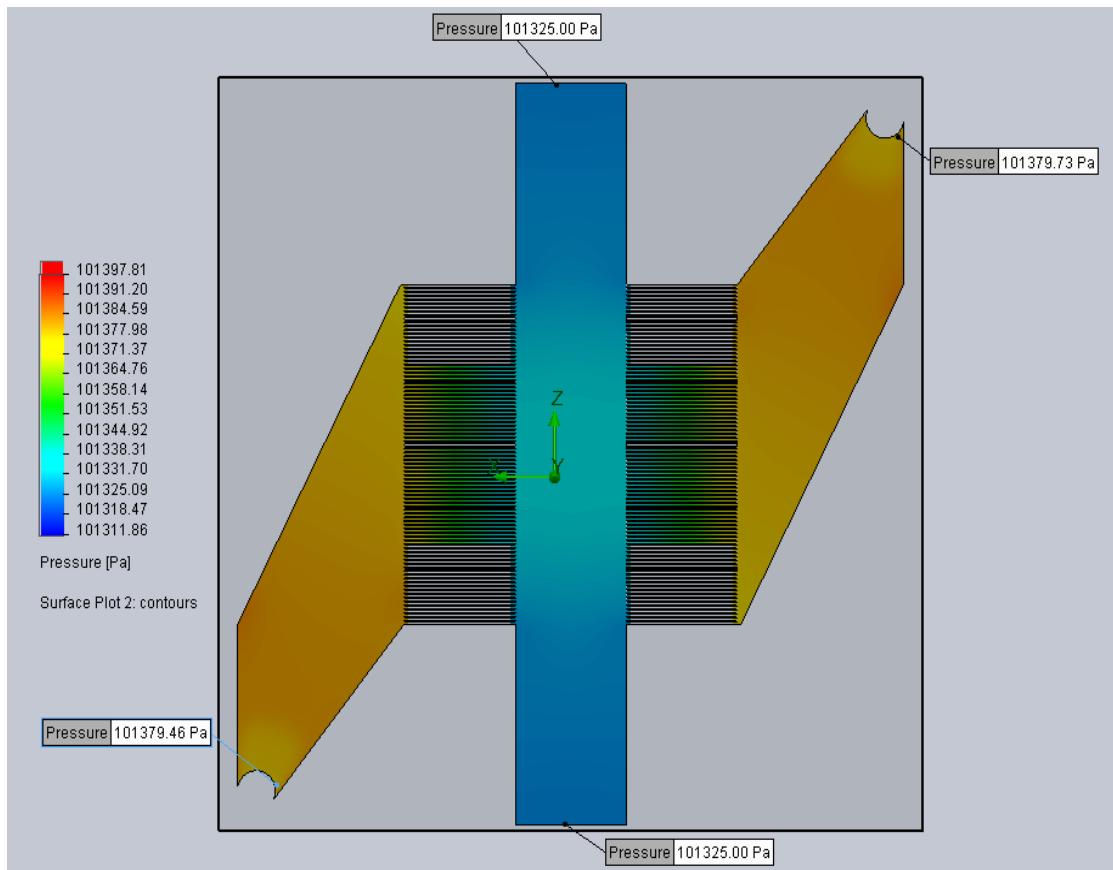


Διάγραμμα 6.5.5

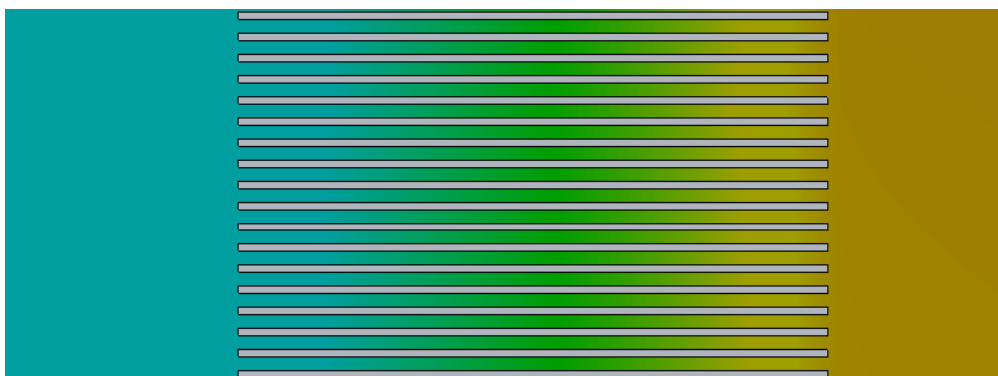
Οι τιμές για τον σχεδιασμό του παραπάνω διαγράμματος λήφθησαν από τις τρεις γραμμές της διπλανής εικόνας (Εικόνα 6.5.21):. Οι καμπύλες της πάνω και τις κάτω γραμμής ταυτίζονται. Είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει ομοιομορφία της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της πλάκας. Η



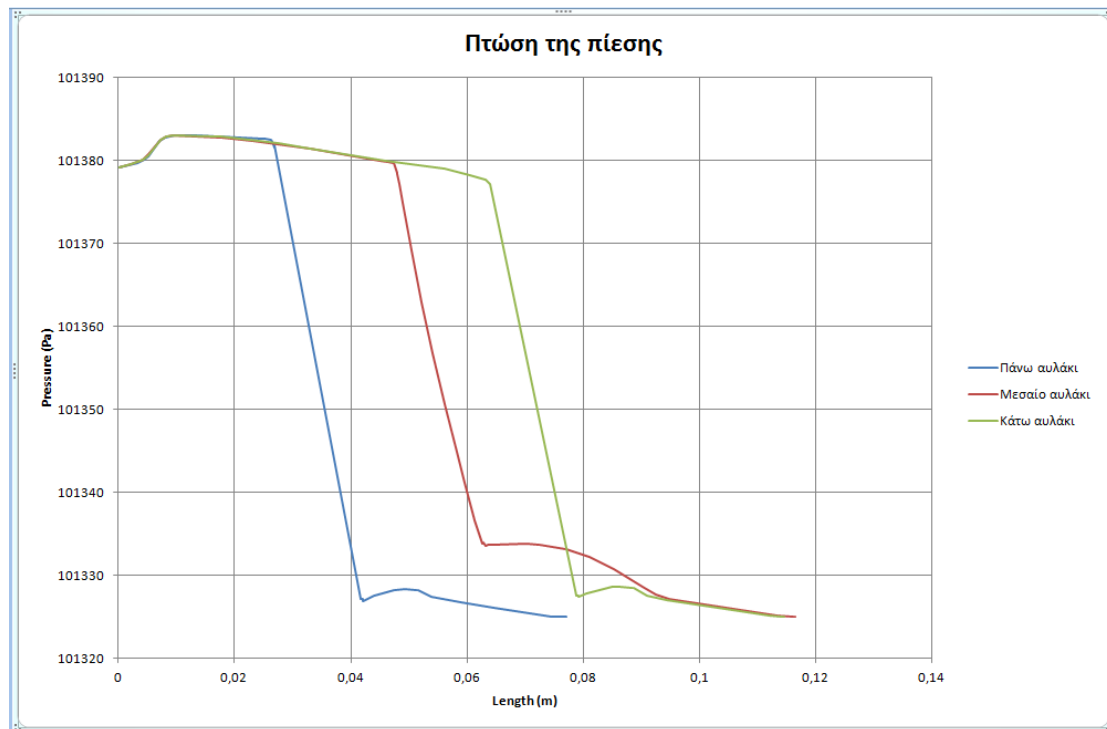
τυπική απόκλιση του δείγματος (υπολογίσθηκε όπως πριν) είναι πλέον 42.14°C , τιμή πολύ υψηλότερη από αυτήν του πρώτου μικρο-εναλλάκτη. Επομένως, με την συγκεκριμένη γεωμετρία δεν ικανοποιείται το δεύτερο κριτήριο. Τέλος, τα αποτελέσματα της πτώσης της πίεσης του ρευστού παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 6.5.22: Πτώση της πίεσης



Εικόνα 6.5.23: Πτώση της πίεσης στο εσωτερικό των αυλακίων

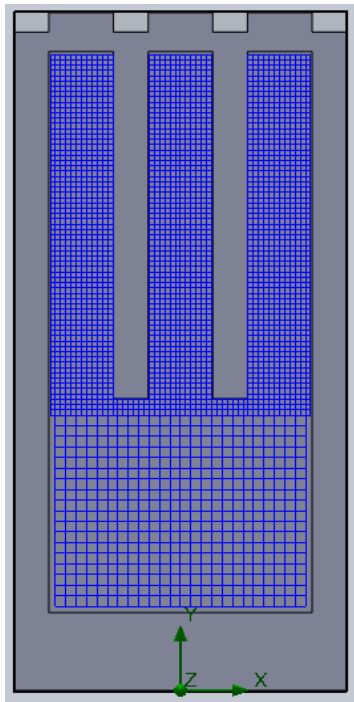


Διάγραμμα 6.5.6

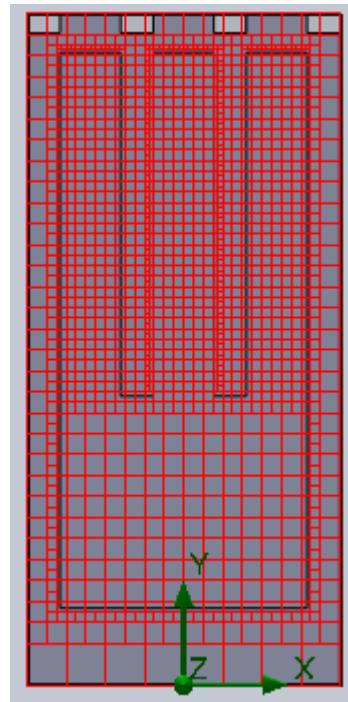
Για τον σχεδιασμό του παραπάνω διαγράμματος χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις γραμμές ροής που σχεδιάστηκαν για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ρευστού. Η πτώση της πίεσης κυμαίνεται τώρα στα 57 Pa, τιμή μικρότερη από αυτήν του πρώτου μικρο-εναλλάκτη. Επομένως, το τρίτο κριτήριο πληρείται από τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Καταληκτικά, ο σχεδιασμός του δεύτερου μικρο-εναλλάκτη ήταν χειρότερος από αυτόν του πρώτου, αφού η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας της πλάκας αυξήθηκε, αναπτύχθηκαν θερμοκρασίες του νερού μεγαλύτερες από 100°C και συνεπώς **απορρίπτεται**.

6.5.3 Τρίτος μικρο-εναλλάκτης

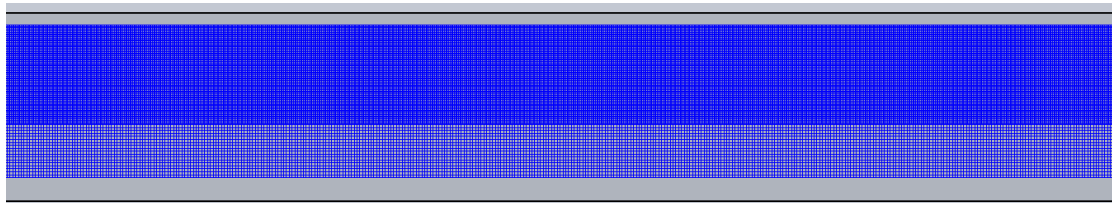
Από την γεωμετρία των παραπάνω μικρο-εναλλακτών που μελετήθηκαν, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όταν η ροή είναι παράλληλη στην επιφάνεια της πλάκας, δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί η ομοιομορφία της θερμοκρασίας της. Για τον λόγο αυτό, ο τρίτος μικρο-εναλλάκτης σχεδιάζεται έτσι ώστε η ροή να είναι κάθετη στην επιφάνεια της πλάκας. Αρχικά, όπως και στην προηγούμενη γεωμετρία, παρουσιάζεται η διακριτοποίηση που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



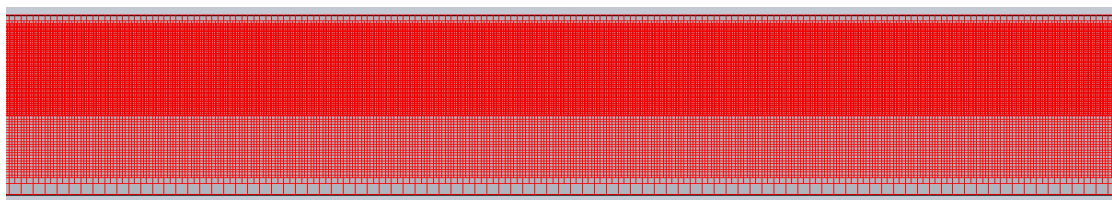
Εικόνα 6.5.24: Πρόοψη σε τομή (ρευστό)



Εικόνα 6.5.25: Πρόοψη σε τομή (στερεό)

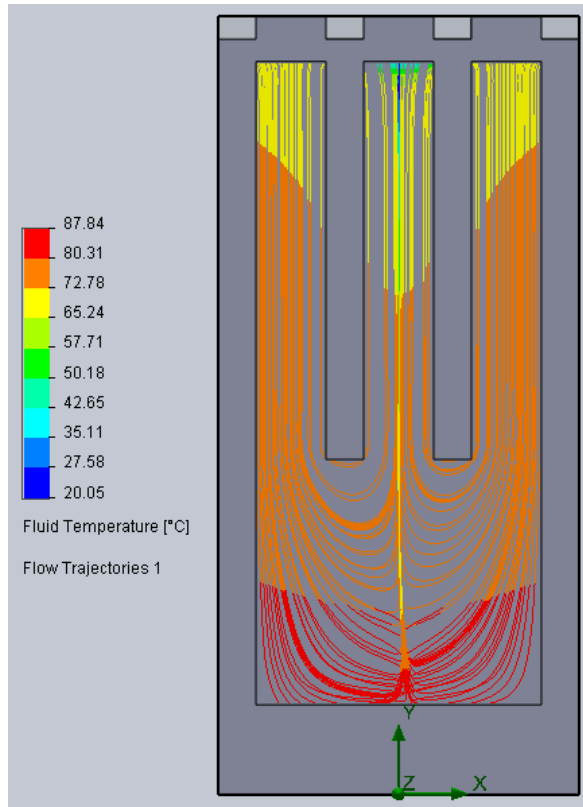


Εικόνα 6.5.26: Πλάγια όψη εξ αριστερόν (ρευστό)

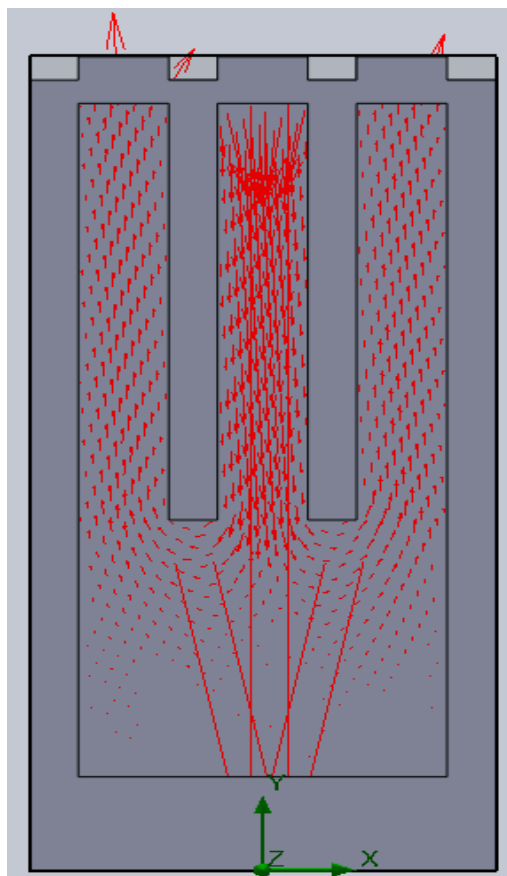


Εικόνα 6.5.27: Πλάγια όψη εξ αριστερόν (στερεό)

Παρατηρούμε ότι στο κάτω μέρος του εναλλάκτη, το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί είναι πιο αραιό. Αυτό συμβαίνει, λόγω των υπολογιστικών στόχων που έχουν τεθεί στην είσοδο και την έξοδο. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι γραμμές ροής (ο χρωματισμός τους έχει γίνει σύμφωνα με την θερμοκρασία του ρευστού) και τα διανύσματα ταχυτήτων.



Εικόνα 6.5.28: Γραμμές ροής



Εικόνα 6.5.29: Διανύσματα ταχυτήτων

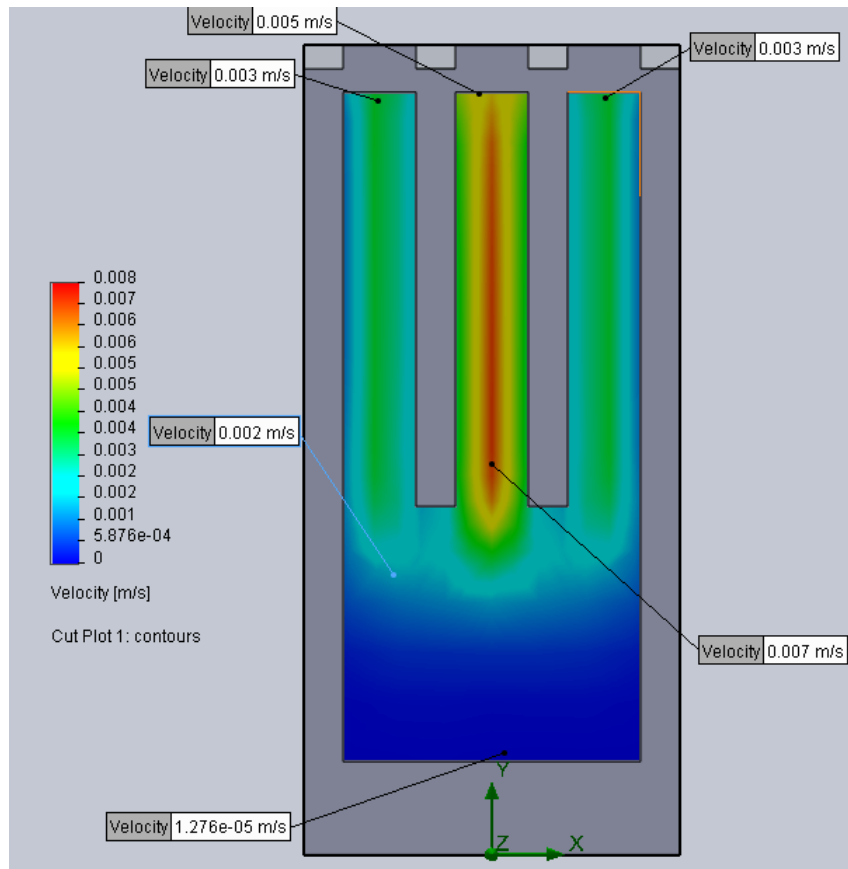
Στις παραπάνω εικόνες είναι εμφανές ότι στο κέντρο του εναλλάκτη εμφανίζεται η μέγιστη ταχύτητα, ενώ στα αυλάκια εξόδου υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή. Στο κάτω μέρος του μικρο-εναλλάκτη, οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές και λαμβάνοντας επίσης υπόψη την κρούση του ρευστού στην πλάκα, αναμένεται να επιτευχθεί η ομοιομορφία της θερμοκρασίας της. Η συνολική παροχή μάζας παραμένει και εδώ 12 kg/h. Έτσι, επειδή υπάρχουν συνολικά 45 είσοδοι, στην συγκεκριμένη είσοδο που μελετάται, η παροχή μάζας είναι $\frac{12 \text{ kg/h}}{45} \Leftrightarrow \dot{m} = 0.266666 \text{ kg/h}$. Έτσι, η ταχύτητα εισόδου για κάθε αυλάκι υπολογίζεται όπως προηγουμένως:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{0.2666666 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 0.00001413 \text{ m}^2} \Leftrightarrow V = 0.005253 \text{ m/s}, \text{ όπου}$$

$$A = (0.314 \times 45) \text{ mm}^2 = 0.00001413 \text{ m}^2 \text{ και ο αριθμός Reynolds}$$

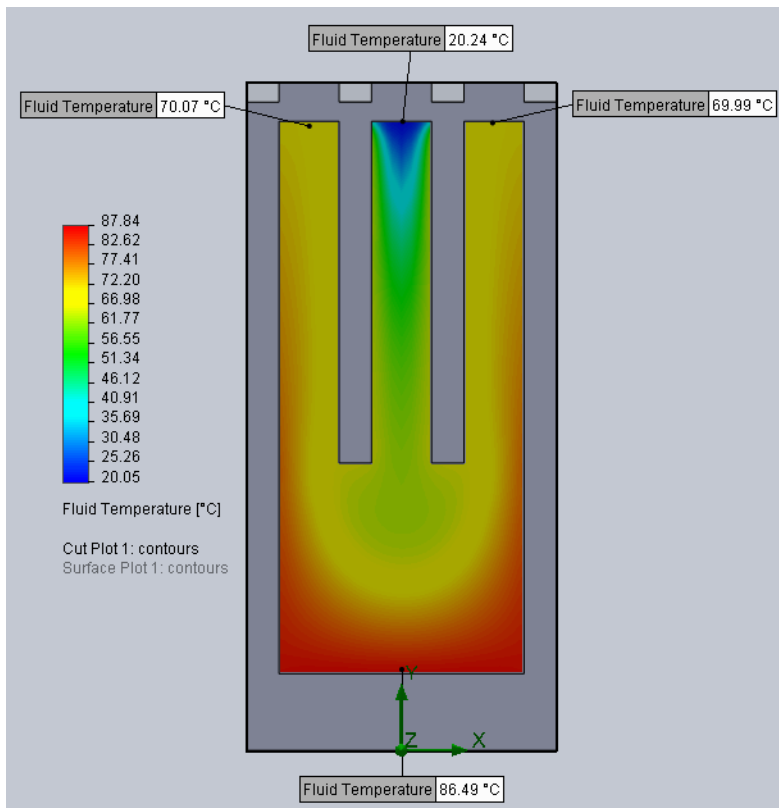
$$\text{Re} = \frac{V D_h}{\nu} = 3.28, \text{ όπου } D_h = \frac{4A}{\Pi} \text{ με } \Pi = 2(0.314 + 45) \text{ mm}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται και η κατανομή ταχύτητας εντός του μικρο-εναλλάκτη:

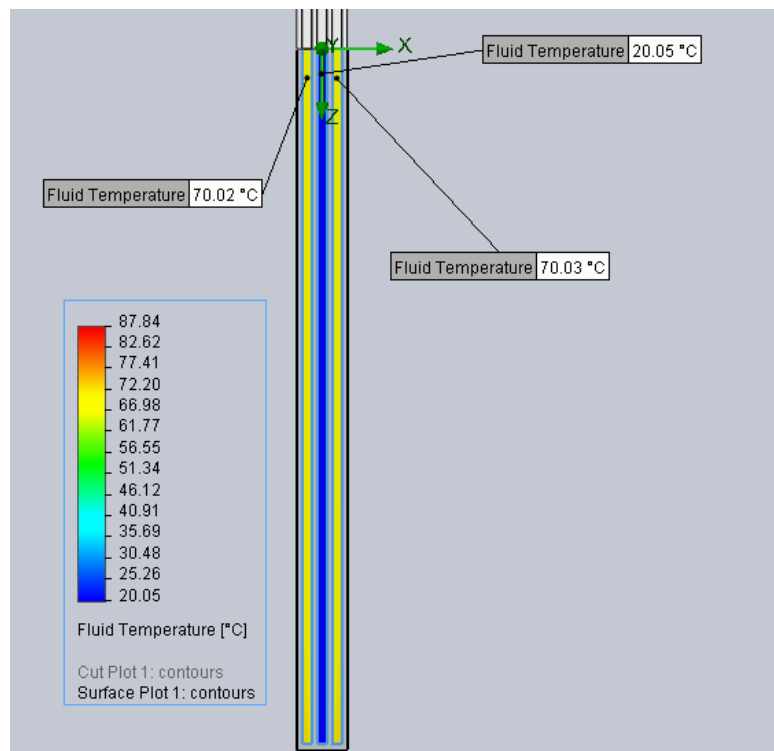


Εικόνα 6.5.30: Κατανομή της ταχύτητας

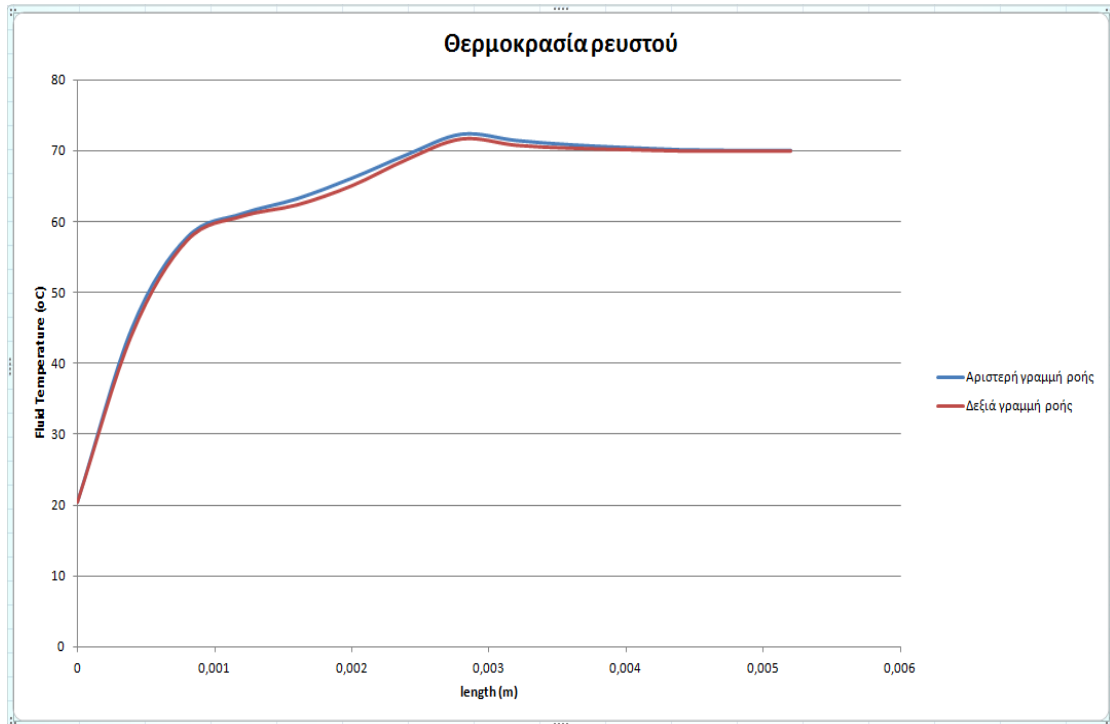
Ξεκινώντας με τον έλεγχο των κριτηρίων, παρακάτω παρατίθενται η εικόνα της κατανομής της θερμοκρασίας του ρευστού εντός του μικρο-εναλλάκτη και το αντίστοιχο διάγραμμα.



Εικόνα 6.5.31: Θερμοκρασία του ρευστού (πρόψη)

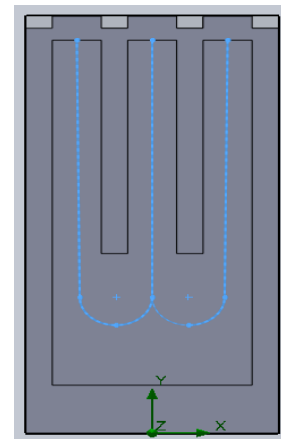


Εικόνα 6.5.32: Θερμοκρασία του ρευστού (άνοψη)



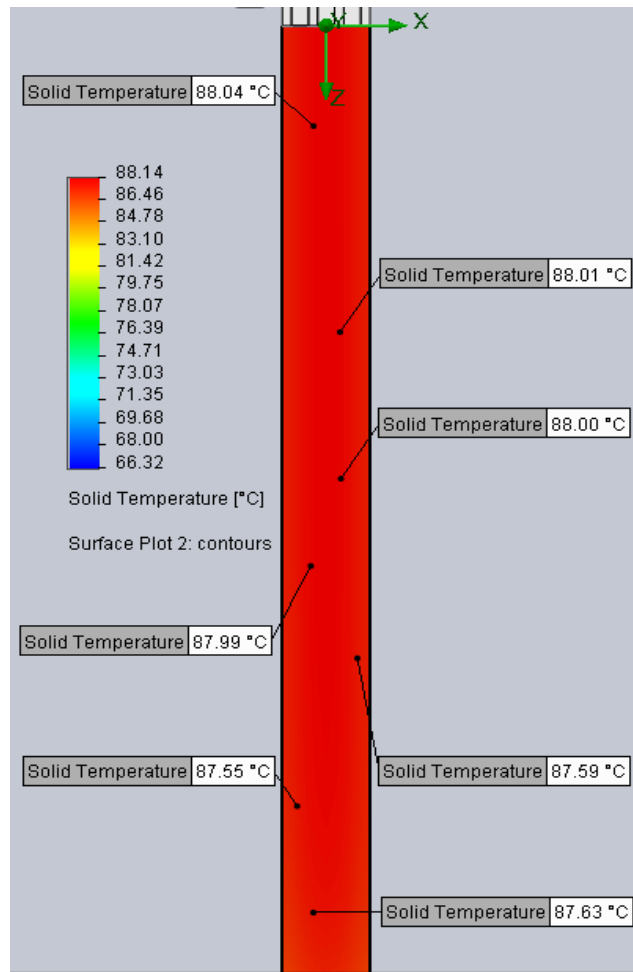
Διάγραμμα 6.5.7

Το παραπάνω διάγραμμα σχεδιάστηκε με βάση τις τιμές των θερμοκρασιών των γραμμών ροής που φαίνονται στη διπλανή εικόνα. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού είναι 70°C κατά μήκος όλου του αγωγού εξόδου (άνοξη). Επιπλέον, οι δύο γραμμές ροής ακολουθούν ταυτόσημη μεταβολή της θερμοκρασίας τους, γεγονός που καταδεικνύει την ορθή ακρίβεια των υπολογισμών και την εκπλήρωση του πρώτου κριτηρίου.

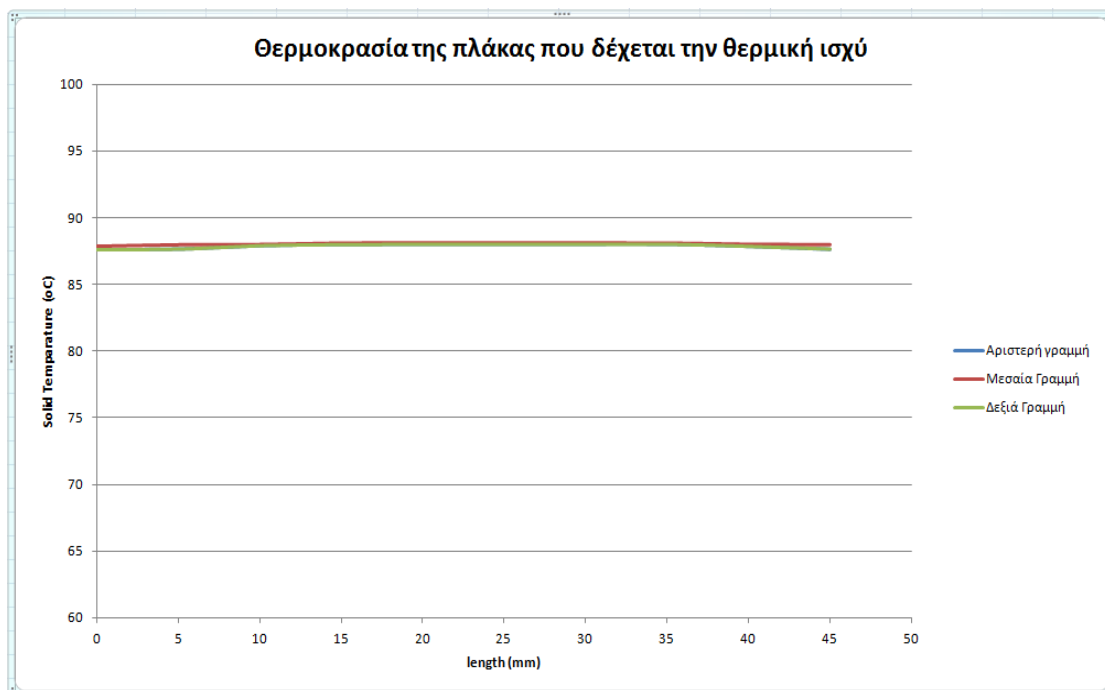


Εικόνα 6.5.33:

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας της πλάκας που δέχεται την θερμική ισχύ:

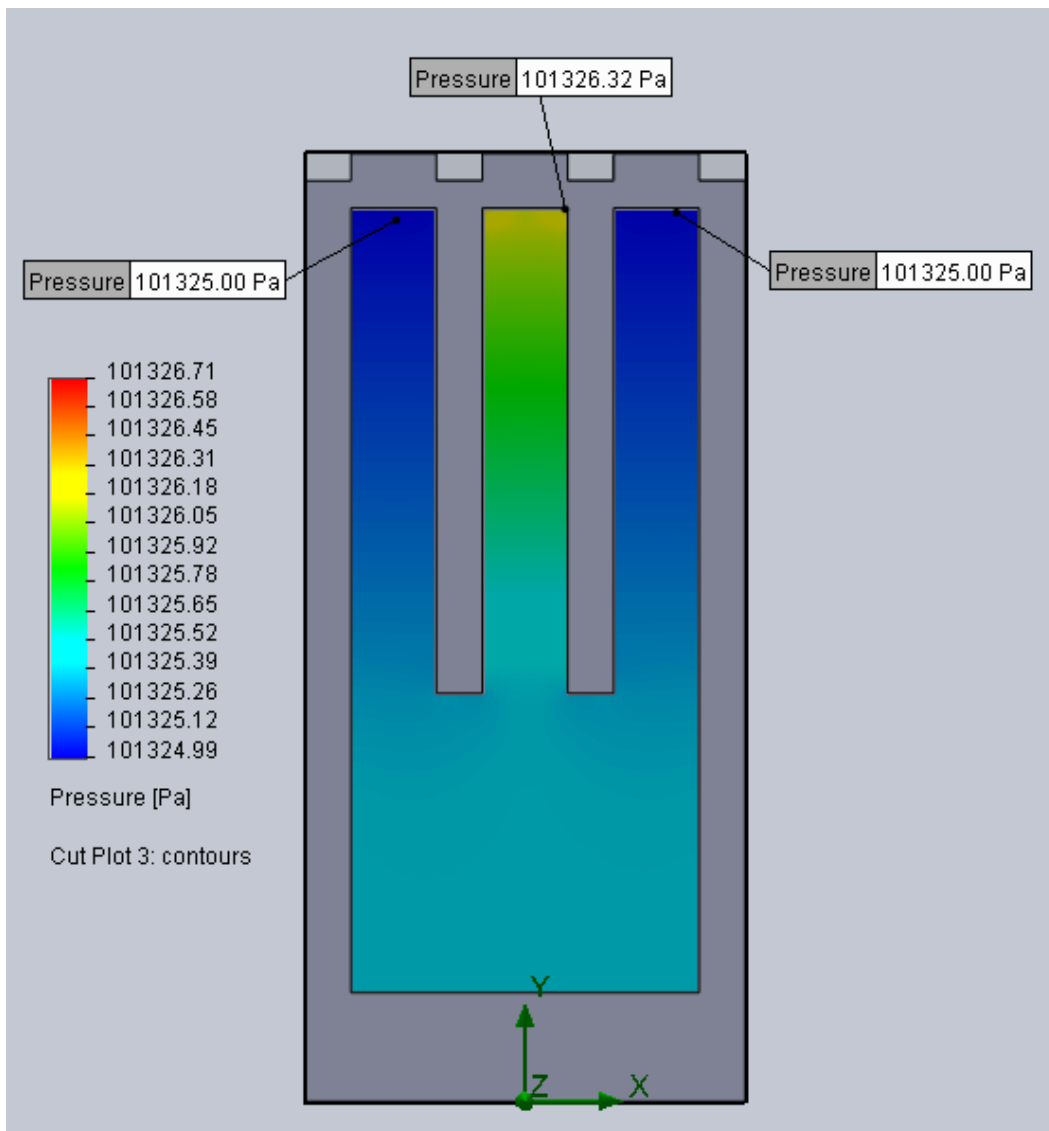


Εικόνα 6.5.34: Κατανομή της θερμοκρασίας της πλάκας

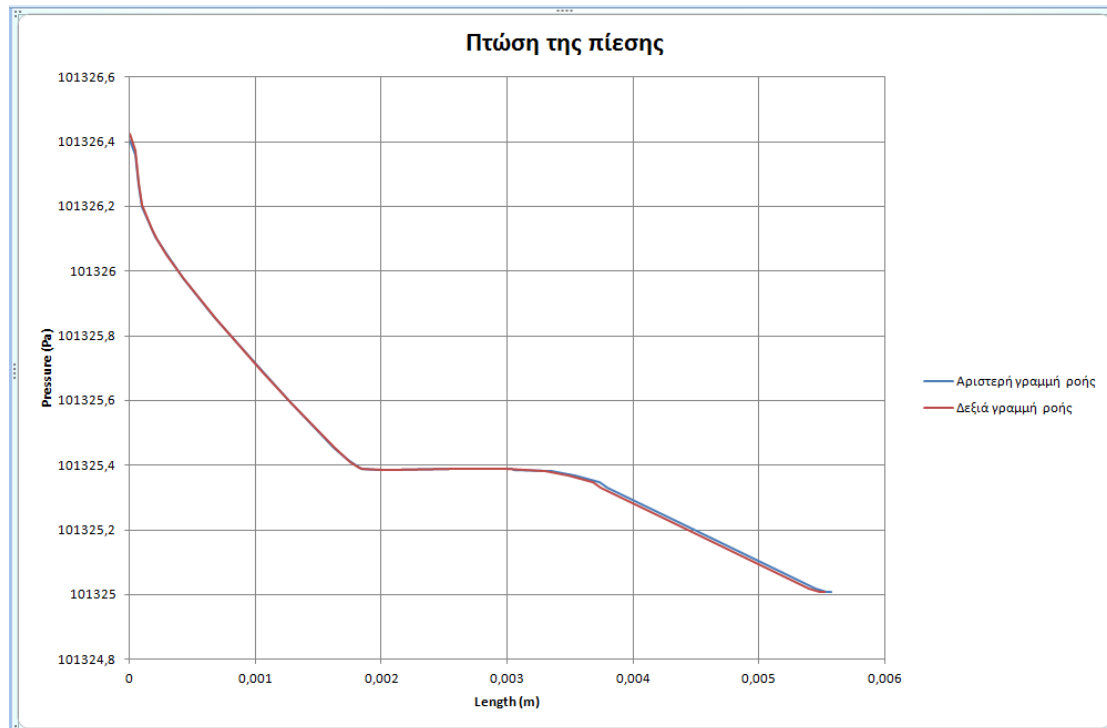


Διάγραμμα 6.5.8

Τα αποτελέσματα για το σχεδιασμό του παραπάνω διαγράμματος προκύπτουν από την κατανομή της θερμοκρασίας τριών γραμμών κατά μήκος της εξόδου (αριστερά, μέση και δεξιά). Είναι εμφανές ότι πλέον υπάρχει ομοιομορφία της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της κάτω πλάκας. Η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων που υπολογίζεται όπως και προηγουμένως, προκύπτει $\sigma = 0,18^{\circ}\text{C}$. Έτσι, η γεωμετρία του συγκεκριμένου μικρο-εναλλάκτη πληροί και το δεύτερο κριτήριο. Τέλος, η πτώση της πίεσης παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα και στο διάγραμμα:



Εικόνα 6.5.35: Πτώση της πίεσης



Διάγραμμα 6.5.9

Οι δύο γραμμές ροής που σχεδιάστηκαν για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ρευστού, χρησιμοποιήθηκαν για την χάραξη του παραπάνω διαγράμματος. Η πτώση της πίεσης του ρευστού ανέρχεται μόλις στα 1.4 Pa, εκπληρώνοντας έτσι και το τρίτο κριτήριο. Τελικά, ο τρίτος μικρο-εναλλάκτης θερμότητας **επιλέγεται** για την ψύξη του φωτοβολταϊκού πάνελ.

6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, τα τελικά αποτελέσματα των τριών μικρο-εναλλακτών θερμότητας που αναλύθηκαν παραπάνω, με βάση τα τρία κριτήρια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

	Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού (°C)	Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας της πλάκας (°C)	Πτώση της πίεσης (Pa)
1 ^{ος} μικρο-εναλλάκτης	70	18,02	245
2 ^{ος} μικρο-εναλλάκτης	70	42,14	57
3^{ος} μικρο-εναλλάκτης	70	0,18	1.4

Πίνακας 6.6.1: Τελικά αποτελέσματα

Υποθέτοντας ότι η μέση ημερήσια λειτουργία του συγκεκριμένου υβριδικού συστήματος στην Ελλάδα θα είναι 12 ώρες, θα παράγονται 3.6 KWh ηλεκτρικού ρεύματος και 144 kg ζεστού νερού (θερμοκρασίας 70°C) ημερησίως. Έχοντας υπόψη την οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενεργειακή αυτονομία των κτιρίων [1], προτείνεται το συγκεκριμένο ενεργειακό σύστημα.

Για παράδειγμα, μία κατοικία εμβαδού 100m² , στην οποία διαμένει μία οικογένεια τεσσάρων ατόμων, έχει μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος περίπου 2000 KWh. Το 25% περίπου δαπανάται για την θέρμανση νερού (θερμοσίφωνα) και έτσι απομένουν άλλες 1500 KWh. Το συγκεκριμένο υβριδικό σύστημα προσφέρει το απαιτούμενο ζεστό νερό και παράγει ακόμα περίπου 1300 KWh ετησίως. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι με αυτό το σύστημα, η κατοικία γίνεται σχεδόν ενεργειακά αυτόνομη, αλλά και με την χρήση ενός μεγαλύτερου συγκεντρωτικού πιάτου (για την κάλυψη και των αναγκών θέρμανσης της κατοικίας), το κτήριο θα έχει μηδενική κατανάλωση ενέργειας, όπως προβλέπει και η προαναφερθείσα οδηγία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΟΔΗΓΙΑ 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19^{ης} Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων
- [2] Φραγκιαδάκης Ι., **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ** , 2^η έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2006
- [3] Καγκαράκης Κ., **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ** , Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα 1992
- [4] Σταμάτης Δ. Πέρδιος, **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ**, Εκδόσεις Τσέλκα-4Μ, Γ Έκδοση, Αθήνα 2011
- [5] Richard H. Bube **PHOTOVOLTAIC MATERIALS** ,Imperial College Press
- [6] T. Markvart **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**
- [7] Darren M. Bagnall , Matt Boreland **Photovoltaic technologies** Energy Policy 2008
- [8] L.El Chaar ,L.A. lamont , N. El Zein **Review of Photovoltaic technologies** Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011
- [9] www.selasenergy.gr/fv_systems.php
- [10] P. Perez-Higueras ,E. Munoz , G. Almondacid , P.G. Vidal **High Concentrator PhotoVoltaics efficiencis** Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010
- [11] B. Burnett **The Basic Physics and Design of III-V Multijunction Solar Cells** April 1, 2005

- [12] R. R. King, R. A. Sherif, C. M. Fetzer, P. C. Colter, *Advances in High-Efficiency Multijunction Terrestrial Concentrator Cells and Receivers*, in Proc. Of NCPV and Solar Program Review Meeting 2003
- [13] Antonio Marti and Antonio Luque, *Next Generation Photovoltaics*, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia 2004
- [14] S.R. Kurtz, D. Myers, and J. M. Olson, *Projected Performance of Three- and Four-Junction Devices Using GaAs and GaInP* in Proc. of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997
- [15] S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, New York: Prentice Hall, 2001
- [16] Antonio Luque, Viacheslav Andreev *Concentrator Photovoltaics* Springer Series in Optical Sciences, 2007
- [17] M.A. Stan, D.J. Aiken, P.R. Sharps, N.S. Fatemi, F.A. Spadafora, J. Hills, H. Yoo, B. Clevenger, *27.5% Efficiency InGaP/InGaAs/Ge Advanced Triple Junction (ATJ) Space Solar Cells for High Volume Manufacturing* in Proc. of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002
- [18] M.A. Stan, P.R. Sharps, N.S. Fatemi, F.S. Spadafora, D.J. Aiken, H.Q. Hou, *Design and Production of Extremely Radiation-Hard 26% InGaP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells* in Proc. of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000
- [19] <http://www.spectrolab.com/DataSheets/cells/PV%20XTJ%20Cell%2005-20-10.pdf>
- [20] Ghassan Zubi , Jose L. Bernal-Agustin , Gian Vincenzo Fracastoro *High concentration photovoltaic systems applying III-V cells* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009

- [21] Algora C and D'iaz V *Influence of series resistance on guidelines of manufacture of concentrator p-on-n GaAs solar cells* 2000
- [22] Ξενοφών Κακάτσιος Καθηγητής Ε.Μ.Π, *Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης* , Εκδόσεις Σημαιών Αθήνα 2006
- [23] Frank Kreith – Mark S.Bohn, *Principles of Heat Transfer fifth edition*, PWS Publishing Company
- [24] Hans Dieter Baehr-Karl Stephan, *Heat and Mass Transfer*, Springer
- [25] S.p. Phipips , G. Peharz , R.Hoheisel , T. Hornung , N.M. Al-Abbadi , F. Dimroth , A.W. Bett *Energy harvesting efficiency of III-V triple-junction concentrator solar cells under realistic spectral conditions* Solar Energy Materials & Solar Cells 2010
- [26] A.P. Kirk *Proposal for a high voltage AlGaAs/AlGaAs/GaAs triple junction photovoltaic cell* Solar Energy Materials & Solar Cells 2010
- [27] Cherng-Tsong Kuo , Hwa-Yuh Shin, Hwen-Fen Hong, Chih-Hung Wu, Cheng-Dar Lee, I-Tao Lung, Yao-Tung Hsu *Development of the high concentration III-V photovoltaic system at Iner, Taiwan* Renewable Energy 2009
- [28] Kensuke Nishioka , Tatsuya Takamoto, Takaaki Agui, Minoru Kaneiwa, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki *Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar*

- cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator systems* Solar Energy Materials & Solar Cells 2006
- [29] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, N.J. Ekins-Daukes, T. Egami, M. Hiramatsu, Y. Miyazaki, M. Yamaguchi *Packaging III-V tandem solar cells for practical terrestrial applications achievable to 27% of module efficiency by conventional machine assemble technology* Solar Energy Materials & Solar Cells 2006
- [30] Z. Q. Li, Y.G. Xiao, Z.M. Simon Li *Modeling of multi-junction solar cells by Crosslight APSYS* High and Low Concentration for Solar Electric Applications
- [31] K.Lovengrove, G. Burgess, J. Pye *A new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator* Australian National University 2010
- [32] Hossein Mousazadeh, Alireza Keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrinia, Ahmad Sharifi *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar system output* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009
- [33] Ibrahim Sefa, Mehmet Demirtas, Ilhami Colak *Application of one-axis sun tracking system* Energy Conversion and Management 2009
- [34] George C. Bakos *Design and construction of two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement* Renewable Energy 2006
- [35] Kwasi Foli, Tatsuya Okabe, Markus Olhofer, Yaochu Jin, Bernhard Sendhoff *Optimization of micro heat exchanger: CFD, analytical approach and multi-objective algorithms* International Journal of Heat and Mass Transfer 2005

[36] N. Garcia-Hernando, A. Acosta-Iborra, U. Ruiz-Rivas, M. Izquierdo
Experimental investigation of fluid and heat transfer in a single-phase liquid flow micro-heat exchanger International Journal of Heat and Mass Transfer 2009

[37] Ioannis K. Karathanassis, Elias Papanicolaou, Vassilios Belessiotis, Georgios C. Bergeles
Design and Optimization of a Micro Heat Sink for Concentrating Photovoltaic / Thermal Systems 3rd Micro and Nano Flows Conference