



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

## Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά με έμφαση στο σχεδιασμό του συγκεντρωτή



---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΤΟΥ**  
**ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗ**

---

Επιβλέπων Καθηγητής:  
Γεώργιος Χ. Μπεργελές

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



*Στους γονείς μου*  
*Αθανασία και Αθανάσιο*





Σε αυτό το σημείο θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γεώργιο Μπεργελέ, για το χρόνο που μου διέθεσε, την καθοδήγησή του και την υπομονή του. Χωρίς την πολύτιμη βοήθειά του, η υλοποίηση αυτής της διπλωματικής δε θα ήταν εφικτή. Θέλω επίσης να τον ευχαριστήσω για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με καινούριους για εμένα τομείς, που θα μου είναι απαραίτητοι στην πορεία μου μετά το πέρας των σπουδών μου.

Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την υπομονή, την αμέριστη συμπαράσταση και την αγάπη της. Τέλος, δεν μπορώ να ξεχάσω τους φίλους μου για τη βοήθεια και τη στήριξή τους σε όλη τη φοιτητική μου πορεία.

Αλεξανδρίδης Αναστάσιος

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



## Περίληψη

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας. Μία μορφή ΑΠΕ είναι και η ηλιακή ενέργεια.

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός υβριδικού συγκεντρωτικού συστήματος. Δηλαδή ενός συστήματος που θα μας παρέχει τόσο ηλεκτρισμό όσο και θερμότητα, μορφές ενέργειας που χρειάζονται σε κάθε κτίριο.

Η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται από ένα παραβολικό κάτοπτρο σημειακής εστίασης, πάνω σε ένα φωτοβολταϊκό τριπλής επίστρωσης, έτσι ώστε να παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Όμως, από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται στο φωτοβολταϊκό, ένα μόνο μέρος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα.

Σκοπός λοιπόν αυτής της διπλωματικής είναι να επιλεγεί τόσο η κατάλληλη διάταξη και η βέλτιστη γεωμετρία του παραβολικού κατόπτρου για την ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας πάνω στα ηλιακά κελιά, όσο και να προταθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος θα μπορούσε να δώσει ικανοποιητικά ποσά θερμικής ενέργειας, ψύχοντας ταυτόχρονα το φωτοβολταϊκό και αυξάνοντας τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσής του.

Για την ανάλυση της ροής της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πρόγραμμα TracePro, ενώ για το σχεδιασμό του εναλλάκτη και την ανάλυση της ροής σε αυτόν, το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks.



## **Abstract**

The renewable energy sources (RES) can offer an alternative solution to power production. Such a source of energy is solar energy.

This thesis investigates the performance of a hybrid concentrated system. A system which can produce electrical power and thermal energy simultaneously; types of energy which are necessary in every building.

The solar irradiance is concentrated from a point focus dish on a triple junction photovoltaic, in order more electrical power to be produced. But only one part from the incident irradiance can be transformed to electrical power. The rest is transformed into thermal energy.

The purpose of this thesis is to choose the appropriate design and geometry of the dish in order to have uniform incident irradiance on the photovoltaic. In addition we propose a heat exchanger which can give us adequate thermal energy and cool the PV, increasing the electric efficiency of the PV.

For the simulation of the incidence irradiance the computational software TracePro is used, while for the design of the heat exchanger and the flow simulation SolidWorks is used.



## Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή.....	13
Διάρθρωση της εργασίας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	15
1.1 Συμβατικές και Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.....	15
1.2 Ενεργειακή Πολιτική στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.....	19
1.3 Στόχοι ΕΡΙΑ .....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	29
2.1 Ηλεκτρομαγνητική (ηλιακή) ακτινοβολία .....	29
2.2 Ήλιος.....	33
2.3 Θεωρία συγκεντρωτών και οι αποκλίσεις τους.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	51
3.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	51
3.1.1 Μια μικρογραφία φωτοβολταϊκού με συγκεντρωτικό συλλέκτη και θερμικό σύστημα .....	51
3.1.2 Ψύξη με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (CPVT) συστήματα.....	54
3.1.3 Αφαλάτωση με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (CPVT) συστήματα .....	59
3.1.4 Κάτοπτρα απομάκρυνσης υπεριώθων για συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά .....	62
3.1.5 Τριπλής επικάλυψης φωτοβολταϊκά κελιά (triple junction InGaP/InGaAs/Ge) για υψηλής συγκέντρωσης φωτοβολταϊκές εφαρμογές: έλεγχοι υποβάθμισης των ηλιακών δεκτών .....	64
3.1.6 Οπτική συμπεριφορά στο θερμοδυναμικό όριο με ειδικά φτιαγμένο σχεδιασμό ειδώλου.....	66
3.1.7 Μια επισκόπηση σε φωτοβολταϊκά/θερμικά υβριδικής ηλιακής τεχνολογίας .....	69
3.1.8 Θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών διατάξεων: Επισκόπηση σχετικών σχέσεων.....	74
3.1.9 Εκτίμηση της ετήσιας παραγωγής ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού τριπλής επίστρωσης InGaP/InGaAs/Ge, βασισμένο σε πειραματικά χαρακτηριστικά ηλιακών κελιών και πρακτική δοκιμή σε μετεωρολογικά δεδομένα .....	77
3.1.10 Φάσμα απορρόφησης triple junction.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	85
4.1 Γεωμετρία του παραβολικού συλλέκτη.....	85
4.2 Ανάλυση ροής ακτινοβολίας με το TracePro .....	86
4.3 Μελέτη διάταξης με δύο ανακλαστές .....	98
4.4 Ευαισθησία ως προς την παρακολούθηση της τροχιάς του ηλίου .....	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	121
5.1 Βασικός σχεδιασμός και διαστάσεις για τον εναλλάκτη.....	121

5.2	Προσομοίωση και επιλογή εναλλάκτη ψύξης του PV πάνελ.....	127
5.3	Ανάλυση επιλεγμένου εναλλάκτη.....	141
5.3.1	Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις συνθήκες λειτουργίας.....	151
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	153
6.1	Προτεινόμενο design για τη διάταξη.....	153
	Βιβλιογραφία.....	157
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	159
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	165
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	167
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	169



## Εισαγωγή

### Διάρθρωση της εργασίας

Στο **1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται μία αναφορά στις συμβατικές και ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, στην ενεργειακή πολιτική στην Ευρώπη και στην Ελλάδα καθώς και στους στόχους που έχουν τεθεί.

Στο **2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** δίνονται πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, βασικές πληροφορίες για τους συγκεντρωτές και ειδικότερα για τη γεωμετρία τους και τις αποκλίσεις τους.

Στο **3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση για τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά, τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται και κάποιες από τις εφαρμογές τους.

Στο **4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** με τη χρήση του TracePro γίνεται ανάλυση της ροής της ακτινοβολίας για δύο είδη διάταξης και για παραβολικά πιάτα με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επιλέγεται η πιο αξιολογη περίπτωση και η καλύτερη κατανομή της ακτινοβολίας πάνω στο φωτοβολταϊκό.

Στο **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο**, σχεδιάζονται διάφορα είδη εναλλακτών θερμότητας με τη χρήση του Solidworks, γίνεται ανάλυση ροής σε αυτούς με βάση την κατανομή της ακτινοβολίας από το προηγούμενο κεφάλαιο, αξιολογούνται τα αποτελέσματα και επιλέγεται ο πιο αξιολογος. Γίνεται ακόμα ανάλυση του επιλεγμένου εναλλάκτη.

Τέλος στο **6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** προτείνεται ένα design για τη διάταξη στην οποία έχουμε καταλήξει.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Συμβατικές και Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας

Οι πηγές ενέργειας που διατίθενται προς χρήση στον άνθρωπο σήμερα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, σε αυτές που υπάρχουν ως αποθέματα στη Γη και σε αυτές που ανανεώνονται καθημερινά. Οι πρώτες έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και αποτελούνται κυρίως από το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το κάρβουνο.

Οι δεύτερες προέρχονται κυρίως από τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει και εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί το γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική Ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (Ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλάσσιων ρευμάτων. Απορροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα). (Φραγκιαδάκης, 2009)

Οι κύριες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

- ✓ **Το κάρβουνο:** αποτελεί την κύρια καύσιμη ύλη
- ✓ **Το πετρέλαιο:** η κύρια εκμετάλλευσή του άρχισε στα τέλη του 15<sup>ου</sup> αιώνα, αλλά σήμερα λόγω της διαπίστωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι απαραίτητη η μείωση της χρήσης του και η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- ✓ **Η πυρηνική ενέργεια:** η χρήση της ξεκίνησε μετά το 1945 και πάνω της βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Δυστυχώς η ανεξέλεγκτη διάδοση των πυρηνικών όπλων αλλά και πιθανότητα ατυχημάτων με ιδιαίτερα σημαντικές και μη αναστρέψιμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστά την εκμετάλλευσή της λιγότερο επιθυμητή.

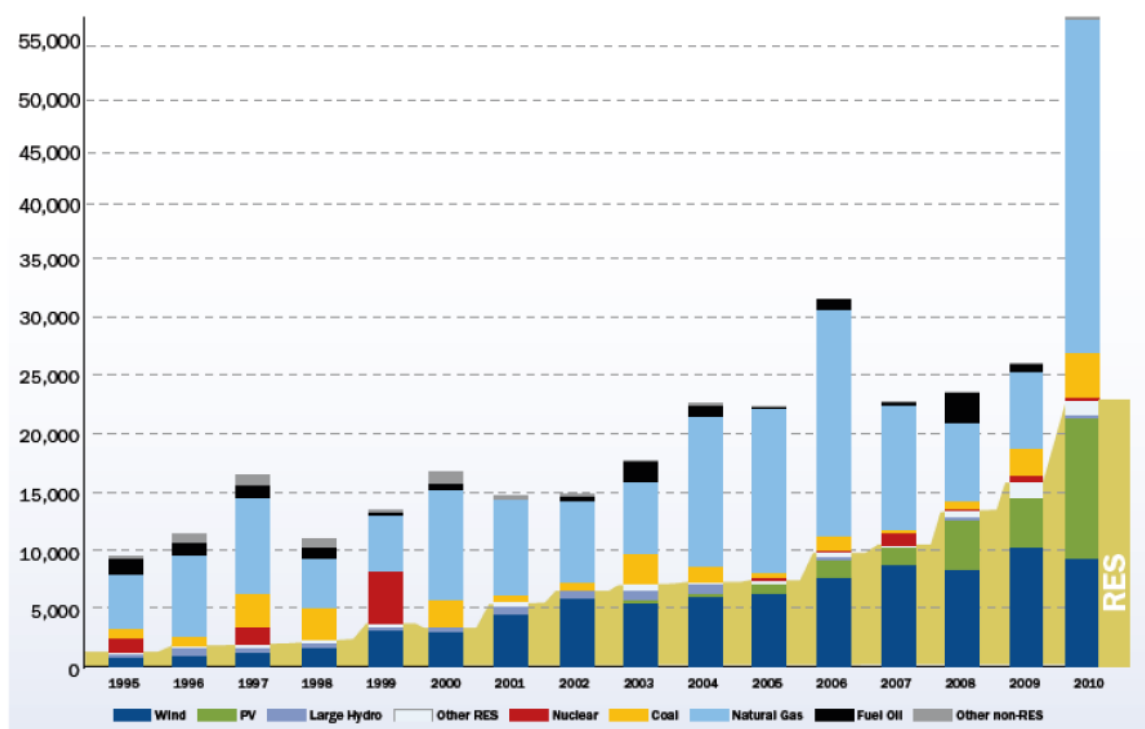
### Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οφείλονται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία. Η χρήση τους συμβάλλει στο να αποτραπεί η κλιματική αλλαγή.

Οι κύριες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι:

- ✓ **Υδατόπτωση:** εκμετάλλευση των όμβριων υδάτων με την κατασκευή φραγμάτων.
- ✓ **Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων**
- ✓ **Βιομάζα:** καλύπτει σήμερα το 14% της παγκοσμίως απαιτούμενης ενέργειας.
- ✓ **Γεωθερμική ενέργεια:** η ενέργεια των θερμών νερών που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους.
- ✓ **Αιολική Ενέργεια:** η εκμετάλλευση του ανέμου με ανεμογεννήτριες οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα παρουσιάζει σημαντική άνοδο τα τελευταία χρόνια
- ✓ **Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια:** το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ένα σύστημα δυο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση.

Η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των νέων εγκαταστάσεων ανήκουν στην τεχνολογία των ανανεώσιμων. Το 1995 η εγκατάσταση νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανέρχονταν σε 1,3 GW, δηλαδή στο 14% των νέων εγκαταστάσεων εκείνης της χρονιάς. Από τότε αυξάνονται σταδιακά σε 13,3 GW το 2008 που αντιστοιχεί στο 57% των νέων εγκαταστάσεων τότε και 17,3 GW το 2009, δηλαδή 63%. Στο 2010 ανέρχονταν στα 22,7 GW τα οποία λόγω των αυξημένων νέων σταθμών φυσικού αερίου αντιστοιχούν στο 41% της χρονιάς. Κάθε χώρα μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι υποχρεωμένη μέχρι το 2020 να παράγει περίπου το 20% της ενέργειας της από ανανεώσιμες πηγές. Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η πορεία των νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας από το 1995 μέχρι το 2010 στην Ευρώπη.



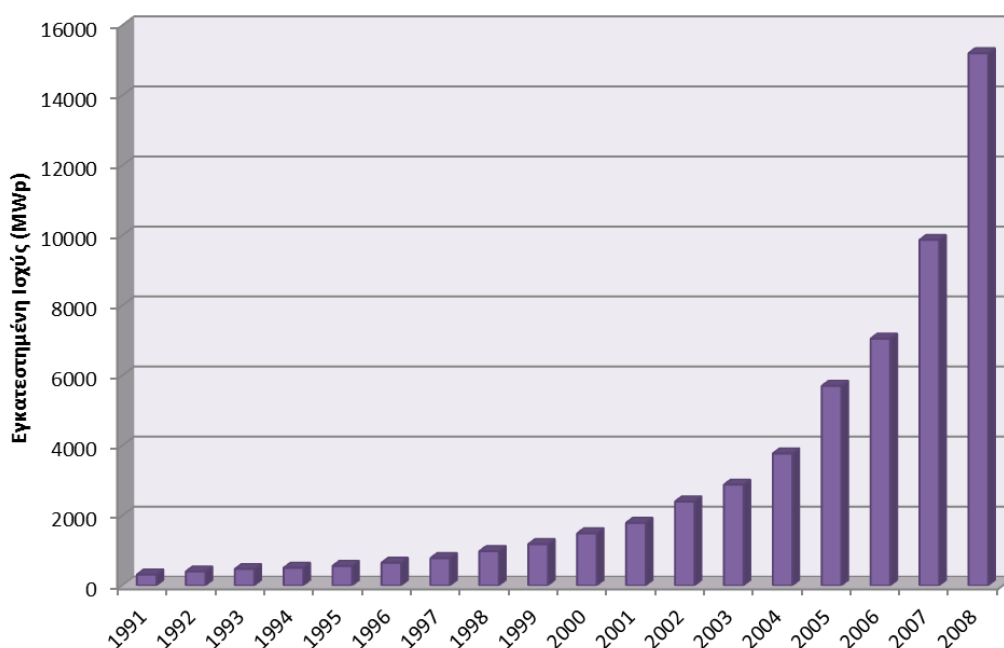
Διάγραμμα 1-EWEA

Από το διάγραμμα μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία. Το 1991 η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς από φωτοβολταϊκά ανέρχονταν σε 313,5 MWp, ενώ το 2008 η ισχύς αυτή ήταν 15,2 GWp, εκ των οποίων τα 9,5 GWp είναι στην Ευρώπη. Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών το 2008 ανέρχονταν σε 18,5 MWp. Όσον αφορά στα νησιά υπάρχει σχέδιο εγκατάστασης 200 MWp, εκ των οποίων τα 52,5 MWp θα είναι στην Κρήτη.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει την εγκατεστημένη ισχύ αιολικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες χώρες.

Χώρα		Εγκατεστημένη Ισχύς (2008)	
		Αιολικά (GW)	Φωτοβολταϊκά (MWp)
Ευρώπη	Γερμανία	23,9	5.351
	Ισπανία	16,8	3.404,8
	Δανία	3,3	3,2
	Ιταλία	3,7	317,5
	Ολλανδία	2,2	54,9
	Ηνωμένο Βασίλειο	3,2	21,6
	Ελλάδα	1	18,5
	<b>Ευρώπη</b>	<b>66</b>	<b>9.533,3</b>
Άλλες Χώρες	Ινδία	9,6	112
	Ιαπωνία	1,9	2.170
	Κίνα	12,2	200
	ΗΠΑ	25,2	1.173
	<b>Παγκοσμίως</b>	<b>120,8</b>	<b>15.200</b>

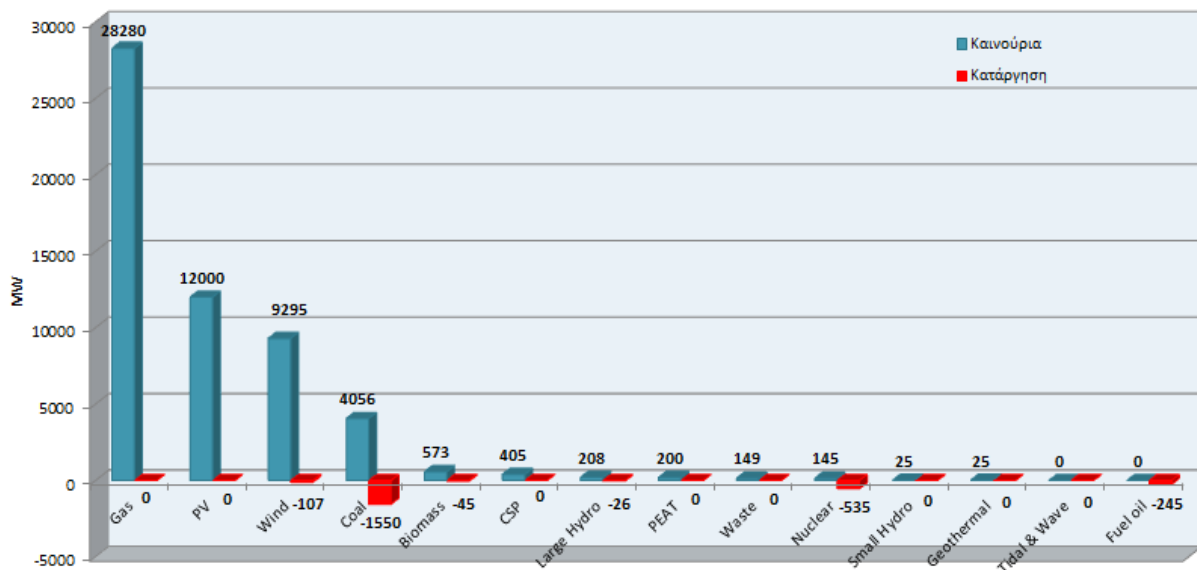
Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η αύξηση της παγκοσμίως εγκατεστημένης ισχύος από φωτοβολταϊκά συστήματα.



Διάγραμμα 2

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως κατά τη χρονική περίοδο 1991-2008 παρουσίασε σημαντική αύξηση, από 18,5% το 1992, σε 29,3% το 2002 και έφτασε στο 54% το 2008. Με βάση αυτούς τους ετήσιους ρυθμούς διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ενεργειακό δυναμικό, η εγκατεστημένη ονομαστική ισχύ αναμένεται το 2011 να ξεπεράσει τα 50 GWp (με την επιφύλαξη των πιθανών επιπτώσεων της οικονομικής κρίσης). (Φραγκιαδάκης, 2009)

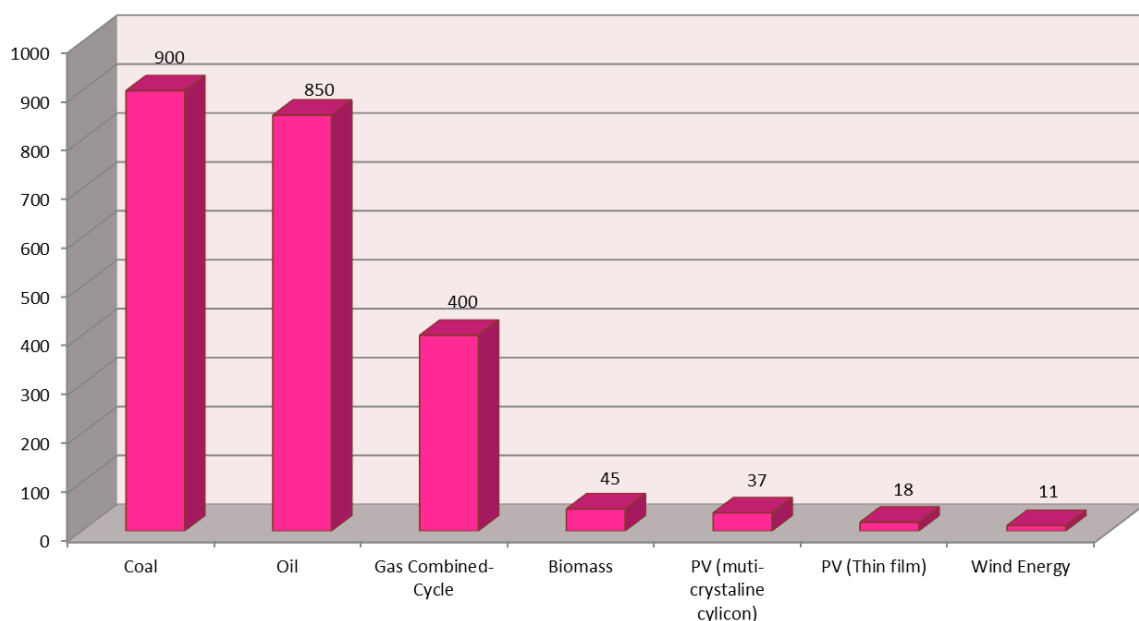
Στο διάγραμμα που ακολουθεί είναι εμφανείς οι νέες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (από συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές), αλλά και η κατάργηση σταθμών που είχαν πολλά χρόνια λειτουργίας.



Διάγραμμα 3

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου των διαφόρων μεθόδων παραγωγής ενέργειας.

Αέρια Θερμοκηπίου gram CO<sub>2</sub>/kWh

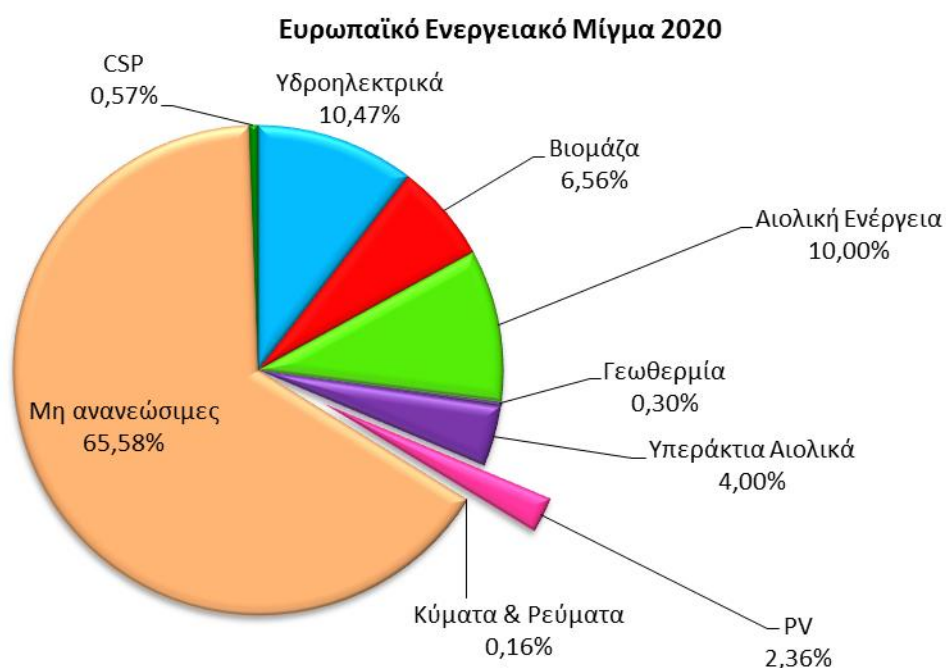
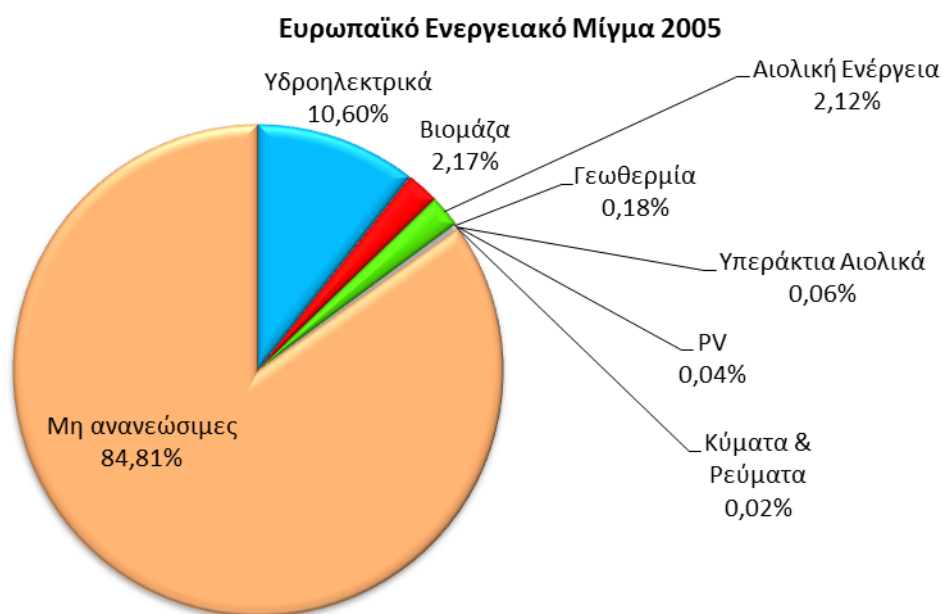


Διάγραμμα 4

## 1.2 Ενεργειακή Πολιτική στην Ευρώπη και στην Ελλάδα

Η ενεργειακή πολιτική της Ευρώπης που τέθηκε σε ισχύ το 1997 είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, αλλά και τη μείωση των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου και την ενεργειακή αυτονομία της Ευρώπης.

Τα επόμενα δυο διαγράμματα παρουσιάζουν το ενεργειακό μίγμα της Ευρώπης το 2005 και αυτό που αναμένεται το 2020.



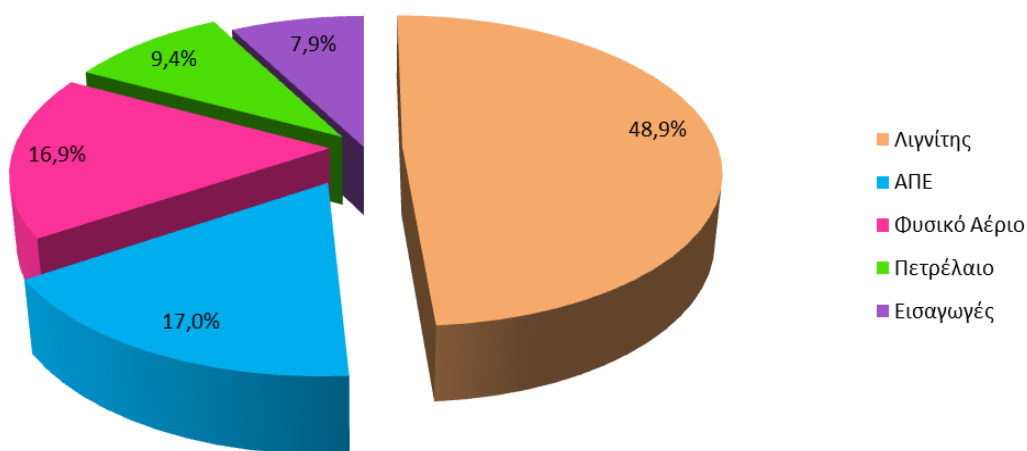
Διάγραμμα 5

Από τα δυο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο ρόλος που αναμένεται να παίζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα στην παραγωγή ενέργειας θα αυξηθεί μέχρι το 2020 κατά 58%. Γενικά παρατηρείται μια στροφή προς τις ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) και κυρίως προς τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτό όπως αναφέρθηκε οφείλεται κυρίως στα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργήθηκαν λόγω της χρήσης των συμβατικών μέσων παραγωγής ενέργειας, αλλά και της πυρηνικής. Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν σήμερα οι ανανεώσιμες πηγές είναι το υψηλό κόστος της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με το κόστος της kWh του πετρελαίου. Ανάμεσα στα αιολικά και στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η αιολική ενέργεια είναι οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, όπως η μη ύπαρξη κινούμενων μερών και η αθόρυβη λειτουργία τους έχουν υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Η διαφορά κόστους ανάμεσα στις ανανεώσιμες και τις συμβατικές μεθόδους μειώνεται διαρκώς χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας και της μαζικής παραγωγής τους, ώστε τα επόμενα χρόνια να φτάσουν σε συγκρίσιμα επίπεδα.

Όσον αφορά στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας για το 2010, είναι αυτό που φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.

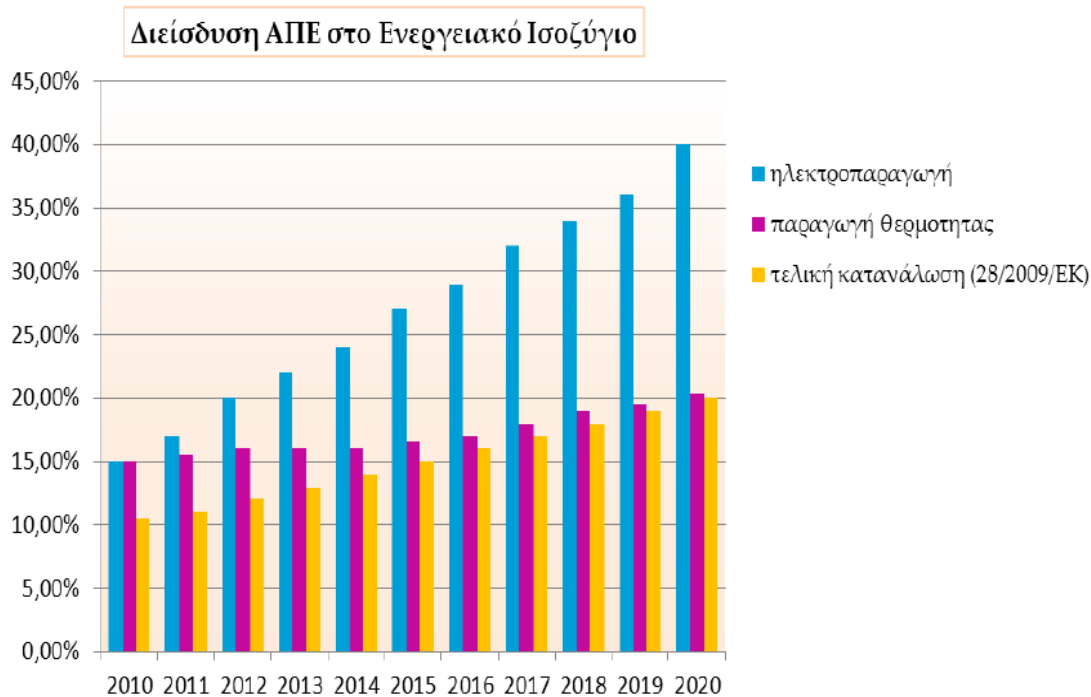
Ενεργειακό Μίγμα Ελλάδας 2010



Διάγραμμα 6

Είναι εμφανές ότι και η Ελλάδα καταβάλλει προσπάθειες για μεγαλύτερα ποσοστά παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Το πρόβλημα όμως παραμένει το υψηλό κόστος της ενέργειας τους, καθώς ο βαθμός διείσδυσης των σταθμών ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας εξαρτάται από αυτό. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η απαιτούμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας μας, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του 2020.

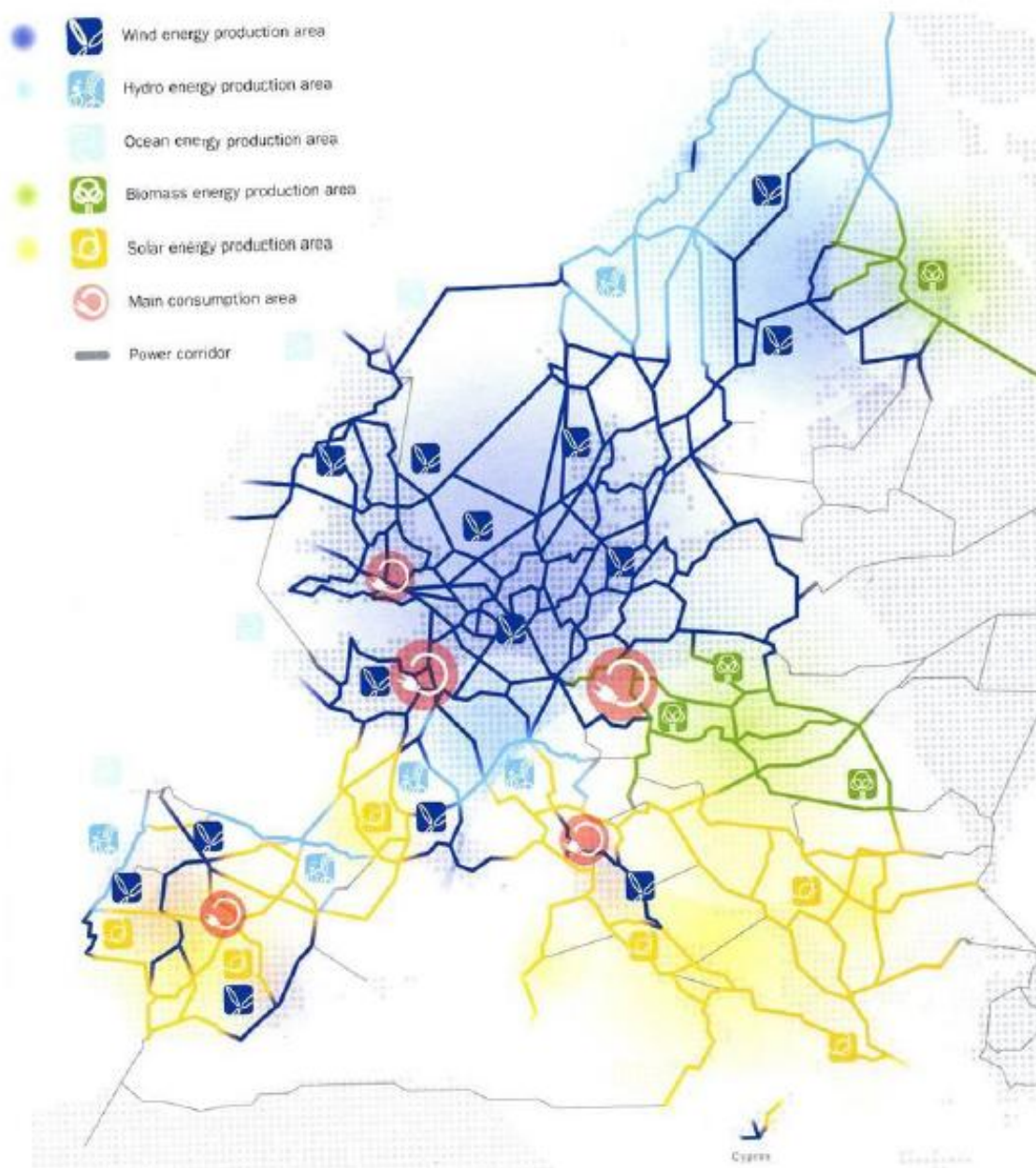




#### Διάγραμμα 7

Παρατηρείται λοιπόν σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα, μια αυξημένη δραστηριότητα στον ευρύτερο τομέα των ΑΠΕ, που προοιωνίζει την αλματώδη ανάπτυξη και ενσωμάτωση τους στην ενεργειακή παραγωγή, μέσα στην πρώτη εικοσαετία του νέου αιώνα (Ενεργειακή Ευρωπαϊκή Πολιτική 2020). Η αύξηση της ποσοστιαίας συμμετοχής των ΑΠΕ στην παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή θα επιφέρει δραστικό περιορισμό στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, που θα εκλύονταν από την καύση ενεργειακά ισοδύναμης ποσότητας συμβατικών καυσίμων. Κατά συνέπεια, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό δυναμικό παγκοσμίως, σε συνέργεια με άλλα παράλληλα διορθωτικά μέτρα που έχουν ληφθεί και ήδη εφαρμόζονται, αναμένεται να συμβάλλουν καταλυτικά στην αποκατάσταση της διαταραγμένης θερμοκρασιακής ισορροπίας του πλανήτη μας σε φυσιολογικά επίπεδα. (Φραγκιαδάκης, 2009)

Αφού λοιπόν η διείσδυση και η απορρόφηση της παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν, η Ευρωπαϊκή ένωση έχει προτείνει την κατασκευή ενός ενιαίου ευρωπαϊκού δικτύου, το οποίο ονομάζει supergrid. Στον ακόλουθο χάρτη φαίνεται το δίκτυο όπως αναμένεται ότι θα είναι μετά την ολοκλήρωσή του το 2050. (EWEA)



Εικόνα 1

Όπως παρατηρούμε η Ελλάδα ανήκει στις χώρες, οι οποίες θα παράγουν ενέργεια με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας, άρα η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη χώρα μας. Σκοπός αυτού του ενιαίου δικτύου είναι η άμεση διανομή ενέργειας εκεί όπου υπάρχει ζήτηση.

### 1.3 Στόχοι EPIA

Η EPIA (European Photovoltaic Industry Association) είναι η Ευρωπαϊκή Ένωση Φωτοβολταϊκών. Ακολουθώντας τους ενεργειακούς στόχους της Ευρώπης για το 2020, έχει εκδώσει και η ίδια μια αναφορά με τους στόχους που έχει θέσει για παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα.

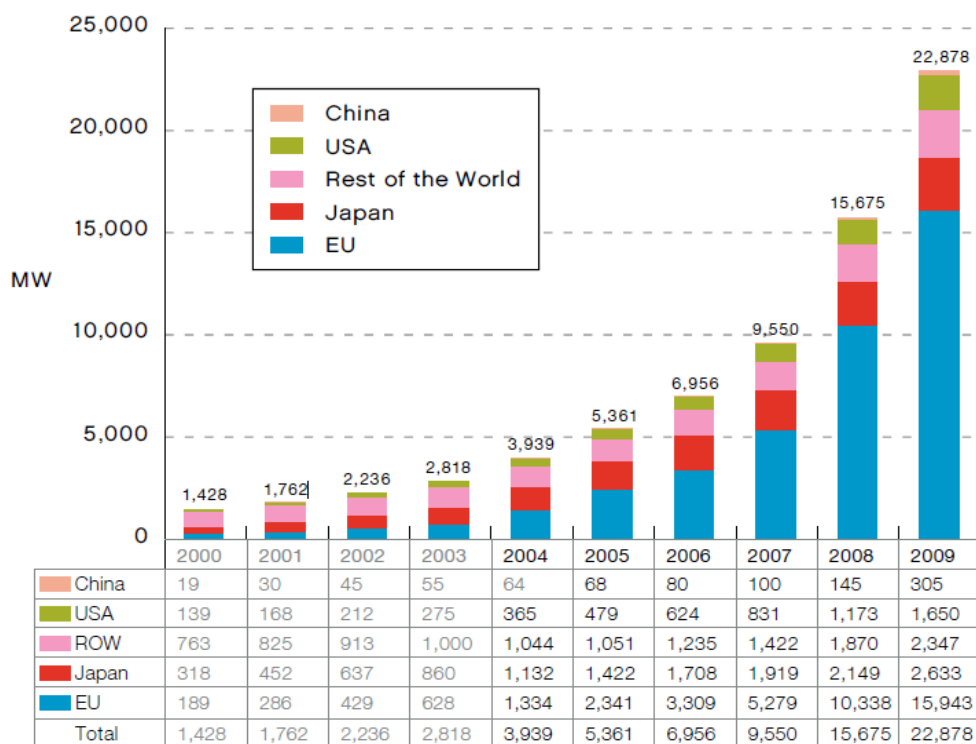
Οι ευρωπαϊκοί ενεργειακοί στόχοι είναι συνοπτικά οι ακόλουθοι:

- ✓ Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σύμφωνα με τα επίπεδα του 1990.
- ✓ Οι ανανεώσιμες πηγές πρέπει να αντιπροσωπεύουν το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, μέγεθος που μεταφράζεται στο 35% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ Μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά 20% από ένα σενάριο αναφοράς.

Σκοπός αυτής της πολιτικής είναι η προώθηση της βιωσιμότητας του περιβάλλοντος και ο αγώνας κατά της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η ενεργειακή ανεξαρτησία της Ευρώπης.

Οι αρχικές προβλέψεις της EPIA είναι μέχρι το 2014, ενώ οι στόχοι που έχει θέσει φτάνουν μέχρι το 2020. Τα τελευταία χρόνια είναι εμφανής μια άνοδος της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθιστώντας τα από τους κυρίαρχους στην παραγωγή ενέργειας. Στο τέλος του 2008 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ήταν 16 GW, ενώ το 2009 έφτασαν τα 23 GW παγκοσμίως, παράγοντας 25 TWh ηλεκτρισμού ετησίως. Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στον συγκεκριμένο τομέα, έχοντας εγκαταστήσει το 2009 συνολικά 16 GW, μέγεθος που αντιστοιχεί στο 70% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος εκείνη τη χρονιά.

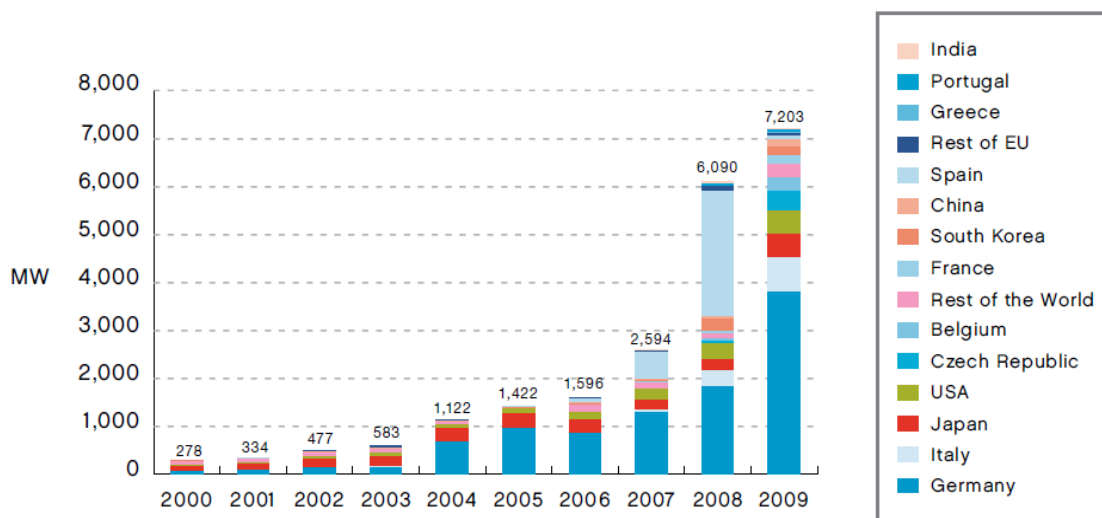
Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει την ανοδική πορεία των φωτοβολταϊκών τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο.



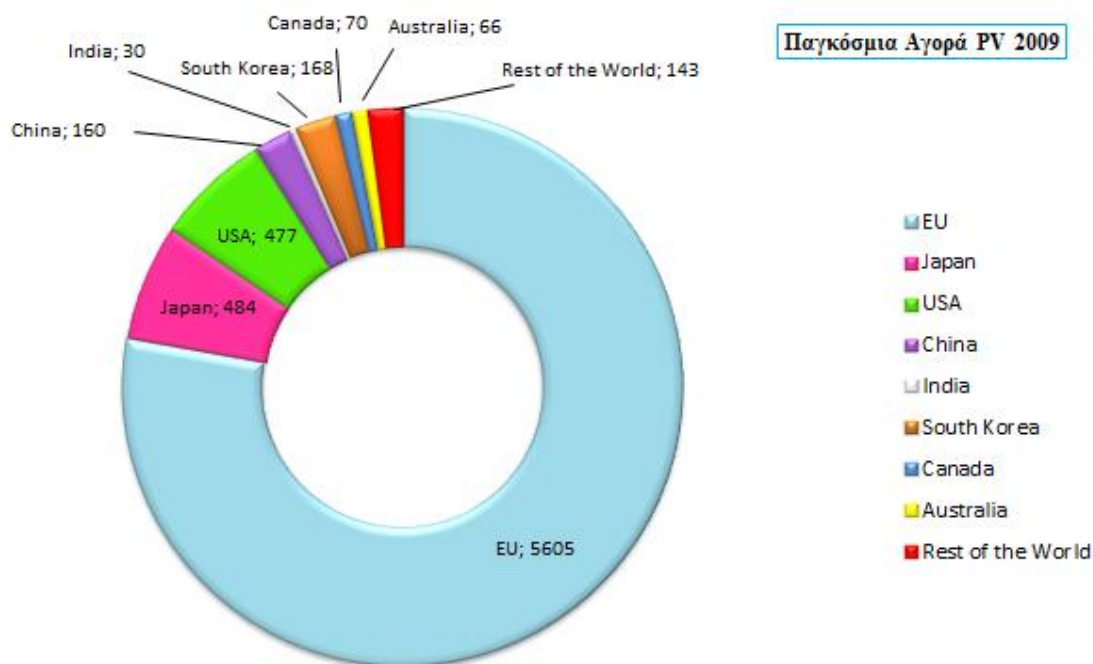
Διάγραμμα 8

Η ισχύς που εγκαταστάθηκε το 2003 ήταν 1 GW, ενώ το 2009 ξεπέρασε τα 7,2 GW παρά την οικονομική κρίση. Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει τη συμμετοχή κάθε χώρας στην εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

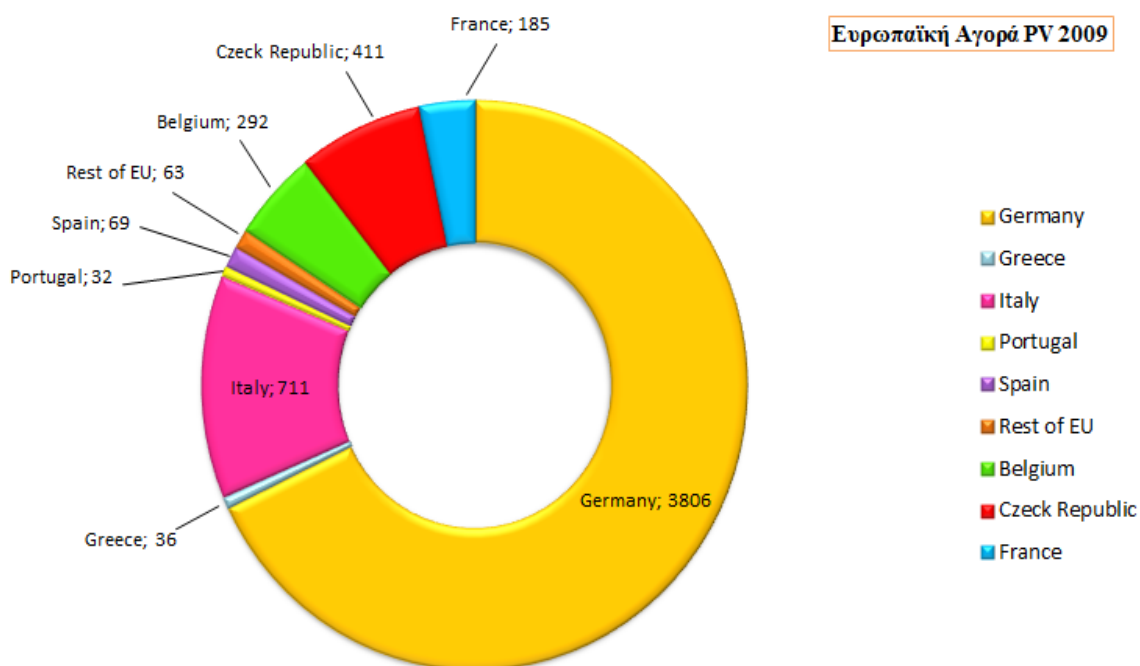
Διάγραμμα 9



Η άνοδος που παρουσιάζεται το 2009 αντιστοιχεί σε 15% παραπάνω συγκριτικά με το 2008, ενώ παγκοσμίως η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε κατά 25%, φτάνοντας τα 22,9 GW. Η Γερμανία διπλασίασε σχεδόν, σε ένα χρόνο την εγκατεστημένη ισχύ της, από 1,8 GW σε 3,8 GW, αντιπροσωπεύοντας το 52% της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών. Επίσης η Ιταλία είχε το 2009 συνολική εγκατεστημένη ισχύ 711 MW, γεγονός που την καθιστά δεύτερη στην παγκόσμια αγορά. Εκτός όμως από αυτές τις δυο, και άλλες χώρες παγκοσμίως παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει την παγκόσμια και την Ευρωπαϊκή αγορά φωτοβολταϊκών το 2009 σε MW.



Διάγραμμα 10



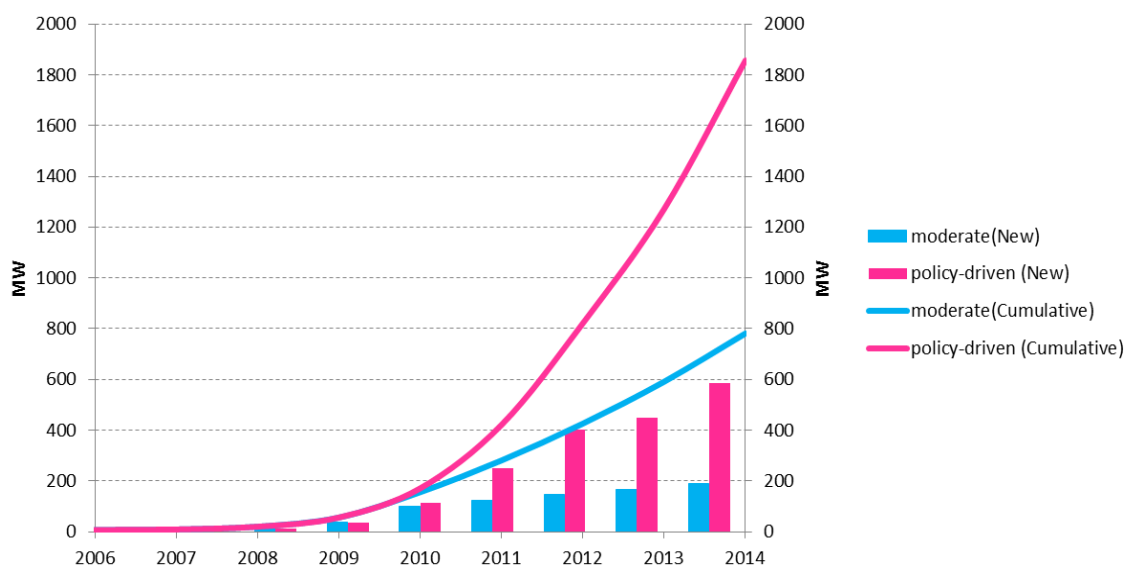
**Διάγραμμα 11**

Με βάση τα μέχρι τώρα δεδομένα, η ΕΡΙΑ έχει προτείνει δυο σενάρια:

1. **Συντηρητικό Σενάριο:** Αυτό το σενάριο βασίζεται στην τωρινή ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών χωρίς καμία επιπλέον ενίσχυση, αλλά με την προϋπόθεση ότι ακολουθείται η μέχρι τώρα ανοδική πορεία και η τιμή πώλησης της ενέργειας στο δίκτυο.
2. **Σενάριο Στόχος:** Σύμφωνα με αυτό το σενάριο η ΕΡΙΑ περιμένει τη δημιουργία καινούριων μηχανισμών υποστήριξης, όπως αύξηση της τιμής πώλησης της ενέργειας από φωτοβολταϊκά, καθώς και πολιτική υποστήριξη για την ανάπτυξη τους.

Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο η Ευρωπαϊκή ένωση θα αυξήσει την εγκατεστημένη ισχύ της σε φωτοβολταϊκά κατά 8 GW το 2014, ενώ σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο η ισχύς το 2014 θα αυξηθεί κατά 13,5 GW.

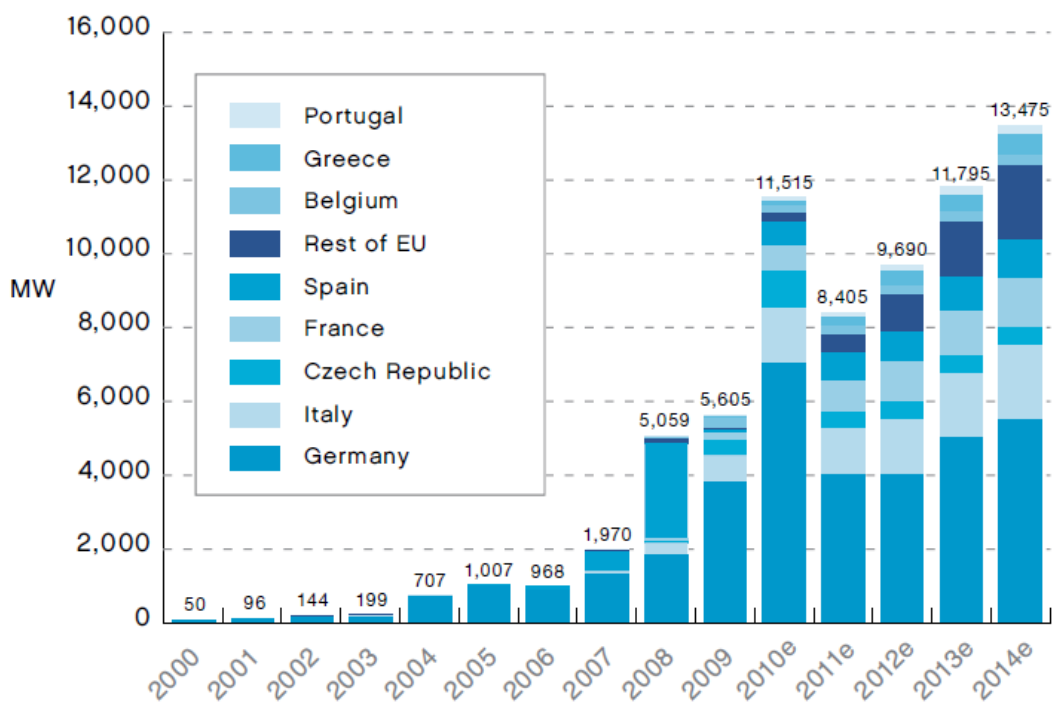
Όσον αφορά στην Ελλάδα, λόγω της έντονης ηλιοφάνειας, θεωρούνταν ότι μπορούσε να παίξει καθοριστικό ρόλο στην αγορά των φωτοβολταϊκών, λαμβάνοντας και υπόψη ότι έχει ζητηθεί άδεια για εγκατάσταση 3,5 GW. Παρ' όλα αυτά οι επενδυτές φαίνεται να κάνουν πίσω λόγω της γραφειοκρατίας και της πολιτικής αβεβαιότητας, γεγονός που εξηγεί γιατί τα έτη 2008 και 2009 η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε ελάχιστα. Αναμένεται ότι η οικονομική κρίση στη χώρα μας, σε συνδυασμό με αυτά τα εμπόδια να καθυστερήσουν πολύ την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα. Άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης με πολύ λιγότερη ηλιοφάνεια φαίνεται ότι έχουν ξεπεράσει τέτοια προβλήματα και έχουν δώσει ιδιαίτερο βάρος στην πρόοδο αυτών των συστημάτων. Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει τι προβλέψεις για την Ελλάδα σύμφωνα με τα δυο προηγούμενα σενάρια.



Διάγραμμα 12

Το διάγραμμα που παρουσιάζει την πορεία ολόκληρης της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2014 είναι το ακόλουθο:

## Europe



Διάγραμμα 13

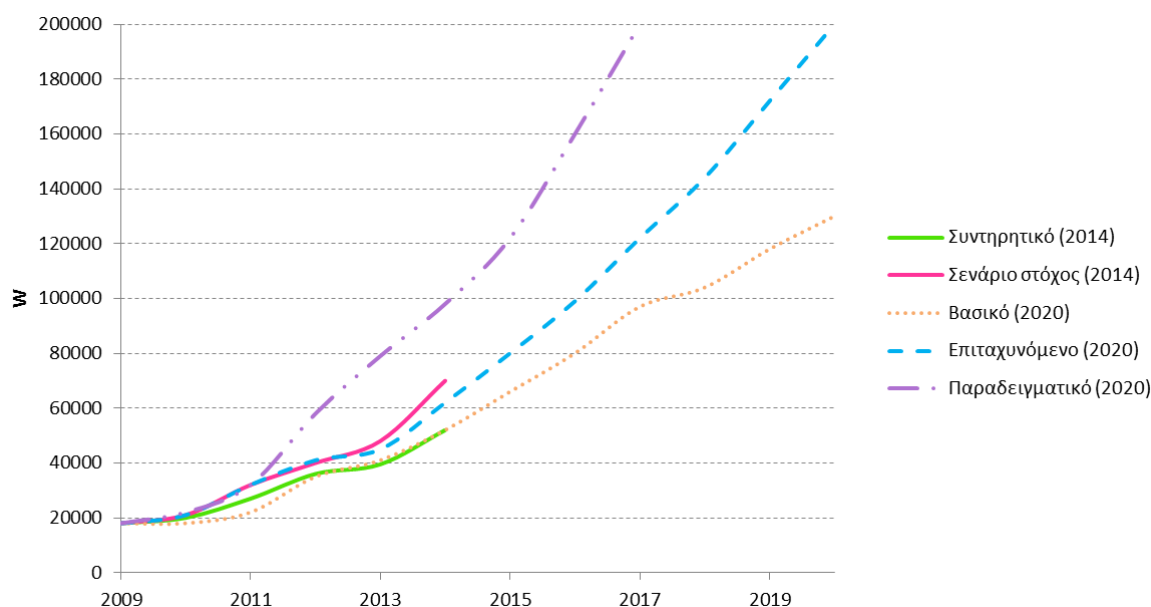
Δυστυχώς αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η Ελλάδα αν και θα έπρεπε να είναι μια από τις χώρες με την περισσότερη εγκατεστημένη ισχύ, ανήκει σε αυτές με την λιγότερη, επαληθεύοντας τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.



Οι στόχοι της ΕΡΙΑ για το 2020 χωρίζονται σε τρία σενάρια:

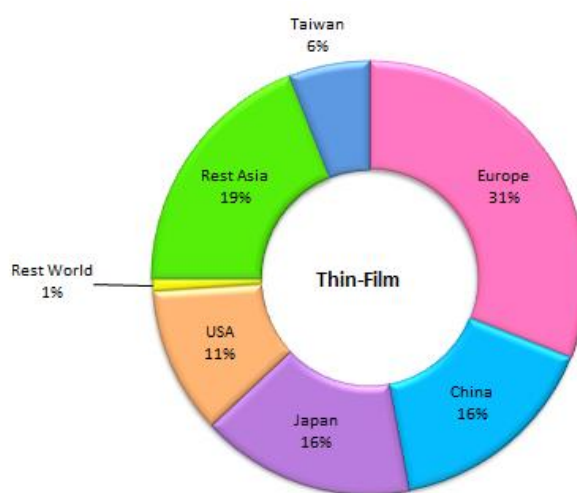
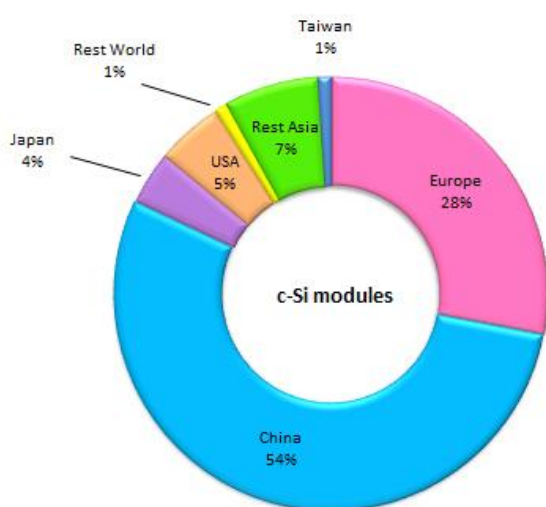
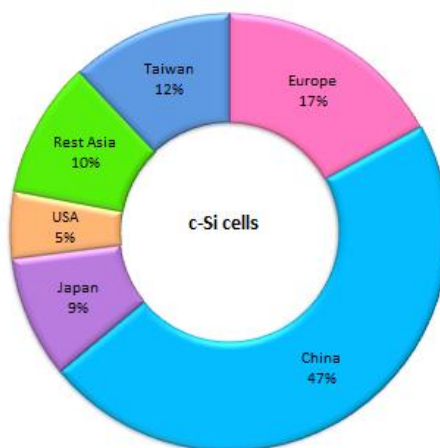
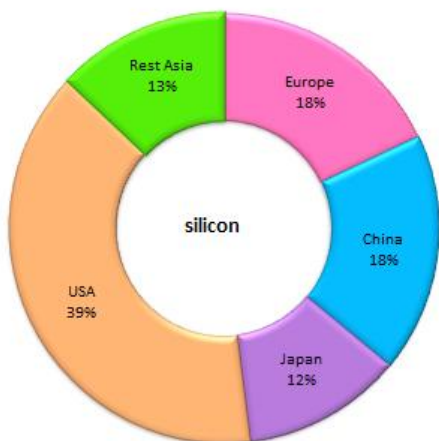
1. **Το Βασικό σενάριο:** βασίζεται στη μέχρι τώρα ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών και προβλέπει 4% παραγωγή ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ευρώπη.
2. **Το επιταχυνόμενο σενάριο:** σύμφωνα με αυτό λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη δυνατή ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών καθώς και σημαντικές αλλαγές στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση θα παράγεται 6% ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ευρώπη.
3. **Το παραδειγματικό σενάριο:** αφού προσπεραστούν ορισμένα εμπόδια η Ευρώπη στοχεύει σε 12% παραγωγή ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά.

Η ΕΡΙΑ συγκρίνοντας τα σενάρια αυτά με τις προβλέψεις μέχρι το 2014 κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα. Πρώτον, το συντηρητικό σενάριο μπορεί να οδηγήσει στη μη επίτευξη του στόχου του βασικού σεναρίου για 4% παραγωγή ηλεκτρισμού μέχρι το 2020. Η διαφορά παρ' όλα αυτά είναι αρκετά μικρή και ορισμένες πολιτικές αλλαγές εύκολα μπορούν να συμβάλλουν στην επίτευξη του 4%. Και δεύτερον, το σενάριο στόχος μπορεί να ξεπεράσει το 6% του επιταχυνόμενου σεναρίου για το 2020. Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις προβλέψεις για το 2014 και τα σενάρια μέχρι το 2020 για την Ευρώπη.



Διάγραμμα 14

Κάθε χώρα δείχνει ιδιαίτερη προτίμηση σε διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών. Για παράδειγμα ο τύπος C-Si επικρατεί κυρίως στην Κίνα (50%) ενώ στην Ευρώπη είναι το 20%. Στην Ιαπωνία είναι το 10% ενώ στην Αμερική μόλις το 5%. Όσον αφορά στην τεχνολογία thin film, η Ευρώπη φαίνεται να είναι πρωτοπόρος με 30%, ενώ οι υπόλοιπες χώρες κατέχουν περίπου το 10 με 20%. Τα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζουν το διαχωρισμό των τεχνολογιών στις διάφορες χώρες.



Διάγραμμα 15



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Ηλεκτρομαγνητική (ηλιακή) ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία, αποτελεί διαδεδομένη διαταραχή συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η ταχύτητα διάδοσης του ΗΜ κύματος στο κενό χώρο, προσεγγίζει τα 300.000 km/s. Εκπέμπεται από τους δομικούς λίθους της ύλης (άτομα, μόρια και ιόντα) και η εκπομπή της σχετίζεται με:

- Τη θερμοκρασία των σωμάτων (θερμική ακτινοβολία)
- Τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις διεγερμένων δομικών λίθων, που προκαλούνται από άλλη αιτία, εκτός της θερμοκρασίας (π.χ. κατά τις κρούσεις επιταχυσμένων ιόντων ή ηλεκτρονίων με ιόντα ή μόρια του σώματος, με τη δράση μακροσκοπικού ηλεκτρικού πεδίου είτε μετά από απορρόφηση ΗΜ ακτινοβολίας από τους δομικούς λίθους)

Στη συνέχεια αναφερόμαστε, σύντομα στις δύο αυτές περιπτώσεις.

#### A. Θερμική ακτινοβολία-θεωρία του μέλανος σώματος

Ένα σώμα εξαιτίας της θερμοκρασίας του, ακτινοβολεί πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ανά μονάδα μήκους κύματος  $E_{\lambda T}$  (μετρούμενη σε  $W/m^2nm$ ), που είναι συνάρτηση:

- 1) Του μήκους κύματος  $\lambda$ .
- 2) Της θερμοκρασίας του σώματος  $T$ .
- 3) Της φύσης του σώματος που ακτινοβολεί.

Το τελευταίο περιγράφεται με έναν συντελεστή, την ικανότητα εκπομπής (emissivity ως ιδιότητα του υλικού και emittance, ως χαρακτηριστικό της επιφάνειας του σώματος).

Όσον αφορά την εξάρτηση της  $E_{\lambda T}$  από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει, η έρευνα είχε καταλήξει σε δύο πειραματικά αποτελέσματα για δύο διαφορετικές περιοχές μηκών κύματος, την περιοχή των μικρών μηκών κύματος και την περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος.

Οι εμπειρικές σχέσεις ήταν ο νόμος ακτινοβολίας του Wien για την περιοχή μικρών μηκών

κύματος  $E_{\lambda T} \propto (1/\lambda^5)e^{-a/\lambda T}$

και ο νόμος του Rayleigh-Jeans για την περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος  $E_{\lambda T} \propto 1/\lambda^4$

Το συνδυαστικό κρίκο προσέθεσε ο Max Planck εισάγοντας την έννοια της εκπομπής της ΗΜ ενέργειας κατά ποσά-*quanta* και θεωρία των *quanta*. Το μοντέλο που χρησιμοποίησε, βασίζεται στη θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών, που αντιπροσωπεύουν τις ταλαντώσεις των δομικών λίθων (άτομα, μόρια, ιόντα), των τοιχωμάτων μιας κοιλότητας του σώματος και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τους στο χώρο της κοιλότητας.

Αν η κοιλότητα επικοινωνεί προς τα έξω με λεπτό αυλό, η εξερχόμενη από την οπή ακτινοβολία, σε στενή περιοχή μηκών κύματος, έχει ένταση που καθορίζεται από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία  $T$  της κοιλότητας. Αντίστροφα, κάθε ακτίνα προερχόμενη από άλλο σώμα, εισερχόμενη δια του αυλού στο χώρο της κοιλότητας, απορροφάται από του ΗΜ ταλαντωτές που διεγείρονται σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες. Δηλαδή, η οπή της κοιλότητας λειτουργεί ως

«παγίδα» για την προσπίπτουσα ΗΜ ακτινοβολία και ταυτόχρονα εκπέμπει ιδανικά ΗΜ ακτινοβολία που οφείλεται στη θερμική κατάσταση των δομικών του λίθων. Το ιδανικό αυτό σώμα, με τις ιδιότητες αυτές, ονομάστηκε **μέλαν (μαύρο) σώμα**. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, το μέλαν σώμα έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ακτινοβολία, με ορισμένη φασματική κατανομή, χαρακτηριστική της θερμοκρασίας του. Απορροφά πλήρως κάθε ακτινοβολία, που προσπίπτει επάνω του, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία του ή τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει.

Σύμφωνα με τον Max Planck η ενέργεια των ταλαντωτών χαρακτηρίζεται από κβάντωση (στάθμες ενέργειας), έτσι ώστε κάθε ενεργειακή μετάβαση μεταξύ διαδοχικών ενεργειακών σταθμών να σχετίζεται με απορρόφηση ενέργειας από τον ταλαντωτή (διέγερση του ταλαντωτή) ή εκπομπή ενέργειας (αποδιέγερση του ταλαντωτή). Η ενέργεια αυτή είναι  $U=hn$ , όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα του ταλαντωτή.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

### Συνάρτηση φασματικής κατανομής

Η κατανομή των τιμών της πυκνότητας ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός μέλανος σώματος, σε κάθε μήκος κύματος  $\lambda$ , αποτελεί τη συνάρτηση φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος  $E_{\lambda T}$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$ ). Σύμφωνα με τον Planck είναι

$$E_{\lambda T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

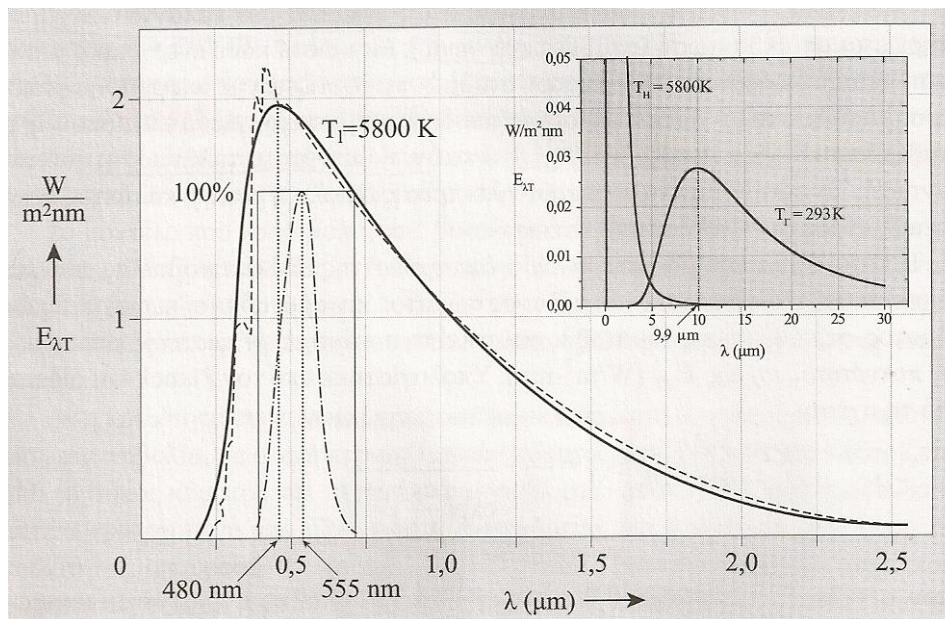
Όπου  $c_1=2\pi^2hc^2=3,746 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ ,

$c_2=hc/k_B=0.0144 \text{ mK}$

$c=2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  (ταχύτητα του φωτός)

$k_B=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η γραφική παράσταση της φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος α) της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας (διακεκομμένη καμπύλη), β) του μέλανος σώματος που προσαρμόζεται στην προηγούμενη, παρουσιάζει μέγιστο στο  $\lambda=480\text{nm}$  και έχει θερμοκρασία  $5800 \text{ K}$  (συνεχής γραμμή), γ) της καμπύλης ευαισθησίας του οφθαλμού του ανθρώπου (ορατό φάσμα  $360\text{nm}$  έως  $750\text{nm}$ ) που εμφανίζει μέγιστο στο  $\lambda=555\text{nm}$ . Στο μικρό διάγραμμα πάνω δεξιά, παρουσιάζονται δύο καμπύλες φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, η μία για την ακτινοβολία της γης (θεωρείται σώμα θερμοκρασίας  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  και η άλλη της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας.



Διάγραμμα 16

Το φάσμα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος εμφανίζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: α) έχει μέγιστο, η τιμή του οποίου και το μήκος κύματος στο οποίο εμφανίζεται εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Δεξιά και αριστερά από το μέγιστο η ένταση μηδενίζεται β) αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης, και αυτή του μεγίστου, σε όλα τα μήκη κύματος με ταυτόχρονη μετατόπιση του μεγίστου προς τα αριστερά (προς τα μικρότερα μήκη κύματος). Αυτή η αύξηση του μεγίστου και η μετατόπισή του προς τα μικρότερα μήκη κύματος ακολουθεί το νόμο μετατόπισης του μεγίστου της φασματικής κατανομής ή νόμο του Wien ( $\lambda_{\text{μεγ.}} \cdot T = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ).

Το μοντέλο του μέλανος σώματος είναι η ιδανική περίπτωση συμπεριφοράς της ύλης, τόσο για την εκπομπή όσο και για την απορρόφηση της ΗΜ ακτινοβολίας. Κάθε πραγματικό σώμα προσεγγίζει περισσότερο ή λιγότερο τη συμπεριφορά του μέλανος σώματος. Αυτή η προσέγγιση εκφράζεται με έναν συντελεστή, την ικανότητα εκπομπής (emittance)  $\epsilon_{\lambda T}$ , ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ενέργειας από το πραγματικό σώμα, μέσα σε στενή περιοχή μηκών κύματος, προς την εκπεμπόμενη, στην ίδια περιοχή κύματος, από το μέλαν σώμα ίδιας θερμοκρασίας. Παίρνει τιμές από 0 (τέλεια ανακλαστική επιφάνεια) μέχρι 1 (μέλαν σώμα ή τέλειος απορροφητής) και εξαρτάται από το υλικό, τη θερμοκρασία του σώματος, από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την κατεύθυνση παρατήρησης της επιφάνειας. Ισχύει λοιπόν

$$E_{\lambda T, \sigma} = \epsilon_{\lambda T} \cdot E_{\lambda T}$$

Τα σώματα των οποίων ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και το υλικό, και όχι από το μήκος κύματος, ονομάζονται φαιά σώματα.

Ακόμα έχει αποδειχτεί από τον Gustav Kirchhoff ότι η ικανότητα εκπομπής  $\epsilon_{\lambda T}$  ενός σώματος, ισούται με την αντίστοιχη απορροφητικότητα του  $\alpha_{\lambda T}$ . Ισχύει δηλαδή:

$$\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T}$$

Έτσι, κάθε σώμα εκπέμπει εκείνα τα μήκη κύματος θερμικής ακτινοβολίας, τα οποία μπορεί να απορροφήσει. Είναι γνωστός ως νόμος θερμικής ακτινοβολίας του Kirchhoff. Αν ένα σώμα για μια περιοχή κύματος έχει  $\alpha_{\lambda T} = 0$  (δηλαδή δεν απορροφά αυτήν την περιοχή κύματος της ΗΜ

ακτινοβολίας), τότε το σώμα της ίδιας θερμοκρασίας δεν εκπέμπει ΗΜ ακτινοβολία για την ίδια περιοχή κύματος (έχει δηλαδή  $\epsilon_{\lambda T} \approx 0$  για την συγκεκριμένη φασματική περιοχή).

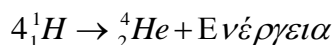
Το μέλαν σώμα έχει  $\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} = 1$  σε όλα τα μήκη κύματος, ενώ τα φαιά σώματα απορροφούν το ίδιο ποσοστό ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος αφού η ικανότητα εκπομπής είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος όπως προαναφέραμε.

### **B. Ακτινοβολία διέγερσης**

Η ακτινοβολία αυτή προέρχεται από τις αποδιεγέρσεις των ηλεκτρονικών καταστάσεων των ατόμων της ύλης και όχι εξαιτίας της θερμοκρασίας. Οι αποδιεγέρσεις αυτές οφείλονται τόσο σε ακτινοβολία που προσπίπτει στο σώμα και απορροφάται από αυτό, όσο και στις κρούσεις μεταξύ των δομικών λίθων του σώματος. (Φραγκιαδάκης, 2009)

## 2.2 Ήλιος

Ο ήλιος αποτελεί μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα), με επιφανειακή θερμοκρασία περίπου 5800 K, μάζα  $2 \times 10^{30}$  kg, ακτίνα 700.000 km και ηλικία  $5 \times 10^9$  χρόνια. Η υψηλή θερμοκρασία του οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του, σύμφωνα με τις οποίες το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο. Για κάθε γραμμάριο υδρογόνου που μετατρέπεται σε ήλιο εκλύεται ενέργεια ίση με  $1,67 \times 10^5$  kWh.



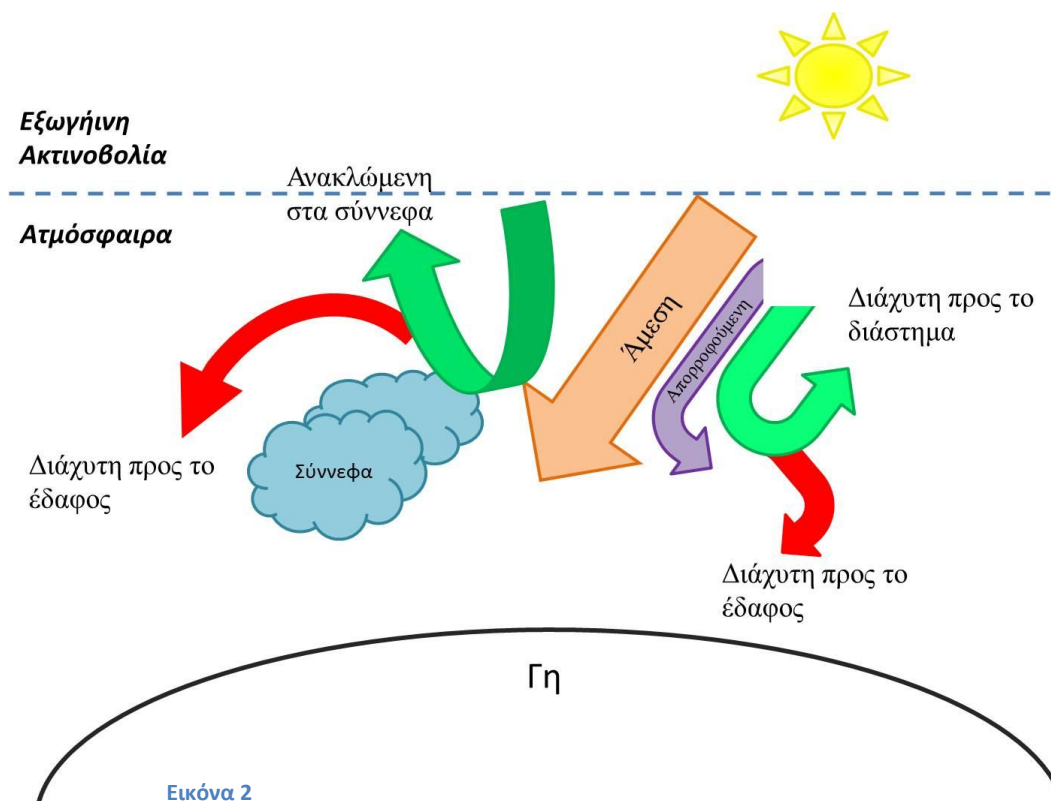
Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του ήλιου είναι η ηλιακή σταθερά, η οποία ισούται με:

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

και η οποία είναι η προσπίπτουσα ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της ακτινοβολίας, έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα, ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αφαιρείται λόγω της σκέδασης και απορρόφησης από τα μόρια του αέρα. Έτσι ελαττώνεται η ένταση του ηλιακού φωτός κατά την αρχική του κατεύθυνση.

Απαραίτητος είναι ο διαχωρισμός των τύπων της ακτινοβολίας που φτάνουν στη Γη. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία του ήλιου (δύο συνιστώσες) όπως αυτές φτάνουν στη Γη. Η άμεση αφορά στις ακτίνες που φτάνουν απευθείας από τον ήλιο, ενώ η διάχυτη αφορά στις ακτίνες που φτάνουν στην επιφάνεια του πλανήτη, αφού πρώτα υποστούν σκεδάσεις στα μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας. Εκτός της ατμόσφαιρας έχουμε μόνο άμεση ακτινοβολία.



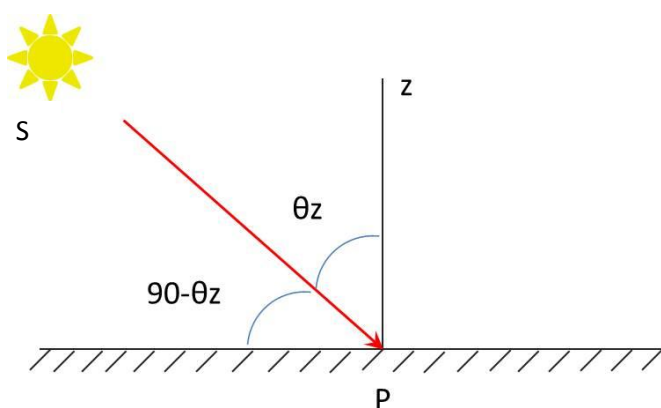
**Άμεση Ακτινοβολία ή Ακτινοβολία Δέσμης:** ονομάζεται η ακτινοβολία η οποία δεν ανακλάται και δε διασκορπίζεται από τα μόρια της ατμόσφαιρας και προσεγγίζει την επιφάνεια της Γης άμεσα και σε ευθεία γραμμή από τον ήλιο. Συμβολίζεται με  $B$  (Beam).

**Διάχυτη Ακτινοβολία:** ονομάζεται η ακτινοβολία η οποία σκεδάζεται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας (όζον, υδρατμοί,  $CO_2$ , οξείδια του αζώτου, σε διαφορετικές περιοχές του φάσματος το καθένα) και άρα φτάνει στην επιφάνεια της Γης έπειτα από διαδοχικές σκεδάσεις. Συμβολίζεται με  $D$  (Diffuse). Κάποια από αυτές τις ακτινοβολίες όμως μπορεί να προσεγγίσει κάποιο δέκτη στη Γη, ύστερα από ανάκλασή της στο έδαφος και τότε ονομάζεται διάχυτα ανακλώμενη ισχύς από το έδαφος.

Οι παραπάνω συνιστώσες αποτελούν την ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο επίπεδο και συμβολίζεται με  $G$  (Global Irradiation).

Ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να γνωρίζουμε για την ακτινοβολία του ήλιου είναι τα ακόλουθα:

**Γωνία Ζενίθ  $\theta_z$**



Αποτελεί τη γωνία όρασης του ήλιου με την κατακόρυφο. Είναι συγχρόνως και η γωνία πρόσπτωσης στο οριζόντιο επίπεδο.

Ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ όταν βρίσκεται πάνω στην κατακόρυφο, δηλαδή  $(SP) = (ZP)$ .

Ηλιακό ύψος είναι το μέγεθος  $90 - \theta_z$ .

Εικόνα 3

**Μάζα αέρα (Air Mass-AM)**

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας πάνω στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος (AM), που είναι ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Ο αριθμός που ακολουθεί το AM (π.χ. AM1, AM1,5, AM2), δηλώνει πόσες φορές χωράει το πάχος της γήινης ατμόσφαιρας, στο μήκος που διανύει το φως (η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία) μέσα στην ατμόσφαιρα. Το AM καθορίζει ουσιαστικά την ελάττωση της έντασης του φωτός, που προκαλείται από τον μεγαλύτερο δρόμο που διανύουν οι ακτίνες του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα.

Για μικρές γωνίες ζενίθ ( $\theta_z < 60^\circ$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$m = \frac{SP}{ZP} = \frac{1}{\cos \theta_z} \rightarrow m = 0 \text{ εκτός ατμόσφαιρας}$$

$\rightarrow m = 1$  στην επιφάνεια της θάλασσας όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ ( $\theta_z = 0$ )

Έχουμε λοιπόν AM1, AM1,5 και AM2 για  $\theta_z = 0, 48^\circ, 60^\circ$  αντίστοιχα. Για AM0 η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυτή της ηλιακής σταθεράς. Για AM1,5 η πυκνότητα ισχύος είναι  $970\text{W/m}^2$  η οποία θεωρείται κατά προσέγγιση  $1000\text{W/m}^2$  και είναι αυτή που χρησιμοποιείται σαν συνθήκη αναφοράς για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα με την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορες τιμές AM.

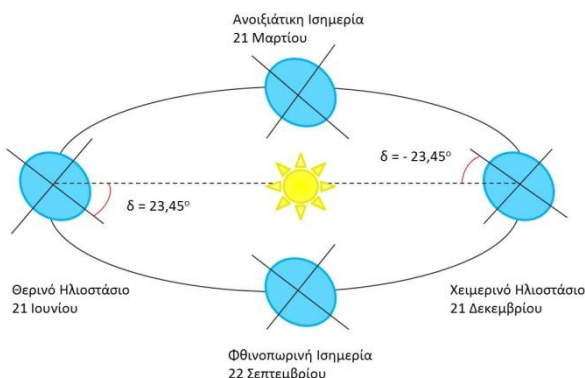
### Ηλιακή Απόκλιση $\delta$

Είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει  $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$

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

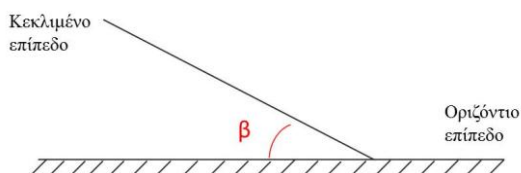
Όπου  $n$  είναι η μέρα του έτους

Ισχύει ότι  $\delta > 0$  για τους καλοκαιρινούς μήνες και  $\delta < 0$  για τους χειμερινούς μήνες.



Εικόνα 4

### Κλίση επιπέδου $\beta$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο



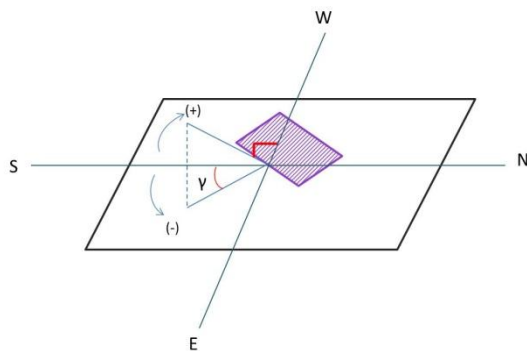
Εικόνα 5

Είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Η κεκλιμένη επιφάνεια συμβολίζεται με  $T$ .

### Αζιμούθιο Επιφάνειας ( $\gamma$ )

Το αζιμούθιο μιας επιφάνειας είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην προβολή της καθέτου μιας επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο και στην κατεύθυνση του νότου. Ισχύει ότι

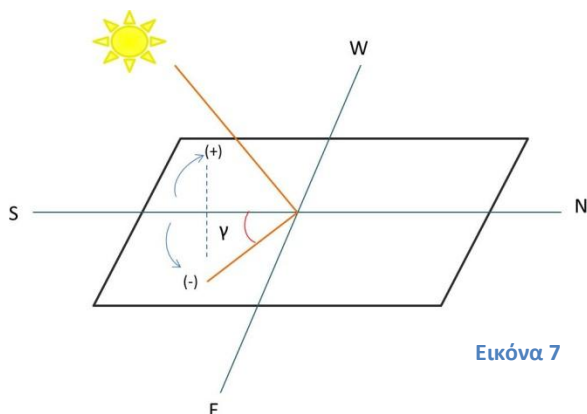
- $\gamma = 0^\circ$  στο νότο,
- $\gamma = 90^\circ$  στη δύση,
- $\gamma = 180^\circ$  στο βορρά και
- $\gamma = -90^\circ$  στην ανατολή



Εικόνα 6



### Αζιμούθιο Ηλίου ( $\gamma_s$ )



Εικόνα 7

Η γωνία ανάμεσα στην προβολή της ακτίνας του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και στην κατεύθυνση του νότου είναι το αζιμούθιο του ηλίου.

### Ωριαία Γωνία $\omega$

Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γης περί τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ/\text{h}$ .

$$\omega = \pm 0,25 \cdot (\text{min από ηλιακό μεσημέρι})$$

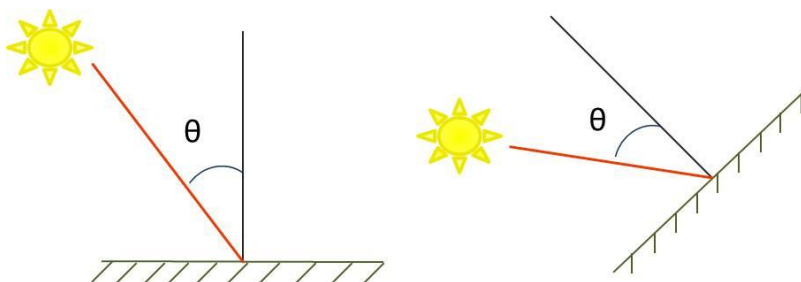
### Γεωγραφικό πλάτος

Το γεωγραφικό πλάτος συμβολίζεται με  $\phi$  και ισχύει  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ . Για το βόρειο ημισφαίριο έχουμε  $\phi \geq 0^\circ$  και για το νότιο  $\phi \leq 0^\circ$ .

### Γωνία Πρόσπτωσης

Είναι η γωνία που σχηματίζουν οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες σε ένα επίπεδο με την κάθετο στο επίπεδο αυτό.

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega$$



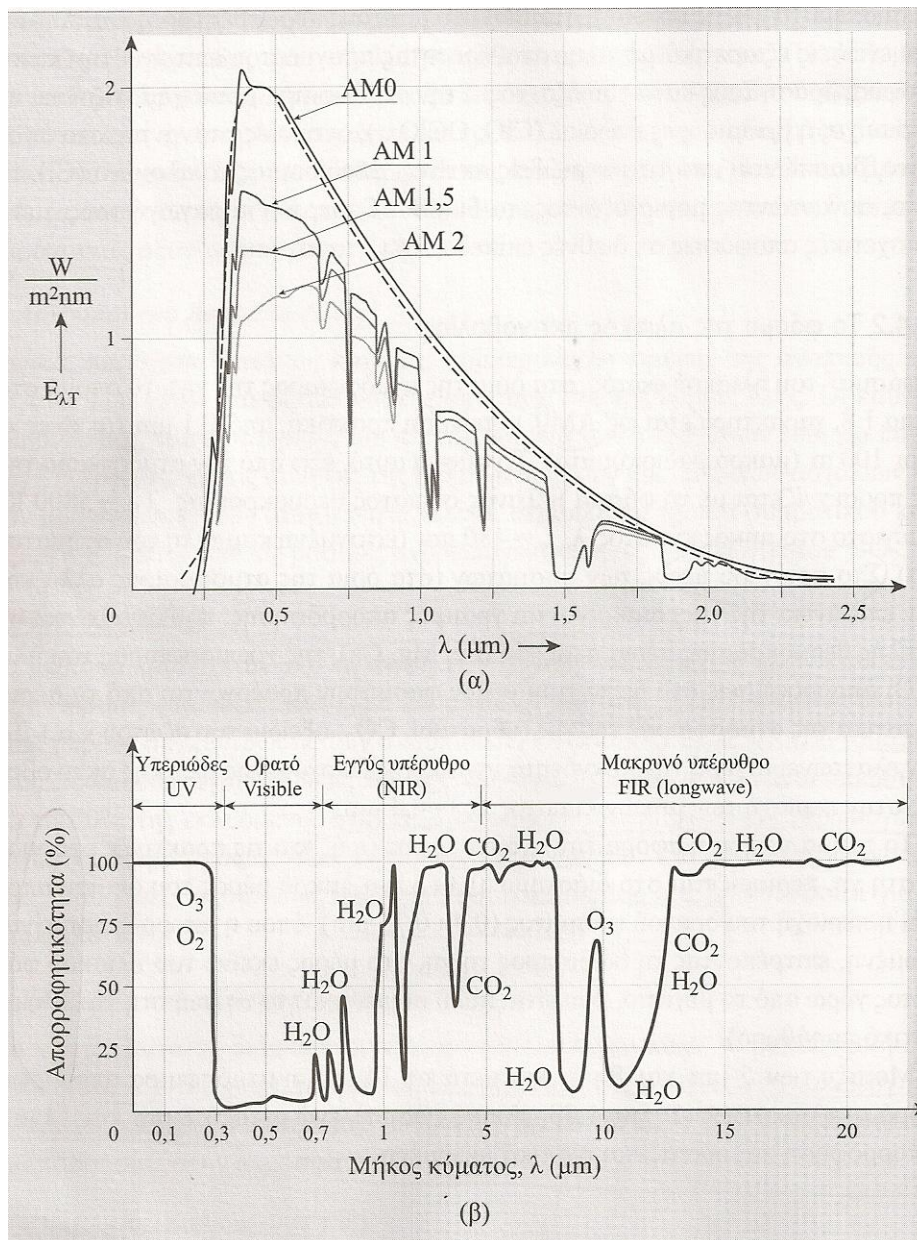
Εικόνα 8



	Χαρακτηρισμός-Σύμβολο	Περιγραφή
Ολική Ακτινοβολία G	<b>G<sub>n</sub></b> : Κάθετη ολική ακτινοβολία	Ολική ακτινοβολία σε συλλέκτη προσανατολισμένο κάθετα στην απ' ευθείας ακτινοβολία του ηλίου. Αποτελείται από την απ' ευθείας ακτινοβολία και τη διάχυτη απ' όλα τα σημεία του ουράνιου θόλου πάνω από το επίπεδο του συλλέκτη καθώς και από τη διάχυτα ανακλώμενη στο έδαφος
	<b>G</b> : Οριζόντια ολική ακτινοβολία	Ολική ακτινοβολία απευθείας και διάχυτη απ' όλα τα σημεία του ουράνιου θόλου, καθώς και διάχυτα ανακλώμενη από τα σημεία του εδάφους, που είναι πάνω από το επίπεδο του συλλέκτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος οριζόντια
	<b>G<sub>T</sub></b> : Ολική ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη. Αναφέρεται επίσης και ως πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας στο επίπεδο της συστοιχίας	Ολική ακτινοβολία απ' ευθείας και διάχυτη απ' όλα τα σημεία του ουράνιου θόλου, καθώς και διάχυτα ανακλώμενη από σημεία του εδάφους, πάνω από το επίπεδο του συλλέκτη
Απ' ευθείας ακτινοβολία B	<b>B<sub>n</sub></b> : Απ' ευθείας κάθετη ακτινοβολία	Η επιφάνεια του συλλέκτη προσανατολίζεται κάθετα προς τις ακτίνες της απ' ευθείας ακτινοβολίας
	<b>B</b> : Απευθείας οριζόντια ακτινοβολία	Η επιφάνεια του συλλέκτη προσανατολίζεται οριζόντια
	<b>B<sub>T</sub></b> : Απ' ευθείας στο επίπεδο του συλλέκτη	Αφορά στην απ' ευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη.
Διάχυτη Ακτινοβολία D	Διάχυτη Ακτινοβολία 1) <b>D</b> : Διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο συλλέκτη 2) <b>D<sub>T</sub></b> : Διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο συλλέκτη	Ακτινοβολία σκεδαζόμενη κατά Rayleigh και Mie, προς τη Γη. Προέρχεται από το τμήμα του ουρανού πάνω από το επίπεδο του συλλέκτη και του εδάφους
Διάχυτα ανακλώμενη	<b>GR<sub>T</sub></b> : Από το έδαφος στον κεκλιμένο συλλέκτη	Προέρχεται από το διάχυτα ανακλώμενο φως στο έδαφος και σε ότι το καλύπτει (φυτά, κτιριακές εγκαταστάσεις)
	<b>CR</b> : Από τα σύννεφα	

### Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας

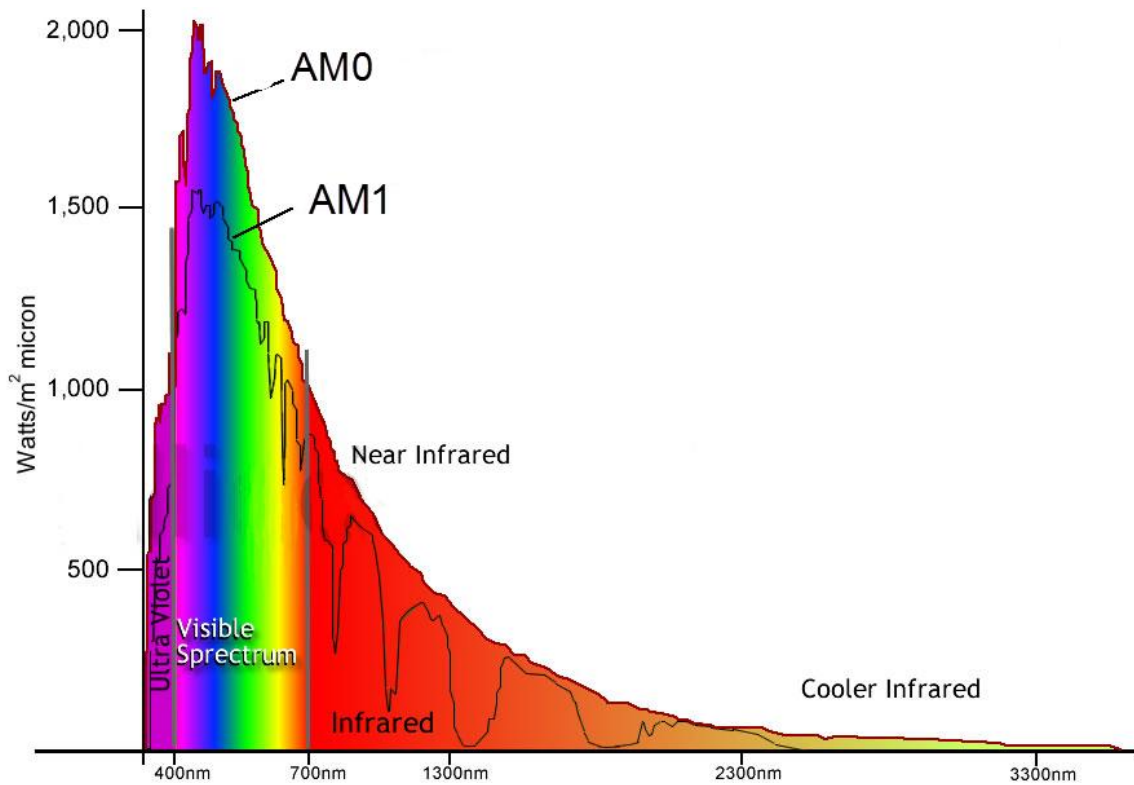
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός για διάφορες τιμές της μάζας αέρα (AM) καθώς και το φάσμα απορρόφησης των διάφορων αερίων της ατμόσφαιρας.



**Διάγραμμα 17**

Το AM0 είναι το φάσμα του ηλιακού φωτός στα όρια της ατμόσφαιρας της γης και εκτείνεται πρακτικά για μήκος κύματος από 0,1 $\mu m$  μέχρι 100m. Το φάσμα αυτό προσεγγίζεται έξω από την ατμόσφαιρα με το φάσμα μέλανος σώματος που έχει θερμοκρασία 5800 K. Στο αριστερό μέρος των υπόλοιπων φασμάτων διακρίνονται γραμμές απορρόφησης, που οφείλονται σε χαμηλής θερμοκρασίας αέρια στοιχεία όπως Fe, Mg και Ca. Οι απορροφήσεις στο δεξιό τμήμα των φασμάτων προέρχονται από τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας της γης, όπως είναι οι υδρατμοί, οξείδια του αζώτου και άλλα. Το όζον ελαττώνει πολύ την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής

ακτινοβολίας για μήκη κύματος 0,3μm-0,4μm. Το τμήμα που αφορά την ανάπτυξη της ζωής και τις πρακτικές εφαρμογές στη γη είναι το διάστημα 0,3μm-5μm, μέρος του οποίου είναι και το ορατό φως (0,38μm-0,75μm). Στην περιοχή 5μm-8μm και μετά τα 14μm η ατμόσφαιρα απορροφά ισχυρά το ηλιακό φως, ενώ στην περιοχή 8μm-14μm η απορρόφηση παρουσιάζεται σχετικά μειωμένη.



Διάγραμμα 18

## 2.3 Θεωρία συγκεντρωτών και οι αποκλίσεις τους

### Οπτική των Συλλεκτών

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή των απαραίτητων εννοιών για την κατανόηση της συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας (concentration of solar energy), με παραβολικά κάτοπτρα, παραβολικά πιάτα, συλλέκτες και φακούς Fresnel.

Στην πραγματικότητα κάθε ηλιακό θερμικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως μια ενεργειακή ισορροπία ανάμεσα στην ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το συλλέκτη και στην θερμική ενέργεια που αφαιρείται από αυτόν. Εάν δε χρησιμοποιείται κάποιος μηχανισμός απορρόφησης θερμότητας, τότε η απώλεια θερμότητας του συλλέκτη πρέπει να ισούται με την απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμοκρασία του συλλέκτη αυξάνεται μέχρι η απώλεια θερμότητας (λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας) να γίνει ίση με αυτήν την ακτινοβολία. Η θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει αυτό αποκαλείται θερμοκρασία τελμάτωσης συλλέκτη (collector stagnation temperature).

Η απώλεια θερμότητας του δέκτη μπορεί να μειωθεί αν ο συλλέκτης λειτουργεί κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος να μειώσουμε την απώλεια θερμότητας του δέκτη σε υψηλές θερμοκρασίες είναι να μειώσουμε το μέγεθος της θερμής επιφάνειας, καθώς η απώλεια θερμότητας είναι ευθέως ανάλογη με τη θερμή επιφάνεια. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μειώνουν την επιφάνεια του δέκτη, ανακλώντας την προσπίπτουσα ακτινοβολία από μια μεγάλη επιφάνεια (το άνοιγμα του συλλέκτη) σε έναν απορροφητή μικρής επιφάνειας. Με μειωμένη απώλεια θερμότητας, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μπορούν να λειτουργήσουν σε αυξημένες θερμοκρασίες και παράλληλα να παρέχουν σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας.

Ένας άλλος λόγος που θέλουμε να χρησιμοποιούμε σύστημα συγκέντρωσης ακτινοβολίας είναι ότι οι ανακλαστικές επιφάνειες είναι συνήθως πιο φτηνές από τους απορροφητές. Έτσι πολλές ανακλαστικές επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, συγκεντρώνοντας την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μικρότερες επιφάνειες απορρόφησης. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε το κόστος του συστήματος παρακολούθησης της πορείας του ηλίου, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Ο όρος 'λόγος συγκέντρωσης' χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας από ένα δεδομένο συλλέκτη. Οι δυο ορισμοί που δίνονται είναι οι ακόλουθοι:

**Οπτικός λόγος συγκέντρωσης ( $CR_o$ ):** το ολοκλήρωμα της μέσης ροής της ακτινοβολίας ( $I_r$ ) στην επιφάνεια του δέκτη ( $A_r$ ), προς την έκθεση στις ηλιακές ακτίνες όλου του ανοίγματος του συλλέκτη.

$$CR_o = \frac{\frac{1}{A_r} \int I_r dA_r}{I_a}$$

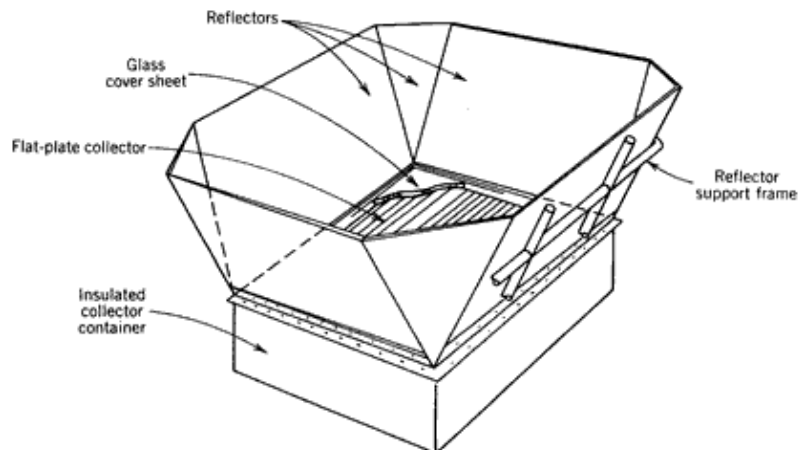
**Γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης ( $CR_g$ ):** Η επιφάνεια του συλλέκτη  $A_a$  προς την επιφάνεια του δέκτη  $A_r$ .

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r}$$

Καθώς ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης αναφέρεται στην επιφάνεια του δέκτη, χρησιμοποιείται πιο συχνά, καθώς μπορεί να συσχετισθεί άμεσα με τις θερμικές απώλειες. Στην περίπτωση που η επιφάνεια που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία και η ακτινοβολία του δέκτη

είναι ομοιόμορφες πάνω στην επιφάνεια, τότε ο οπτικός και ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης είναι ίσοι.

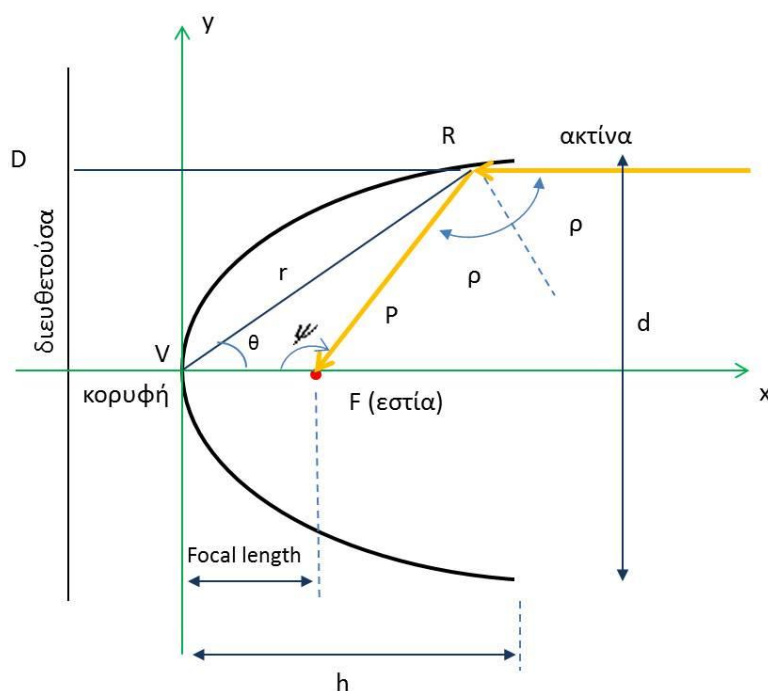
Η πιο απλή μορφή ηλιακού συλλέκτη είναι ο επίπεδος συλλέκτης, ο οποίος παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα. Ο γεωμετρικός και ο οπτικός λόγος συγκέντρωσης στην περίπτωση αυτή, παίρνουν τιμές από 2 έως 3.



Εικόνα 9

Αν χρειαζόμαστε μεγαλύτερους λόγους συγκέντρωσης, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε καμπύλους καθρέφτες ή φακούς. Ο καμπύλος καθρέφτης βασίζεται στην παραβολή. Γι' αυτό στην πορεία θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της, προκειμένου να γίνει ευκολότερα κατανοητή η λειτουργία τους.

Η παραβολή είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων τα οποία ισαπέχουν από μια ευθεία (διευθετούσα) και ένα συγκεκριμένο σημείο (εστία) ( $FR = RD$ ). Η ευθεία που είναι κάθετη στη διευθετούσα και περνάει από την εστία ονομάζεται άξονας της παραβολής. Το σημείο που άξονας τέμνει την παραβολή ονομάζεται κορυφή, η οποία βρίσκεται της απόστασης της εστίας από τη διευθετούσα.



Εικόνα 10

Αν η κορυφή V βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και ο άξονας x είναι ο άξονας συμμετρίας της παραβολής, τότε η εξίσωσή της δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου f είναι το focal length, δηλαδή η απόσταση της εστίας από την κορυφή (VF). Όταν η αρχή των αξόνων βρίσκεται στην εστία, τότε η εξίσωση της παραβολής είναι:

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

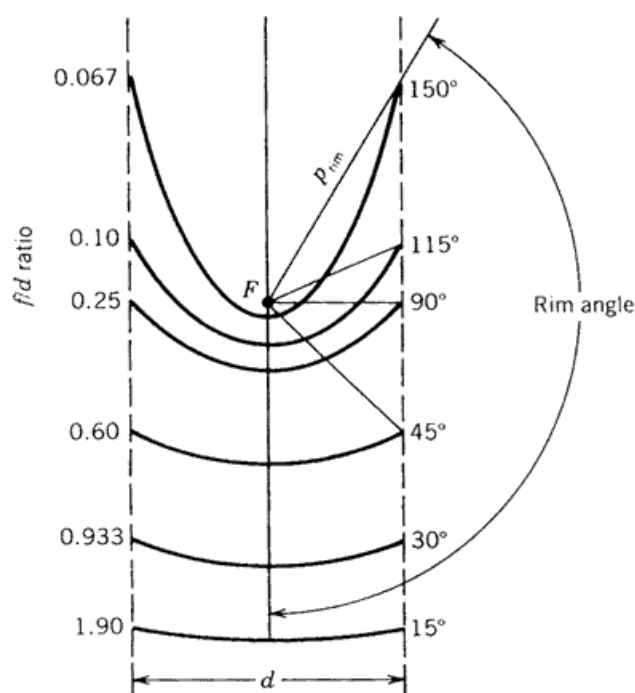
Συχνά είναι απαραίτητο να ορίσουμε την καμπύλη της παραβολής με αρχή των αξόνων στην εστία και με τη βοήθεια της γωνίας  $\mu'$ . Η γωνία αυτή μετριέται από την ευθεία VF και την ακτίνα της παραβολής P. Έτσι έχουμε:

$$p = \frac{2f}{1 + \cos \mu'}$$

Η παραβολή χρησιμοποιείται ευρέως ως η ανακλαστική επιφάνεια των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών, λόγω της ιδιότητας τους, ότι για κάθε παράλληλη γραμμή στον άξονα της παραβολής, η γωνία  $p$  ανάμεσα σε αυτή και στην κάθετη στην επιφάνεια είναι ίση με τη γωνία ανάμεσα στην κάθετη και στη γραμμή μέχρι το σημείο εστίασης. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη Γη σε παράλληλες ακτίνες και σύμφωνα με το νόμο του Snell, η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, ισχύει ότι όλες οι ακτίνες παράλληλες στον άξονα της παραβολής θα ανακλώνται σε ένα συγκεκριμένο σημείο F, που είναι το σημείο εστίασης. Έτσι ισχύει:

$$\mu' = 2,0$$

Αυτή η σχέση αφορά σε παραβολές απείρου μήκους. Οι ηλιακοί συλλέκτες όμως έχουν πεπερασμένο μήκος. Αυτό ορίζεται μέσω της γωνίας  $\mu'_{rim}$  ή ο λόγος του focal length προς το άνοιγμα d, δηλαδή  $f/d$ . Η ακόλουθη εικόνα παρουσιάζει διάφορες παραβολές με κοινό σημείο εστίασης και το ίδιο άνοιγμα.



Εικόνα 11

Μπορούμε να πούμε ότι μια παραβολή με μικρή γωνία  $\mu'_{rim}$  είναι κατά κάποιο τρόπο 'επίπεδη' και η απόσταση της κορυφής από το σημείο εστίασης (focal length) μεγάλη συγκριτικά με το άνοιγμα της. Το ύψος  $h$  της παραβολής που φαίνεται και στην εικόνα υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

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

Αντίστοιχα υπολογίζεται και η γωνία  $\mu'_{rim}$ .

$$\tan \mu'_{rim} = \frac{1}{(d/8h) - (2h/d)}$$

Ένα άλλο χρήσιμο μέγεθος είναι το μήκος τόξου της παραβολής που δίνεται από τη σχέση:

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

Επίσης το εμβαδό της επιφάνειας που εγκλείεται από την παραβολή και μια ευθεία στο άνοιγμά της και κάθετη στον άξονα της, δίνεται από τον τύπο:

$$A_x = \frac{2}{3} d \cdot h \quad (m^2)$$

Οι ακόλουθες σχέσεις που δίνονται χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για την εύρεση της γεωμετρίας της παραβολής:

$$\checkmark \quad \tan \mu'_{rim} = \frac{(f/d)}{2(f/d)^2 - \frac{1}{8}}$$

$$\checkmark \quad \tan\left(\frac{\mu'_{rim}}{2}\right) = \frac{1}{4(f/d)}$$

$$\checkmark \quad \frac{f}{d} = \frac{1 + \cos \mu'_{rim}}{4 \sin \mu'_{rim}}$$

$$\checkmark \quad \frac{f}{d} = \frac{1}{4 \tan(\mu'_{rim} / 2)}$$

### Συλλέκτης Γραμμικής Εστίασης

Η επιφάνεια που δημιουργείται αν περιστρέψουμε την παραβολή γύρω από άξονα κάθετο στο επίπεδο της, καλείται παραβολικός κύλινδρος. Ηλιακοί συλλέκτες αυτής της μορφής ονομάζονται συλλέκτες γραμμικής εστίασης, γιατί τα σημεία εστίασης των άπειρων παραβολών που δημιουργούνται σχηματίζουν μια ευθεία. Όταν αυτή η ευθεία ευθυγραμμίζεται με τις ακτίνες του ηλίου, τότε αυτές συγκεντρώνονται πάνω της.



### Συλλέκτης Εστίασης Σημείου

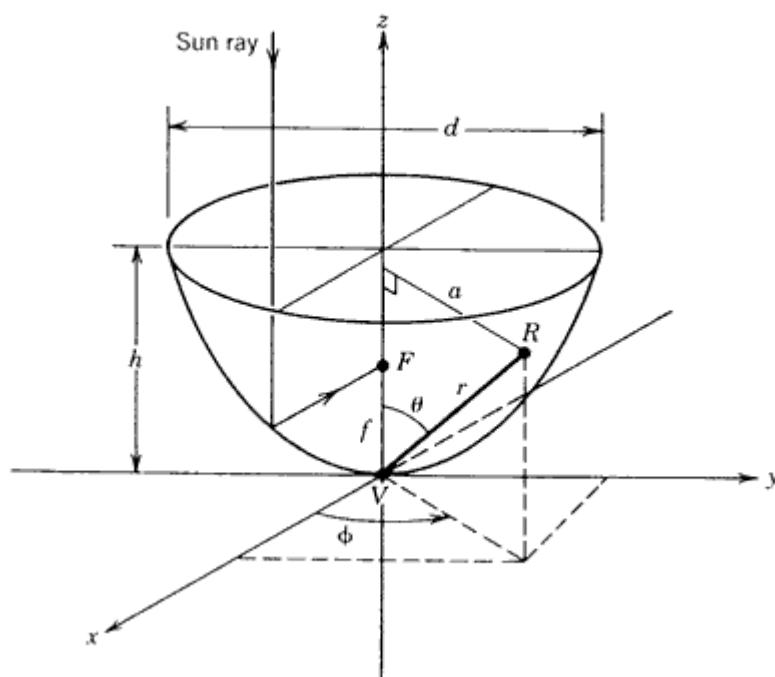
Η επιφάνεια που δημιουργείται περιστρέφοντας την παραβολή γύρω από τον άξονά της καλείται παραβολοειδές. Οι ηλιακοί συλλέκτες που έχουν τέτοιου είδους επιφάνειες ονομάζονται συλλέκτες εστίασης σημείου. Η εξίσωση που διέπει το παραβολοειδές με άξονα συμμετρίας τον z είναι:

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

Όπου f είναι η απόσταση της κορυφής από το σημείο εστίασης (focal length). Στις πολικές συντεταγμένες, με a την απόσταση από τον άξονα z η παραπάνω σχέση γίνεται:

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

Η ακόλουθη εικόνα παρουσιάζει ένα παραβολοειδές.



Εικόνα 12

Η παραπάνω σχέση στις σφαιρικές συντεταγμένες γράφεται:

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} = \frac{4f}{r}$$

Η συνολική επιφάνεια του παραβολοειδούς μπορεί να υπολογισθεί ολοκληρώνοντας την εξίσωσή του στις πολικές συντεταγμένες.

$$A_3 = \int_0^{d/2} dA_3 = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[ \left( \frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - 1 \right\} \quad (m^2)$$

Η concentrator aperture area είναι ιδιαίτερα σημαντική για την πρόβλεψη της απόδοσης του συλλέκτη:

$$A_2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (m^2)$$

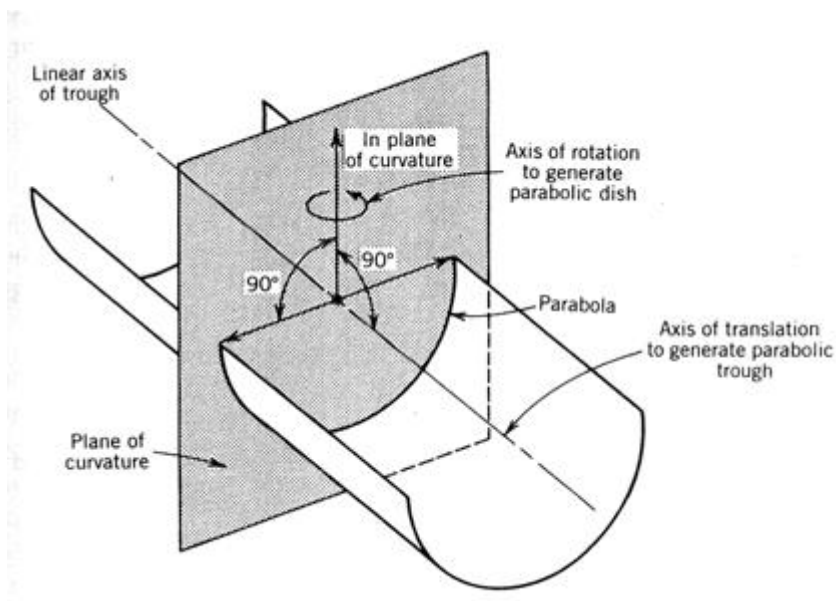


Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη του focal length και της γωνίας  $\beta'_{\eta\mu}$ , η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$A_z = \frac{\pi}{4} (2p \sin \beta'_{\eta\mu})^2$$

$$= 4 \pi f^2 \frac{\sin^2 \beta'_{\eta\mu}}{(1 + \cos \beta'_{\eta\mu})^2} \quad (m^2)$$

Στους ηλιακούς συλλέκτες εμφανίζονται τόσο παραβολικές όσο και σφαιρικές γεωμετρίες. Πριν προχωρήσουμε όμως παρακάτω, πρέπει να αναφερθούμε στον όρο ‘επίπεδο κυρτότητας’ (plane of curvature), το οποίο φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



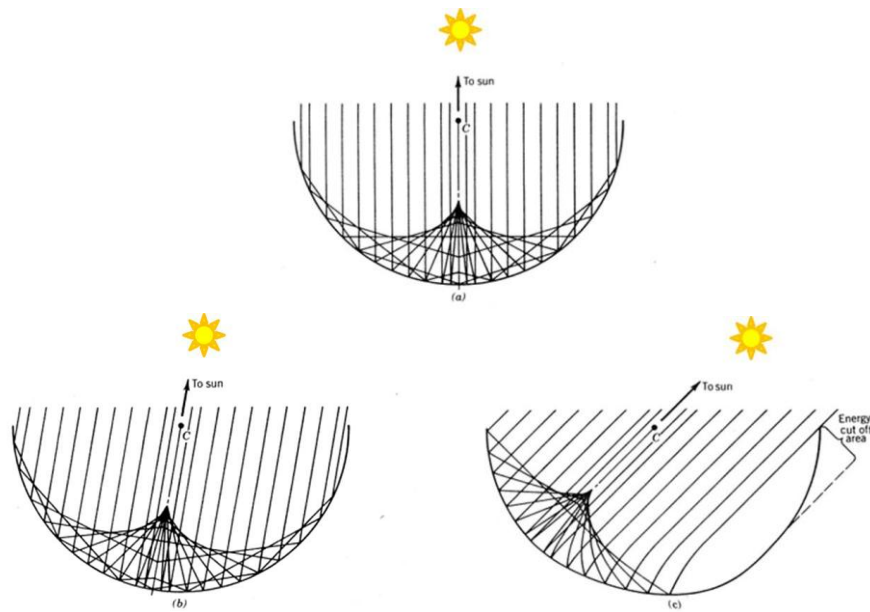
Εικόνα 13

Όπως παρατηρούμε η επιφάνεια αυτή είναι κάθετη στον άξονα του συλλέκτη. Για του παραβολικούς ή σφαιρικούς συλλέκτες η επιφάνεια αυτή περιστρέφεται προκειμένου να μας δώσει την επιθυμητή γεωμετρία. Οι αρχές που διέπουν αυτούς τους συλλέκτες εξετάζονται παρακάτω μέσω των διαγραμμάτων του ίχνους ακτίνας.

Η αντανάκλαση των παράλληλων ακτίνων τόσο από κυκλικούς όσο και από παραβολικούς καθρέφτες φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες. Τα χαρακτηριστικά τους στη συγκέντρωση παράλληλων ακτίνων της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που είναι κάθετη στην επιφάνειά τους είναι:

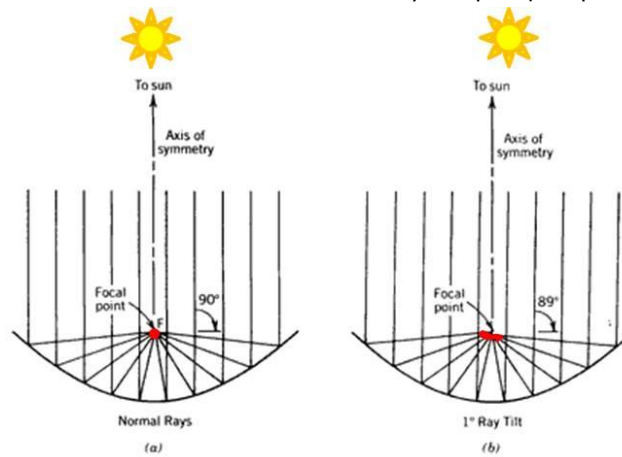
- Όλες οι παράλληλες ακτίνες που αντανακλώνται από ένα κυκλικό καθρέφτη περνούν από μια ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του κύκλου και είναι παράλληλη στις προσπίπτουσες ακτίνες.
- Όλες οι παράλληλες ακτίνες που αντανακλώνται από ένα παραβολικό καθρέφτη, όταν είναι παράλληλες στον άξονα συμμετρίας του, τέμνονται στο ίδιο σημείο.

Ένας κυκλικός καθρέφτης είναι συμμετρικός ως προς την περιστροφή του γύρω από το κέντρο. Αυτό σημαίνει ότι αν οι ακτίνες του ήλιου δεν είναι κάθετες στην επιφάνεια του συλλέκτη, τότε το μοτίβο των ανακλώμενων ακτίνων είναι το ίδιο αλλά έχει στραφεί, όπως φαίνεται στα δυο τελευταία σχήματα. (Stine & Geyer)



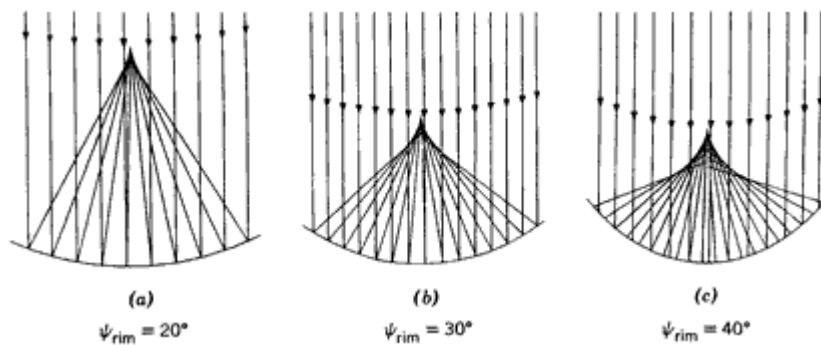
Εικόνα 14

Ένας παραβολικός καθρέφτης όμως, δεν είναι συμμετρικός κατά την περιστροφή του γύρω από το σημείο εστίασης. Έτσι σε περίπτωση που οι παράλληλες ακτίνες παρεκκλίνουν έστω και λίγο από το να είναι κάθετες στην επιφάνεια, παρατηρείται διασπορά των ακτίνων, δηλαδή δε τέμνονται όλες στο σημείο εστίασης. Άρα οι παραβολικοί συλλέκτες πρέπει να ακολουθούν με ακρίβεια την πορεία του ηλίου και ο άξονας τους να είναι πάντα παράλληλος με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.



Εικόνα 15

Αν οι δισδιάστατοι καθρέφτες που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα σχήματα περιστραφούν, τότε όπως αναφέρθηκε το αποτέλεσμα που έχουμε είναι σφαιρικά και παραβολικά πιάτα. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το σημείο εστίασης τέτοιων συλλεκτών για διάφορες γωνίες  $\psi_{rim}$ .



Εικόνα 16

Για πρακτικές εφαρμογές η  $\psi_{rim}$  πρέπει να είναι  $20^0-30^0$ , έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι σφαιρικές αποκλίσεις.

## Οπτικές εκτροπές-αποκλίσεις

Μέχρι τώρα θεωρούνταν ότι ένας φακός ή ένας καμπύλος καθρέπτης είναι σε θέση να σχηματίσει ένα σημειακό είδωλο ενός σημειακού αντικειμένου. Αυτό μπορεί να είναι κατά προσέγγιση αλήθεια αν: α) το βάθος του κατόπτρου ή το πάχος του φακού είναι μικρό σχετικά με τις άλλες διαστάσεις β) η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες με τον οπτικό άξονα είναι πολύ μικρή και γ) χρησιμοποιείται μονοχρωματικό φως. Συνήθως καμία από αυτές τις συνθήκες δεν ικανοποιείται εντελώς και το είδωλο που σχηματίζεται από ένα φακό ή από ένα καμπύλο κάτοπτρο «υποφέρει» από πολλές αποκλίσεις.

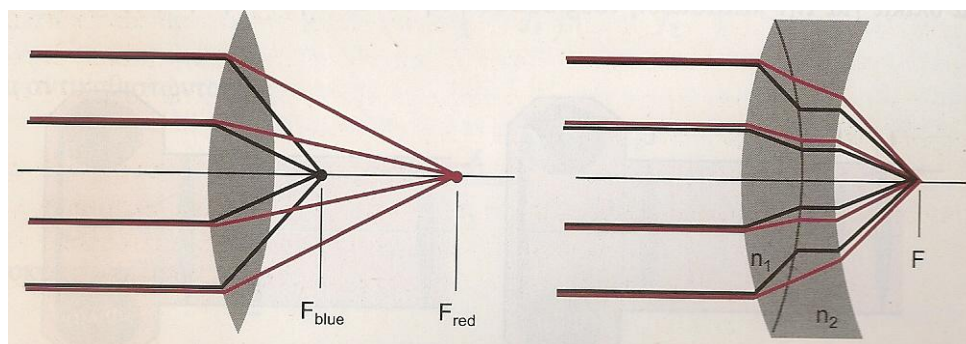
Υπάρχουν πέντε γεωμετρικές εκτροπές και είναι:

- σφαιρικές εκτροπές (spherical aberration)
- αστιγματισμός (astigmatism)
- κόμη (coma)
- καμπυλότητα πεδίου (curvature of field)
- παραμόρφωση ειδώλου (distortion)

Ακόμα, εφόσον δεν έχουμε μονοχρωματικό φως, οι φακοί (αλλά όχι τα κάτοπτρα) προκαλούν χρωματικές εκτροπές.

### Χρωματική απόκλιση-εκτροπή

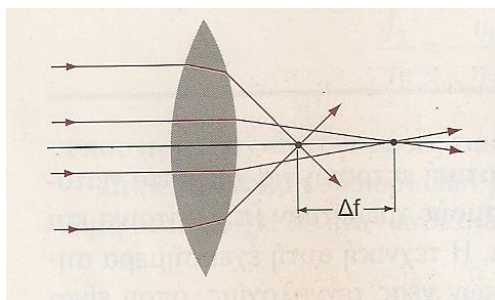
Αποδίδεται στο γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης κάθε υλικού είναι διαφορετικός για κάθε χρωματική συνιστώσα του φωτός (καθώς έχουν διαφορετικό μήκος κύματος) και κατ' επέκταση η διάθλαση προκαλεί διαφορετική εκτροπή ακτίνων. Η χρωματική εκτροπή περιορίζεται με τη χρήση αχρωματικών φακών, οι οποίοι κατασκευάζονται από τη συνένωση δύο ή περισσότερων φακών, όπως φαίνεται στο δεξί σχήμα.



Εικόνα 17

### Σφαιρικές εκτροπές

Το σφάλμα της σφαιρικής εκτροπής παρουσιάζεται συνήθως στις περιπτώσεις των περιφερειακών ακτίνων, οι οποίες εστιάζονται σε διαφορετικά σημεία του οπτικού άξονα και δημιουργούν κηλίδα εστίασης, όπως φαίνεται στο σχήμα.

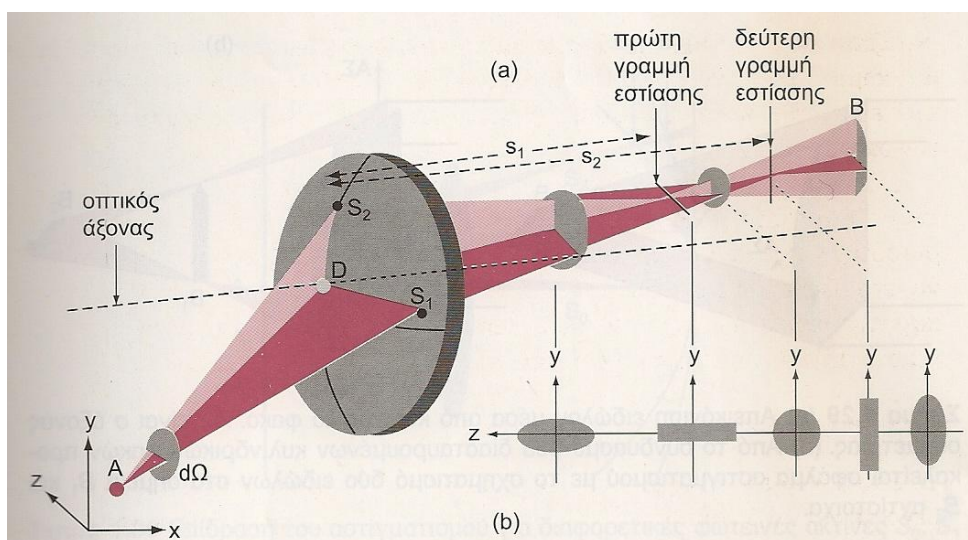


Εικόνα 18

Όσον αφορά τα συγκεντρωτικά κάτοπτρα, κάποιες ακτίνες ανακλώνται δεύτερη φορά στο κάτοπτρο και χάνονται.

### Αστιγματισμός

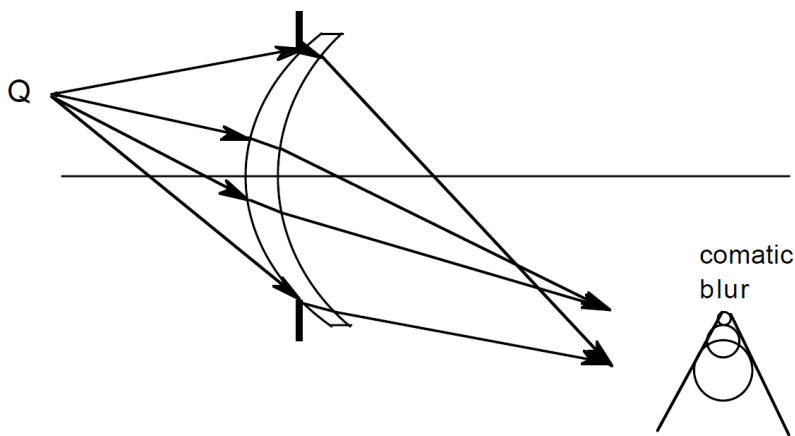
Όταν μία σημειακή πηγή A βρίσκεται επί ενός δευτερεύοντος οπτικού άξονα, τότε οι ακτίνες, μετά την έξοδο τους από το φακό, δεν θα εστιάζονται σε σημείο, αλλά θα σχηματίζουν γραμμές εστίασης, που προέρχονται από τη σύγκλιση ενός οριζοντίου και ενός καθέτου επιπέδου φωτεινών ακτινών. Οι φωτεινές ακτίνες συγκλίνουν σε τμήματα ευθειών, που είναι κάθετα μεταξύ τους και απέχουν από το φακό αποστάσεις  $s_1$  και  $s_2$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η δημιουργία δύο διαφορετικών εστιών οφείλεται στο γεγονός ότι η φωτεινή ακτίνα  $AS_2$  διαθλάται εντονότερα από ότι η ακτίνα  $AS_1$ . Το φαινόμενο αυτό προκαλεί παραμόρφωση του ειδώλου, το μέγεθος του οποίου είναι συνάρτηση της διαφοράς δρόμων  $\Delta s = s_1 - s_2$  και αυξάνει ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης της φωτεινής δέσμης επί του φακού.



Εικόνα 19

### Κόμη

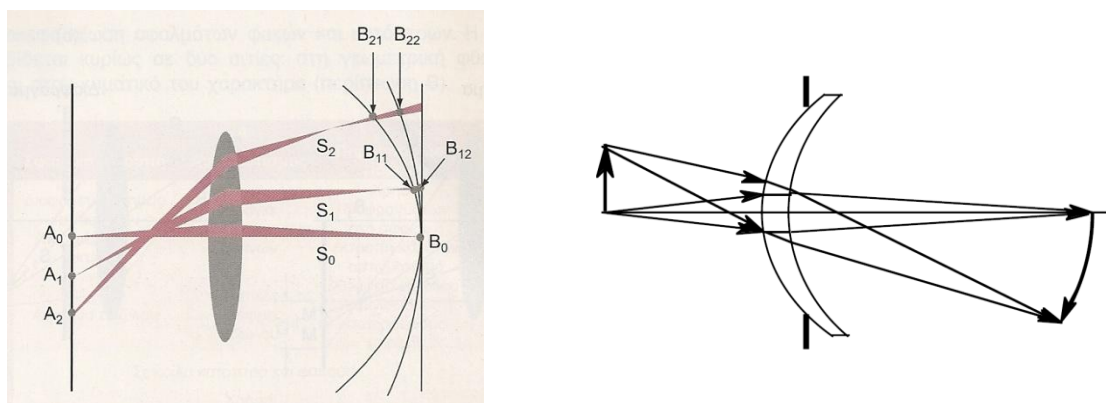
Αν ο φακός τοποθετηθεί πλάγια στον οπτικό άξονα, τότε δεν θα σχηματίζεται ευκρινές είδωλο, αλλά ένα πλευρικά διογκούμενο, που θα παρουσιάζει μία κομητική εμφάνιση. Κόμη μπορεί επίσης να συμβεί και όταν οι φωτεινές ακτίνες προσπίπτουν στο φακό υπό κλίση. Το φαινόμενο της κόμης γίνεται περισσότερο έντονο, αν τοποθετήσουμε ένα διάφραγμα πλησίον του οπτικού άξονα, έτσι ώστε μόνο οι εξωτερικές ακτίνες να διέρχονται, όπως στο δεξί σχήμα.



Εικόνα 20

Καμπυλότητα πεδίου

Το σφάλμα αυτό προέρχεται από τη διαφορετική εκτροπή των ακτίνων κατά την πρόσπτωσή τους στην επιφάνεια του φακού. Η πλάγια πρόσπτωση των ακτίνων  $S_1$  και  $S_2$  προκαλεί σφάλμα αστιγματισμού, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται διαφορετικά εστιακά επίπεδα για κάθε μία φωτεινή ακτίνα. Το είδωλο είναι ευδιάκριτο αλλά πάνω σε κυρτή επιφάνεια.



Εικόνα 21

Παραμόρφωση ειδώλου

Στη παραμόρφωση ειδώλου, το είδωλο είναι ευδιάκριτο αλλά δε διατηρεί το σχήμα του, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 22





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

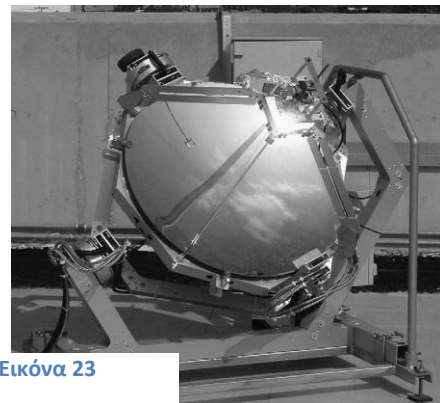
### 3.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

#### **3.1.1 Μια μικρογραφία φωτοβολταϊκού με συγκεντρωτικό συλλέκτη και θερμικό σύστημα**

Σκοπός αυτής της δημοσίευσης είναι η παρουσίαση και ανάλυση μίας διάταξης φωτοβολταϊκών και του θερμοεναλλάκτη της. Στη δημοσίευση αναφέρεται ότι το κόστος παραγωγής ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού μειώνει το κόστος κτήσης καθώς μειώνεται η περιοχή που θα καλύπτεται από το ακριβό φωτοβολταϊκό. Ακόμα η εγκατάσταση της συγκεκριμένης διάταξης θα πρέπει να είναι κοντά στον καταναλωτή, για να μπορεί να εκμεταλλευτεί τη θερμότητα και να έχει συμπαραγωγή, καθώς η μεταφορά της θερμότητας δε γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις. (Kribus, Kaftori, Mittelman, Hirshfeld, Flitsanov, & Dajan, 2006)

Η διάταξη αποτελείται από ένα συλλέκτη που έχει σχήμα παραβολικού πιάτου, από το φωτοβολταϊκό και από ένα εναλλάκτη θερμότητας, τοποθετημένο στην πίσω πλευρά του PV, όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα.

Για να εκμεταλλευτούμε τη θερμότητα, θα πρέπει να δαπανηθεί ένα επιπλέον 5% επί της τιμής της διάταξης εάν πραγματοποιείται ήδη οποιαδήποτε ψύξη στο συλλέκτη και 10% εάν έχουμε παθητικά ψύξη.



Εικόνα 23

Η ψύξη θα πρέπει να είναι συνεχής, για να αποτραπεί η καταστροφή του PV από την υπερθέρμανση και να έχουμε έναν αποδεκτό βαθμό απόδοσης του PV, καθώς αυτός μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.

Η διάταξη PV αποτελείται από triple-junction-cells (τριπλής επικάλυψης) με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 32%.

#### **Βαθμοί απόδοσης**

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι:

$$\eta_{EL} = \eta_{OPT} \times \eta_{PV} \times \left(1 - \frac{Q_{PAR}}{Q_{GRO}}\right) \times \eta_{INV}$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης

$$\eta_{TH} = \eta_{OPT} \times (1 - \eta_{PV}) \times \eta_{REC}$$

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι

$$\eta_{CHP} = \eta_{EL} + \eta_{TH}$$

Όπου

$\eta_{INV}$ : μετατροπέας DC σε AC (inverter)

$\eta_{OPT}$ : είναι οι οπτικές απώλειες και εδώ λαμβάνονται 0,85

$\eta_{PV}$ : είναι οι απώλειες του φωτοβολταϊκού πάνελ που οφείλονται στα αναπόφευκτα κενά μεταξύ των κελιών του φωτοβολταϊκού, στις διαφορές των ρευμάτων εξόδων των κελιών που είναι συνδεδεμένα σε σειρά.

Αυτός ο βαθμός απόδοσης για προσπίπτουσα ακτινοβολία  $1\text{kW/m}^2$  (ένας ήλιος) είναι:

$$\eta_{PV} = 0.288 - 0.000558 \times (T_C - 25^\circ\text{C})$$

Όπου  $T_C$  είναι η θερμοκρασία του κελιού.

### Ισχύς

Η συνολική ισχύς του συνεχούς ρεύματος που παράγεται είναι

$$Q_{GRO} = Q_{IN} \times \eta_{OPT} \times \eta_{PV}$$

Η παρασιτική ισχύς που οφείλεται στο μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου και στην αντλία παροχής του ψυκτικού υγρού είναι

$$Q_{PAR} = 0,02 \times Q_{IN} + Q_{PUMP}$$

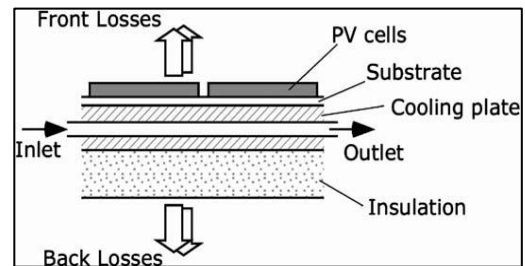
$$Q_{PUMP} = \frac{\dot{m} \times \Delta P}{\rho \times \eta_P}$$

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση για τη μεταφορά θερμότητας στη διάταξη.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχουν απώλειες θερμότητας στην πάνω και κάτω επιφάνεια, ενώ οι απώλειες των τοιχωμάτων αμελούνται.

Η θερμική ισχύς που δέχεται το PV είναι

$$Q_{TH} = Q_{INC} \times \eta_{OPT} \times (1 - \eta_{PV}) = Q_{COO} + (Q_F + Q_B)$$



Εικόνα 24

Η απώλεια ισχύος από την πάνω επιφάνεια για αέρα  $5\text{m/s}$  είναι

$$Q_F = h_F \times A_F \times (T_C - T_\infty) + \varepsilon_F \times A_F \times \sigma \times (T_C^4 - \frac{1}{2} T_\infty^4)$$

Η απώλεια ισχύος από την κάτω επιφάνεια, η οποία όμως δέχεται και μη συγκεντρωμένη προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι

$$Q_B = \frac{k_B \times A_B \times (T_{PL} - T_B)}{l_B} = h_B \times A_B \times (T_B - T_\infty) + \varepsilon_B \times A_B \times \sigma \times (T_B^4 - \frac{1}{2} T_\infty^4) - \varepsilon_B \times A_B \times I$$

η θερμική ισχύς που δέχεται και μεταφέρει το ψυκτικό υγρό είναι

$$Q_{COO} = \dot{m} \times C \times (T_0 - T_i) = h_{COO} \times A_{COO} \times \frac{T_0 - T_i}{\ln\left(\frac{T_{PL} - T_i}{T_{PL} - T_0}\right)}$$



Όπου

$$h_{COO} = Nu_d \times \frac{k}{d} \quad Nu_d = 0.023 \times Re_d^{4/5} \times Pr^{2/5}$$

$$Re_d = 4 \times \dot{m} / \mu \times \pi \times d$$

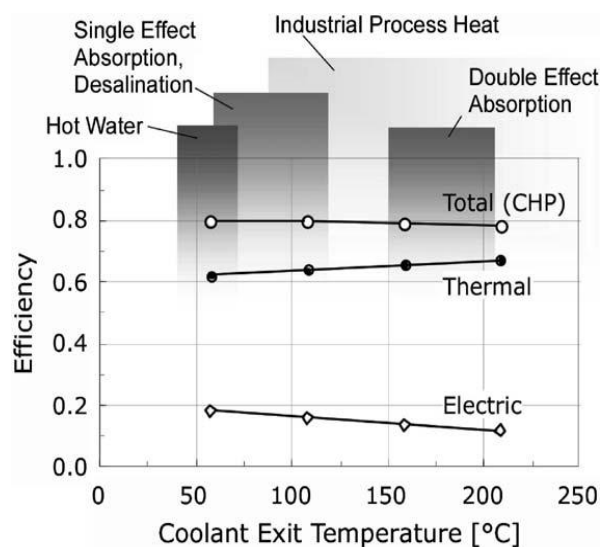
$$Pr^{2/5} \times k / \mu^{4/5} = 263,75 + 3,2466 \times T_m$$

Με  $T_m$  η μέση θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού.

Μετά από ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για επιφάνεια ανάκλασης  $0,95m^2$  και προσπίπτουσα ακτινοβολία  $0,9kW/m^2$ , δίνεται το ακόλουθο διάγραμμα.

Σε αυτό το διάγραμμα φαίνονται οι βαθμοί απόδοσης της διάταξης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του ψυκτικού υγρού. Η θερμοκρασία του PV είναι συνήθως  $10^\circ C$  πάνω από την θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού υγρού.

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνει η θερμοκρασία, τόσο μειώνεται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της απώλειας το ανακτούμε ως θερμική ισχύ. Ακόμα βλέπουμε και τις εφαρμογές που μπορούμε να υλοποιήσουμε ανάλογα με τη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού υγρού που μπορούμε να επιτύχουμε.



Εικόνα 25

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία ανάλυση κόστους, στην οποία γίνεται σύγκριση τριών περιπτώσεων

- (MCPV) μικρογραφία φωτοβολταϊκού με συγκεντρωτικό συλλέκτη και θερμικό σύστημα στους  $50-60^\circ C$
- (FPPV) επίπεδος συλλέκτης με φωτοβολταϊκό
- (PV/T) επίπεδος συλλέκτης με φωτοβολταϊκό και θερμικό σύστημα

Θεωρείται ότι ο εναλλακτικός τρόπος παραγωγής της θερμικής ενέργειας, προκειμένου να γίνει η σύγκριση είναι ρεύμα ή φυσικό αέριο.

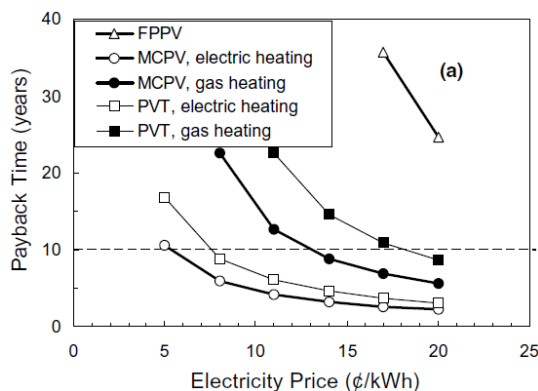
#### Διάφορα μεγέθη

- ✓ επιτόκιο αναγωγής είναι 5% και δε λαμβάνεται υπόψη ο πληθωρισμός
- ✓ κόστος κτήσης του συλλέκτη για FPPV και PV/T είναι  $\$6/W_p$
- ✓ κόστος κτήσης για MCPV είναι  $\$4/W_p$
- ✓ θεωρείται ότι το κόστος του φυσικού αερίου έχει γραμμική συσχέτιση με αυτό του ηλεκτρικού ρεύματος

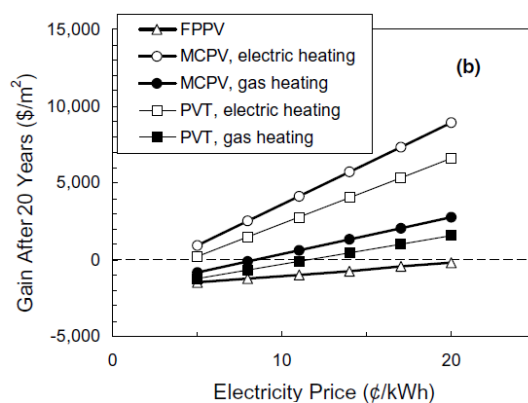
- ✓ στα FPPV και PV/T ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι 12%
- ✓ στο PV/T ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι 48%
- ✓ στον τόπο του πειράματος η ετήσια δέσμη ακτινοβολίας έχει ισχύ 2014kWh/m<sup>2</sup>

Ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν την περίοδο αποπληρωμής και το κέρδος μετά από είκοσι χρόνια συναρτήσει της τιμής πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος και για τις τρεις περιπτώσεις καθώς και για τις υποπεριπτώσεις που η ηλιακή θερμότητα αντικαθιστά ηλεκτρική θέρμανση(electric heating) ή θέρμανση από φυσικό αέριο(gas heating).

Στο διάγραμμα (a) φαίνεται ότι το FPPV δεν έχει εύλογο χρόνο αποπληρωμής, ακόμα και για υψηλή τιμή πώλησης του ηλεκτρικού, για αυτό και δίνονται επιδοτήσεις. Για περίοδο αποπληρωμής 10 χρόνων, αυτή επιτυγχάνεται για το MCPV-electric με τιμή πώλησης του ηλεκτρικού €5/kWh, για το PVT-electric €8/kWh, για το MCPV-gas με €13/kWh. Άρα πιο αποδοτικό οικονομικά είναι το MCPV-electric.



Στο διάγραμμα (b) υπολογίζεται η μελλοντική αξία για την ενέργεια που εξοικονομείται κατά τη διάρκεια ζωής της διάταξης και αφαιρείται η μελλοντική αξία της αρχικής επένδυσης. Έτσι έχουμε το μελλοντικό κέρδος. Με όμοιο τρόπο βλέπουμε ότι το FPPV δε συμφέρει για καμιά τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος και ότι πιο συμφέρουσα και ακίνδυνη πρόταση είναι το MCPV-electric.



Εικόνα 26

### 3.1.2 Ψύξη με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (CPVT) συστήματα

Σκοπός αυτής της δημοσίευσης είναι η μελέτη των συστημάτων ψύξης με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα (PV/T) μπορούν να φτάσουν τους 40-60 °C έχοντας ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης και η θερμότητά τους χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρου και νερού χρήσης σε οικίες. Η ψύξη με ηλιακή ενέργεια απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες για την περαίωσή της, γι' αυτό χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (CPVT) συστήματα. (Mittelman, Kribus, & Dayan, 2007)

Μία μέθοδος ψύξης με ηλιακή ενέργεια είναι αυτή με απορρόφηση και έχουμε:

- Ψύξη με μονοβάθμια απορρόφηση (Single effect absorption cooling)
- Ψύξη με διβάθμια απορρόφηση (Double effect absorption cooling)

Σε αυτήν τη δημοσίευση εξετάζεται ένα CPVT σύστημα, το οποίο παρέχει θερμότητα για ψύξη με μονοβάθμια απορρόφηση (Single effect absorption cooling).

Συγκεκριμένα η διάταξη βασίζεται σε triple-junction φωτοβολταϊκά στοιχεία, για πολλαπλή επικάλυψη, με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 37%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τοποθετούνται πάνω σε ένα μικροεναλλάκτη (cooling plate), ο οποίος ψύχει τα φωτοβολταϊκά. Το εργαζόμενο μέσο του εναλλάκτη μπορεί να είναι απλό νερό ή άλλο υγρό για θερμοκρασίες πάνω από 100 °C και οδηγείται από τον μικροεναλλάκτη στη διάταξη ψύξης με απορρόφηση.

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με ισχύ  $Q_{INC}$  στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού, παρέχει ηλεκτρική ισχύ

$$Q_{EL} = (Q_{INC} \times \eta_{OPT} \times \eta_{PV} - Q_{PAR}) \times \eta_{INV} \equiv Q_{INC} \times \eta_{EL}$$

θερμική ισχύ που απορροφάται από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού

$$Q_{TH} = Q_{INC} \times \eta_{OPT} \times (1 - \eta_{PV})$$

Θερμική ισχύ στο ψυκτικό υγρό

$$Q_{COO} = Q_{TH} \times \eta_{REC} \quad \text{και} \quad Q_{COO} = Q_{TH} - Q_{TH,L} \quad \text{και} \quad Q_{TH} = h_{COO} \times A_{COO} \times \Delta T_{LM}$$

όπου  $h_{COO}$ :

$\eta_{OPT}$ : ο βαθμός απόδοσης των οπτικών

$\eta_{PV}$ : ο βαθμός απόδοσης της διάταξης των φωτοβολταϊκών

$\eta_{INV}$ : μετατροπέας DC σε AC (inverter)

$\eta_{REC}$ : ο θερμικός βαθμός απόδοσης

$Q_{PAR}$ : η ισχύς που καταναλώνεται για το μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου και για την αντλία παροχής του ψυκτικού υγρού

Ο βαθμός απόδοσης κάθε κελιού του φωτοβολταϊκού (για *triple junction*) είναι

$$\eta_C = 0.298 + 0.0142 \times \ln C + (-0.000715 + 0.0000697 \times \ln C) \times (T_C - 25^{\circ}C)$$

Όπου  $T_C$  είναι η θερμοκρασία του κελιού και  $C$  ο λόγος συγκέντρωσης του παραβολικού συλλέκτη με  $C \leq 200$ .

$$\eta_{PV} = \eta_C \times \eta_{mod}$$

Στη συγκεκριμένη δημοσίευση έχουν υπολογιστεί:

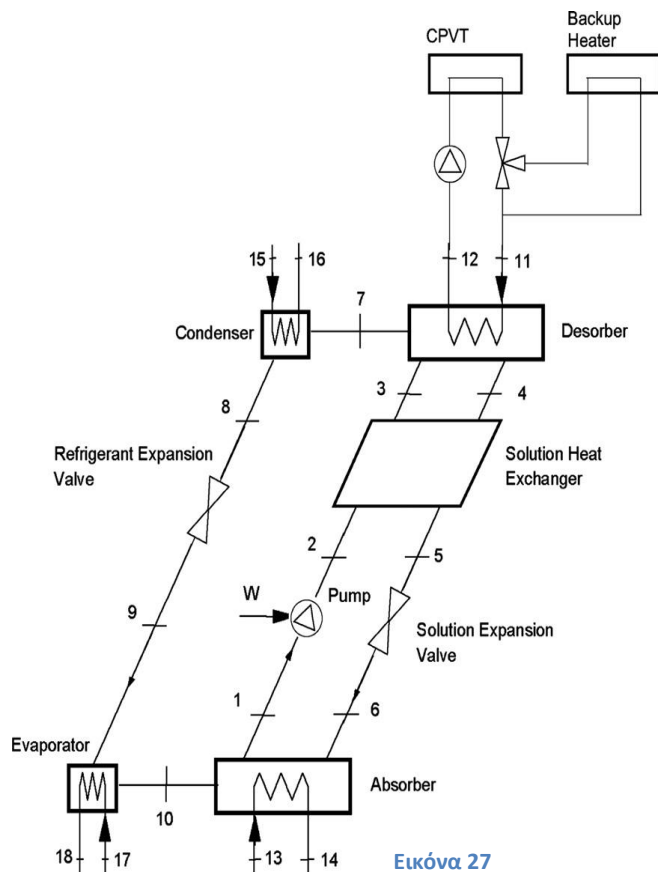
$\eta_{OPT}=0.85$ ,  $\eta_{INV}=0.9$  και ο βαθμός απόδοσης της διάταξης των κελιών του φωτοβολταϊκού εξαιτίας των κενών ανάμεσα στα κελιά  $\eta_{mod}=0.9$ (packing factor).

Στο διπλανό σχήμα φαίνεται το CPVT σύστημα, το οποίο παρέχει θερμότητα για ψύξη με μονοβάθμια απορρόφηση (Single effect absorption cooling).

Σαν ζεύγος στη διάταξη χρησιμοποιείται βρωμιούχο λίθιο (απορροφητής) με νερό(εργαζόμενο ψυκτικό μέσο) και ο χημικός τύπος είναι LiBr-H<sub>2</sub>O.

Η διάταξη θεωρείται ότι δουλεύει με φυσικό αέριο, για εναλλακτική παραγωγή θερμότητας, όταν δεν υπάρχει ηλιακή ενέργεια ή είναι ανεπαρκής.

Η ψυκτική ισχύς της διάταξης που επιλέχτηκε θα είναι 1MW για οποιαδήποτε T<sub>11</sub>, ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας (solution heat exchanger) είναι 0.64, θεωρήθηκε ακόμα ότι T<sub>13</sub>=T<sub>15</sub>=25°C, T<sub>17</sub>=10°C.



Εικόνα 27

Τα μεγέθη και οι σταθερές για τους εναλλάκτες θερμότητας του συστήματος υπολογίστηκαν με T<sub>11</sub>=100°C, η οποία είναι η θερμοκρασία του ψυκτικού νερού που ψύχει το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Η θερμική ισχύς του ατμοποιητή είναι

$$Q_e = \dot{m}_{17} \times C_p \times (T_{17} - T_{18}) \quad \text{ή} \quad Q_e = \dot{m}_{10} \times (h_{10} - h_9) \quad \text{ή} \quad Q_e = (U \times A)_a \times LMTD_a$$

$$\text{Όπου} \quad LMTD_a = \frac{T_6 - T_{14} - (T_1 - T_{13})}{\ln \left( \frac{T_6 - T_{14}}{T_1 - T_{13}} \right)}$$

Ομοίως και για τη θερμική ισχύ των υπόλοιπων εναλλακτών θερμότητας.

Η ισχύς που παρέχεται στην αντλία είναι

$$W = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

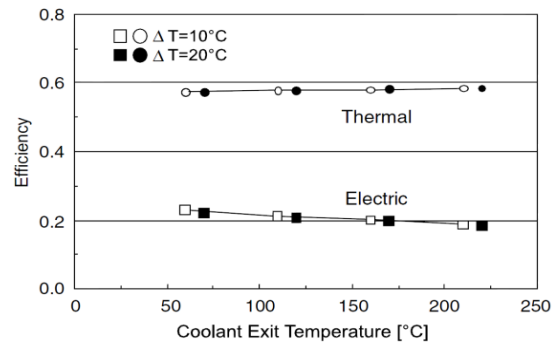
Ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς

$$COP = \frac{Q_e}{Q_d + W}$$

Μετά από ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για:

- προσπίπτουσα ακτινοβολία 0,9kW/m<sup>2</sup> και λόγο συγκέντρωσης C=200
- θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού υγρού στον αναγεννητή(Desorber) T<sub>11</sub> 65-120°C που είναι και η θερμοκρασία εξόδου από το CPVT
- τις θεωρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω

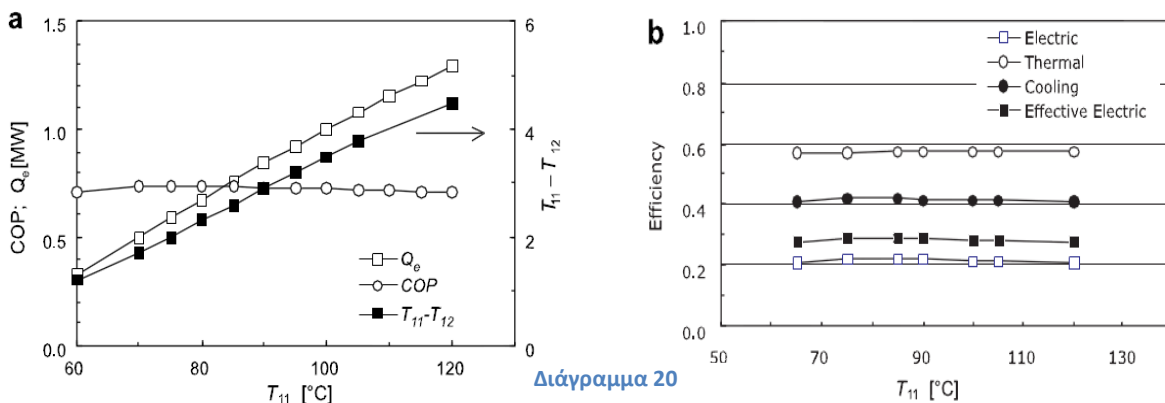
προκύπτει το διπλανό διάγραμμα που δείχνει τους βαθμούς απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του ψυκτικού υγρού σε δύο περιπτώσεις, για διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και εξόδου του ψυκτικού υγρού στο CPVT 10°C και 20 °C.



Διάγραμμα 19

Άρα, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού υγρού ( $T_{11}$ ), τόσο αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης, αλλά μειώνεται ο ηλεκτρικός. Το ίδιο ισχύει και όταν το  $\Delta T$  είναι μεγαλύτερο.

Από δεύτερη ανάλυση, στην οποία όμως δεν περιορίζεται η ψυκτική ισχύ στο 1MW, προκύπτουν και άλλα διαγράμματα που δείχνουν βαθμούς απόδοσης, την ψυκτική ισχύ, το COP και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του ψυκτικού υγρού στο CPVT.



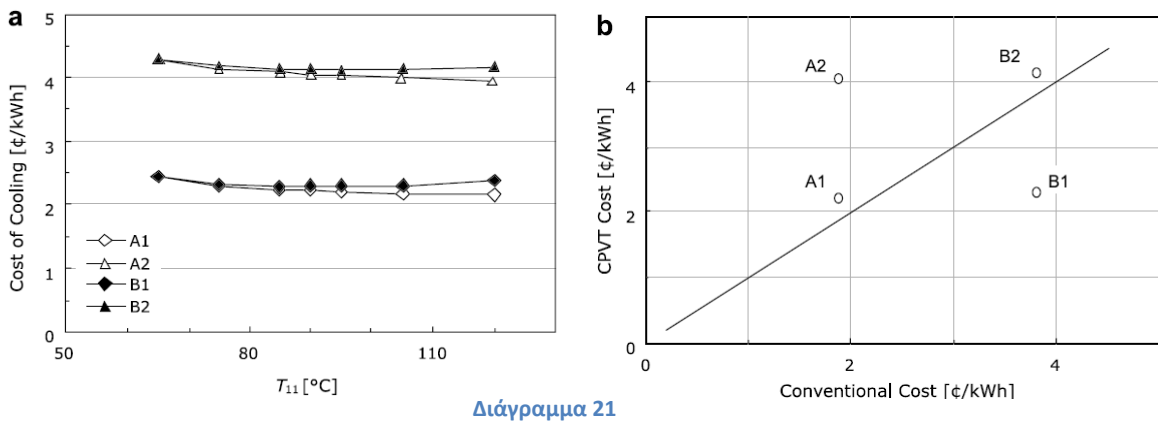
Διάγραμμα 20

Στο διάγραμμα (b) δίνεται και ο ψυκτικός βαθμός της διάταξης (cooling efficiency) που ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ψυκτικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ. Ακόμα δίνεται και ο ενεργός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (effective electrical efficiency) που βασίζεται στη συνολική συμβατική ενέργεια, την οποία γλιτώνουμε με τη χρήση του CPVT και της ψυκτικής διάταξης.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται οικονομική ανάλυση για διάφορα σενάρια.

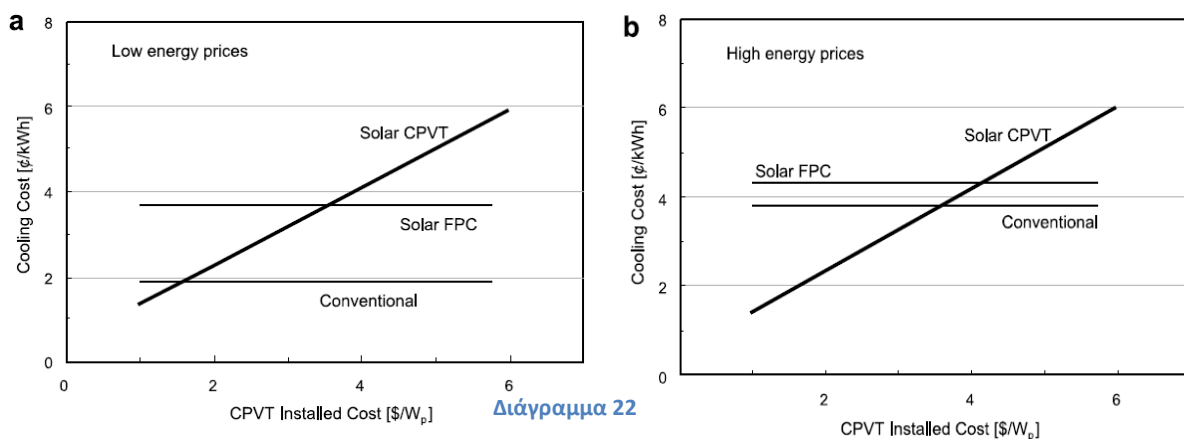
Η ηλιακή ακτινοβολία έχει ισχύ 2400kW/m<sup>2</sup>year. Η ψυκτική εγκατάσταση έχει ισχύ 1MW και δουλεύει με ετήσιο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας CF=0.5, το COP=6,36. Η οικονομική ανάλυση πραγματοποιείται για διάφορα σενάρια που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (τα δεδομένα του πίνακα προκύπτουν για  $T_{11}=90^{\circ}\text{C}$ ). Τα σενάρια αυτά αφορούν τις ακραίες τιμές για την τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος και την τιμή του φυσικού αερίου, το οποίο είναι η εναλλακτική πηγή θερμότητας, καθώς επίσης και για δύο τιμές κτίσης του CPVT.

Conventional energy	Collector Inst. cost	Case	Cost of cooling (€/kW h)		
			CPVT	Conventional	Difference
Electricity €7/kW h <sub>p</sub>	\$2/Wp	A1	2.22	1.88	+18%
N. Gas €1.3/kW h <sub>th</sub>	\$4/Wp	A2	4.05	1.88	+116%
Electricity €15/kW h <sub>e</sub>	\$2/Wp	B1	2.30	3.79	-39%
N. Gas €3.7/kW h <sub>th</sub>	\$4/Wp	B2	4.13	3.79	+9%



Από το διάγραμμα (a) φαίνεται ότι οι διαφοροποιήσεις συναρτήσει της  $T_{11}$  είναι πολύ μικρές. Από το διάγραμμα (b) που συγκρίνει το κόστος ψύξης από το CPVT στους  $T_{11}=90^{\circ}\text{C}$  και το κόστος ψύξης από συμβατική ψυκτική εγκατάσταση, φαίνεται ότι συμφέρει το σενάριο B1 και δε συμφέρει το σενάριο A2. Όσο για τα A1 και B2 είναι οριακά.

Τέλος παρουσιάζονται δύο διαγράμματα, τα οποία δείχνουν το κόστος της παραγόμενης ψύξης συναρτήσει του κόστους κτίσης του CPVT. Το διάγραμμα (a) είναι για χαμηλές τιμές της εναλλακτικής ενέργειας (σενάριο A) και το (b) για υψηλές τιμές ενέργειας (σενάριο B).



Εδώ έχουμε μία σύγκριση του κόστους ψύξης από:

- CPVT
- FPC (επίπεδο ηλιακό συλλέκτη)
- Conventional (συμβατική μέθοδο ψύξης)

Για παράδειγμα, στην περίπτωση (a) το CPVT θα προτιμάται οικονομικά από το FPC, όταν το κόστος κτίσης του CPVT γίνει κάτω από περίπου  $\$3,8/\text{kW}_p$ . Στην περίπτωση (b) η ψύξη από το CPVT θα προτιμάται οικονομικά, τόσο από τη ψύξη από FPC όσο και από συμβατική μέθοδο, όταν η τιμή κτίσης για το CPVT πέσει κάτω από  $\$3,8/\text{kW}_p$ .

Μία λύση για τη μείωση της τιμής κτίσης τους είναι η μαζική τους παραγωγή.

### 3.1.3 Αφαλάτωση με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (CPVT) συστήματα

Σκοπός αυτής της δημοσίευσης είναι η μελέτη των συστημάτων αφαλάτωσης με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα (PV/T) μπορούν να φτάσουν τους 40-60 °C έχοντας ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Η θερμική αφαλάτωση απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες για την περαίωση της, γι' αυτό χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (CPVT) συστήματα. (Mittelman, Kribus, Mouchtar, & Dayan, 2009)

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για αφαλάτωση μεγάλης κλίμακας:

- Αντίστροφη Οσμωση (Reverse Osmosis, RO) η οποία απαιτεί ηλεκτρισμό
- Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-stage Flash distillation, MSF) η οποία απαιτεί θερμική ενέργεια
- Πολυβάθμια εξάτμιση (Multi Effect Evaporation, MEE) η οποία επίσης απαιτεί θερμική ενέργεια

Σε αυτήν τη δημοσίευση εξετάζεται ένα CPVT σύστημα, το οποίο παρέχει θερμότητα σε μία εγκατάσταση αφαλάτωσης με τη μέθοδο MEE. Η συνδυαστική εγκατάσταση παράγει ηλεκτρισμό, ο οποίος παρέχεται στο δίκτυο, και αφαλατωμένο νερό.

Συγκεκριμένα η διάταξη βασίζεται σε triple-junction φωτοβολταϊκά στοιχεία, για πολλαπλή επικάλυψη, με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 37%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τοποθετούνται πάνω σε έναν μικροεναλλάκτη (cooling plate) ο οποίος ψύχει τα φωτοβολταϊκά. Το εργαζόμενο μέσο του εναλλάκτη μπορεί να είναι απλό νερό ή άλλο υγρό για θερμοκρασίες πάνω από 100 °C. Για τη συγκέντρωση χρησιμοποιούνται όλες οι κοινές διατάξεις όπως π.χ. παραβολικά πιάτα.

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με ισχύ  $Q_{INC}$  στην επιφάνεια συγκέντρωσης, παρέχει ηλεκτρική ισχύ

$$Q_{EL} = (Q_{INC} \times \eta_{OPT} \times \eta_{PV} - Q_{PAR}) \times \eta_{INV} \equiv Q_{INC} \times \eta_{EL}$$

και θερμική για την αφαλάτωση (ισχύς ψυκτικού υγρού)

$$Q_{COO} = Q_{INC} \times \eta_{OPT} \times (1 - \eta_{PV}) \times \eta_{REC} \equiv Q_{INC} \times \eta_{TH}$$

$$\text{με } \eta_{REC} = \frac{Q_{COO}}{Q_{TH}}$$

όπου  $\eta_{OPT}$ : ο βαθμός απόδοσης των οπτικών

$\eta_{PV}$ : ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού

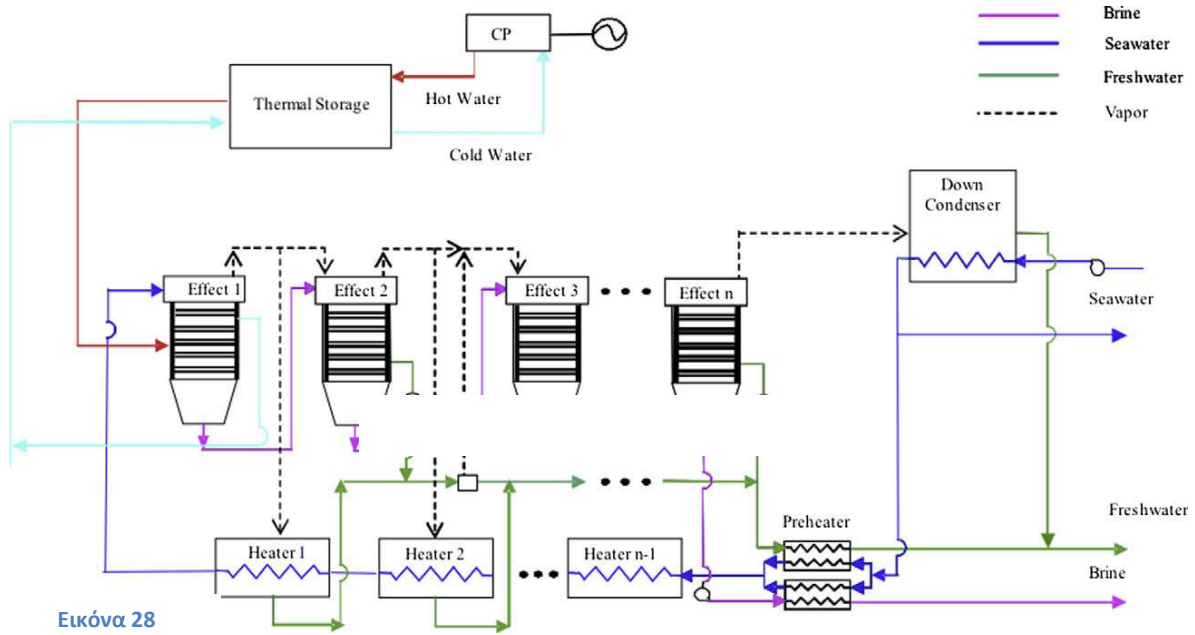
$\eta_{INV}$ : μετατροπέας DC σε AC (inverter)

$\eta_{REC}$ : ο θερμικός βαθμός απόδοσης

$Q_{TH}$ : θερμική ισχύς που απορροφάται από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού

$Q_{PAR}$ : η ισχύς που καταναλώνεται για το μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου και για την αντλία παροχής του ψυκτικού υγρού

Στο σχήμα1 φαίνεται η προαναφερθείσα διάταξη CPVT με αφαλάτωση.



Εικόνα 28

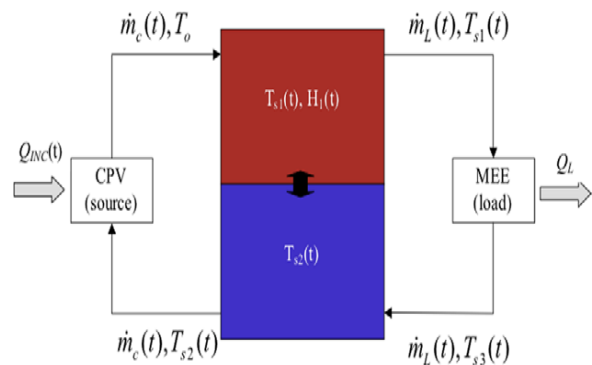
Σε αυτό το σύστημα το αλατόνερο περνάει από εναλλάκτες και καταλήγει στο effect 1 όπου εισέρχεται και το θερμό υγρό από το CPVT, το οποίο ξαναγυρνά στο thermal storage. Ο παραγόμενος ατμός από το effect 1 χρησιμοποιείται κατά ένα τμήμα για τη θέρμανση του εισερχόμενου αλατόνερου και το υπόλοιπο παρέχει θερμότητα στο επόμενο effect.

Κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Capacity</b>	10000	m <sup>3</sup> /day
<b>No. of effects</b>	14	
<b>Seawater temperature T<sub>sw</sub></b>	25	°C
<b>Seawater salinity X<sub>sw</sub></b>	42000	ppm
<b>Blowdown salinity X<sub>bd</sub></b>	63000	ppm
<b>Heaters efficiency η<sub>j</sub></b>	0,8	
<b>T<sub>B</sub>T-T<sub>1</sub></b>	5	°C
<b>T<sub>bd</sub>-T<sub>f</sub></b>	5	°C

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιείται μόνο η παραγόμενη από τον ήλιο ενέργεια.

Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μία μονάδα αποθήκευσης θερμότητας (Thermal storage) όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Με αυτήν πραγματοποιείται αφαλάτωση το καλοκαίρι καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ το χειμώνα σταματάει η αφαλάτωση, όποτε τελειώνει το βράδυ, μέχρι το επόμενο πρωί. Η διάταξη της μονάδας αποθήκευσης θερμότητας φαίνεται στο σχήμα 2.



Εικόνα 29



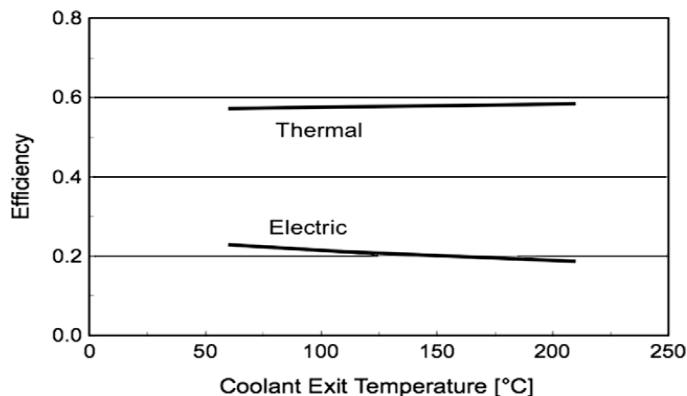
Η θερμότητα από το CPVT στη μονάδα αποθήκευσης είναι:

$$Q_{TH}(t) = G_b(t) \times A_{coll} \times \eta_{TH} = m_c(t) \times C_p [T_0 - T_{s2}(t)]$$

Ενώ η θερμότητα από τη μονάδα αποθήκευσης που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση είναι:

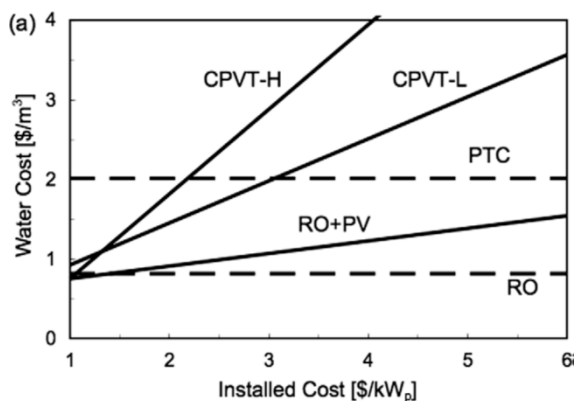
$$Q_L = m_L(t) \times C_p [T_{s1} - T_{s3}(t)] = U_{e1} A_{e1} \times LMTD_{e1}$$

Ο ηλεκτρικός και ο θερμικός βαθμός απόδοσης για λόγο συγκέντρωσης 200 φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



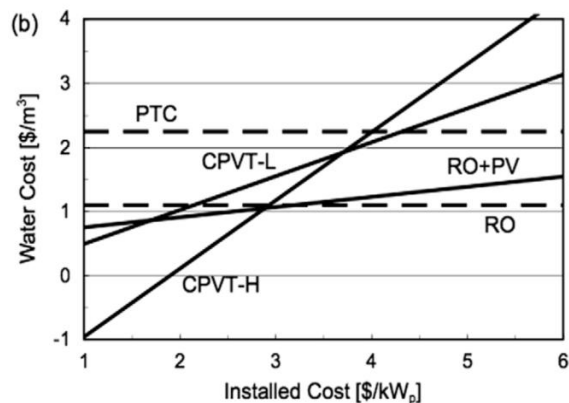
Διάγραμμα 23

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία ανάλυση κόστους, στην οποία γίνεται σύγκριση διαφορετικών μεθόδων αφαλάτωσης, με βάση το κόστος παραγωγής του αφαλατωμένου νερού και το κόστος εγκατάστασης. Ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν την ανάλυση αυτή.



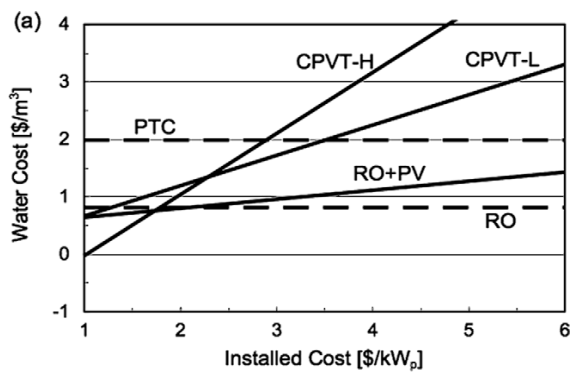
Τιμή πώλησης  $\phi$  7/ $kWh_{el}$

Διάγραμμα 24



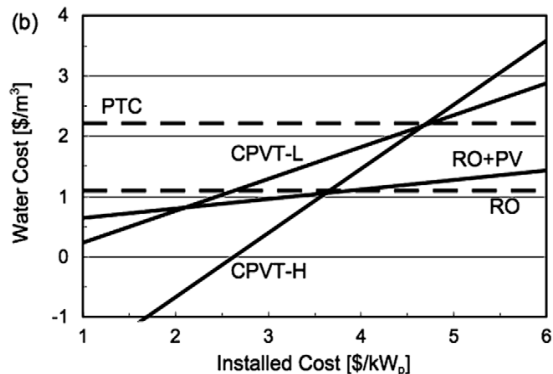
Τιμή πώλησης  $\phi$  15/ $kWh_{el}$

Αντίστοιχα διαγράμματα λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> και το οικονομικό όφελος από την αποφυγή αυτών παρουσιάζονται παρακάτω.



Τιμή πώλησης  $\phi$  7/ $kWh_{el}$

Διάγραμμα 25



Τιμή πώλησης  $\phi$  15/ $kWh_{el}$

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τα σημερινά δεδομένα για το κόστος εγκατάστασης, παρατηρούμε ότι η μέθοδος RO-PV (αντίστροφη όσμωση με φωτοβολταϊκά) είναι η πιο αποδοτική. Για κόστος εγκατάστασης κάτω από  $\$2/kW_p$ , τιμή που θα είναι εφικτή τα επόμενα χρόνια, τα συστήματα CPVT για αφαλάτωση είναι πιο επικερδή. Το μειονέκτημα του RO-PV είναι ότι δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί το υψηλό κόστος πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (γεγονός που φαίνεται στα δύο τελευταία διαγράμματα), γιατί η ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό δεν πωλείται στο δίκτυο, αλλά χρησιμοποιείται μόνο για ιδιοκατανάλωση. Γι' αυτό το CPVT με υψηλή συγκέντρωση είναι αρκετά πιο αποδοτικό από τη μέθοδο RO-PV.

### 3.1.4 Κάτοπτρα απομάκρυνσης υπέρυθρων για συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά

Τα κάτοπτρα με επικάλυψη εξαχνωμένου μετάλλου (metal vapor coated mirrors) ανακλούν την υπέρυθρη ακτινοβολία πάνω στο φωτοβολταϊκό πάνελ, η οποία δε μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, παρά μόνο αυξάνει τη θερμοκρασία του. Αυτό έχει σαν συνέπεια να αυξάνεται το κόστος για την ψύξη του φωτοβολταϊκού. Το κόστος αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση κατόπτρων απομάκρυνσης υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Αυτά τα κάτοπτρα παράγονται με λεπτό στρώμα επικάλυψης που έχει αναμίξεις με πολυμερή υλικά. Το στρώμα αυτό της επικάλυψης μπορεί να παραχθεί έτσι, ώστε να ανακλά μόνο προς το φωτοβολταϊκό εύρος φάσματος που μπορεί να απορροφηθεί από αυτό. (Hebrink & 3M Company, 2009)

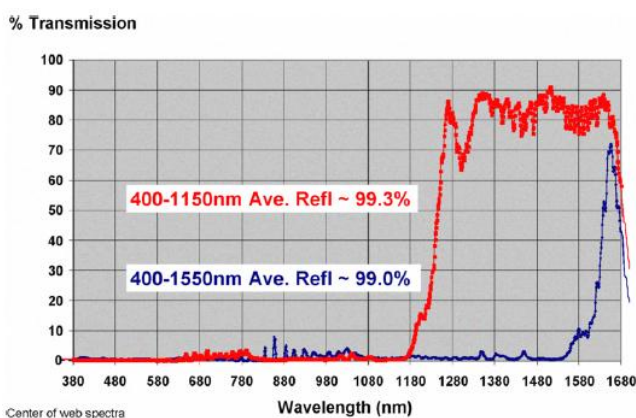
#### Γενικά

Στα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά με συγκέντρωση πάνω από 10X ήλιους, ενσωματώνεται ενεργητικό σύστημα ψύξης (με ανεμιστήρες ή με ψυκτικό υγρό κινούμενο από μία αντλία).

Στα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά με συγκέντρωση κάτω από 10X ήλιους ενσωματώνεται παθητικό σύστημα ψύξης (πτερύγια από αλουμίνιο) ή και ενεργητικό.

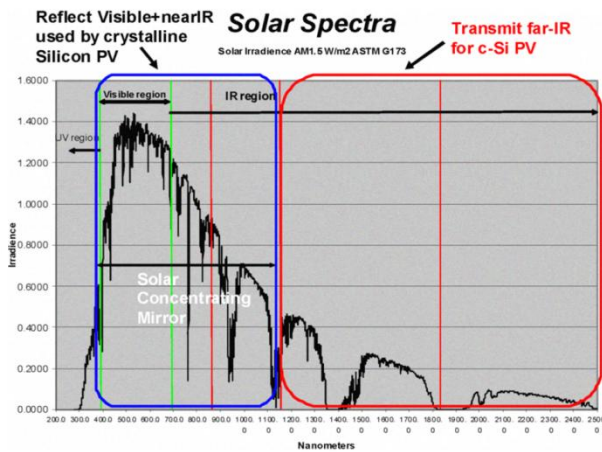
#### Ανάλυση

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν κάτοπτρα με πολλαπλές στρώσεις πολυμερών, έτσι ώστε να ανακλούν ένα εύρος φάσματος 400-1150 nm.



Στο διπλανό διάγραμμα φαίνεται το ποσοστό του ανακλώμενου φάσματος που απομακρύνεται από το κάτοπτρο, για την περίπτωση που μελετάται στη δημοσίευση (κόκκινη γραμμή) και για triple junction GaAs (μπλε γραμμή).

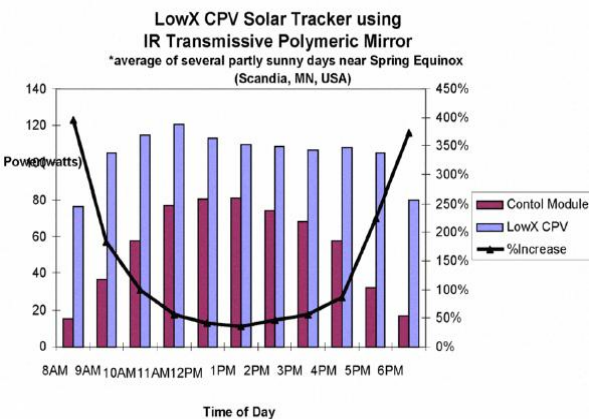
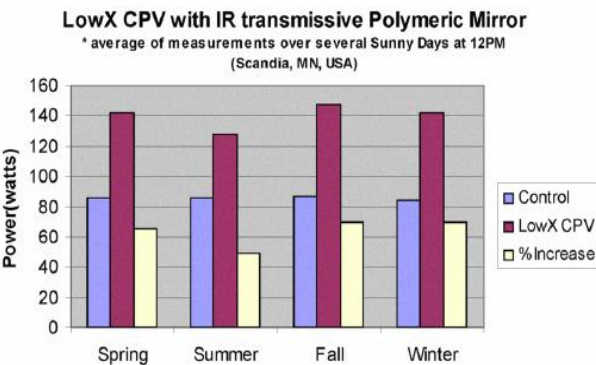
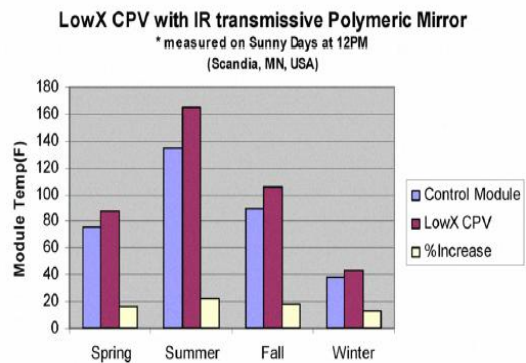
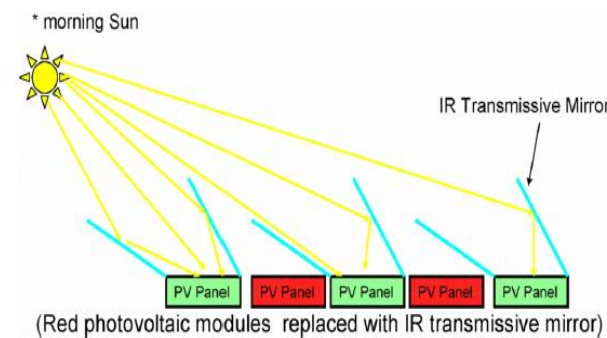
Διάγραμμα 26



Στο διπλανό διάγραμμα φαίνεται το ηλιακό φάσμα που αφορά στο φάσμα που δέχεται το κάτοπτρο και το φάσμα που δέχεται το κάθε κελί του φωτοβολταϊκού.

Διάγραμμα 27

Η διάταξη της ανάλυσης είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και έχει μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου. Ο συντελεστής πλήρωσης είναι  $FF=0.75$  (θεωρήθηκε ότι δεν αλλάζει με τα κάτοπτρα) και οι μετρήσεις έγιναν σε κλίμα όμοιο με αυτό της Γερμανίας. Παρουσιάζεται και ο μέσος όρος των μετρήσεων που έγιναν για δύομιση χρόνια. Η ισχύς του κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ είναι 80W.



Διάγραμμα 28

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται και η αύξηση της ισχύος για φωτοβολταϊκά με κάτοπτρο, έναντι της ισχύος που θα είχαν αν δεν είχαν κάτοπτρο.

Τα κάτοπτρα αυτά, λοιπόν, με τις επικαλύψεις από αναμίξεις με πολυμερή, αποτρέπουν τη μη χρήσιμη ως προς την ηλεκτρική ισχύ του φωτοβολταϊκού να φτάσει σε αυτό. Έτσι δεν αυξάνεται η θερμοκρασία του PV και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης δεν μειώνεται. Άρα μειώνεται και το κόστος, αφού για την ίδια ισχύ απαιτείται μικρότερη επιφάνεια φωτοβολταϊκού.

### 3.1.5 Τριπλής επικάλυψης φωτοβολταϊκά κελιά (triple junction InGaP/InGaAs/Ge) για υψηλής συγκέντρωσης φωτοβολταϊκές εφαρμογές: έλεγχοι υποβάθμισης των ηλιακών δεκτών

Αυτή η δημοσίευση προτείνει μία μέθοδο, που τυπικά χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των LED, για τον έλεγχο των υψηλής συγκέντρωσης ηλιακών δεκτών και τη συμπεριφορά λειτουργίας τους μετά από 20 χρόνια. (Padovani, et al., 2010)

Τα LED είναι πολύ κοινά με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία triple junction όσον αφορά τα υλικά, την πυκνότητα ισχύος και το μέγεθος. Ο μόνος επιπλέον παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας είναι η θερμοκρασία.

Η θερμοκρασία επηρεάζει μερικώς τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρονικών συσκευών. Μια τέτοια επίδραση μπορεί να γίνει κατανοητή μέσω του μοντέλου αντίδρασης. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει την ακόλουθη αρχή: όποτε ένα άτομο ή ένα μόριο έχει αρκετή ενέργεια για να υπερνικήσει το φράγμα δυναμικού, μία αντίδραση λαμβάνει χώρα. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο η υποβάθμιση μπορεί να θεωρηθεί ως μία αντίδραση που συμβαίνει με ένα ρυθμό, ο οποίος διέπεται από τους μηχανισμούς της διάχυσης της οξειδωσης και της καθίζησης.

Ο χρόνος αντίδρασης εξαρτάται τόσο από το φράγμα δυναμικού (ενέργεια ενεργοποίησης:  $E_a$ ), όσο και από τη θερμοκρασία και ακολουθεί τη σχέση του Arrhenius:

$$t = C \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

Όπου T:η θερμοκρασία σε K

k:η σταθερά του Boltzmann( $8,6173 \cdot 10^{-5}$ eV/K)

C:είναι μία σταθερά σε μονάδες χρόνου

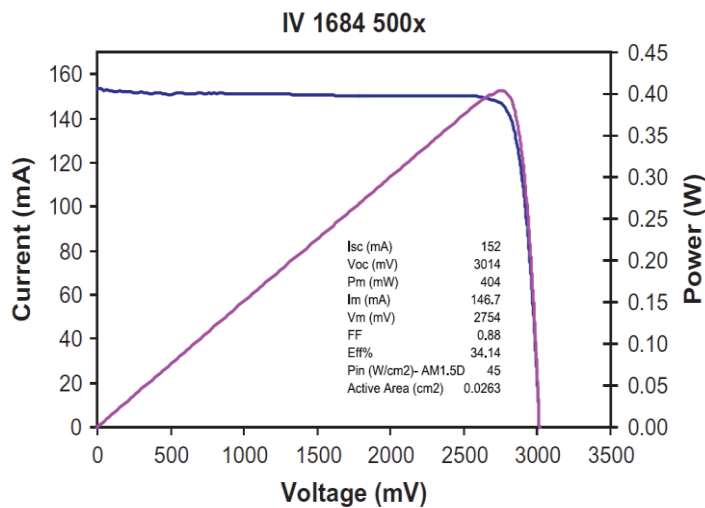
Ο ρυθμός υποβάθμισης για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$  είναι:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{C \exp\left(\frac{E_a}{kT_1}\right)}{C \exp\left(\frac{E_a}{kT_2}\right)}$$

Για την ανάλυση δίνονται:

- $T_{T1}=58400h$  (λαμβάνοντας υπόψη 20 χρόνια κανονικής λειτουργίας για 8h την ημέρα)
- $T_1=70^\circ C(343K)$ -θερμοκρασία λειτουργίας
- $T_2=140^\circ C(413K)$ -θερμοκρασία ελέγχου (επιταχυνόμενων συνθηκών)
- $E_a=0,75eV$

Άρα, προκύπτει ότι έλεγχος των 20 χρόνων σε επιταχυνόμενες συνθήκες γίνεται για  $t_{T2}=792h$



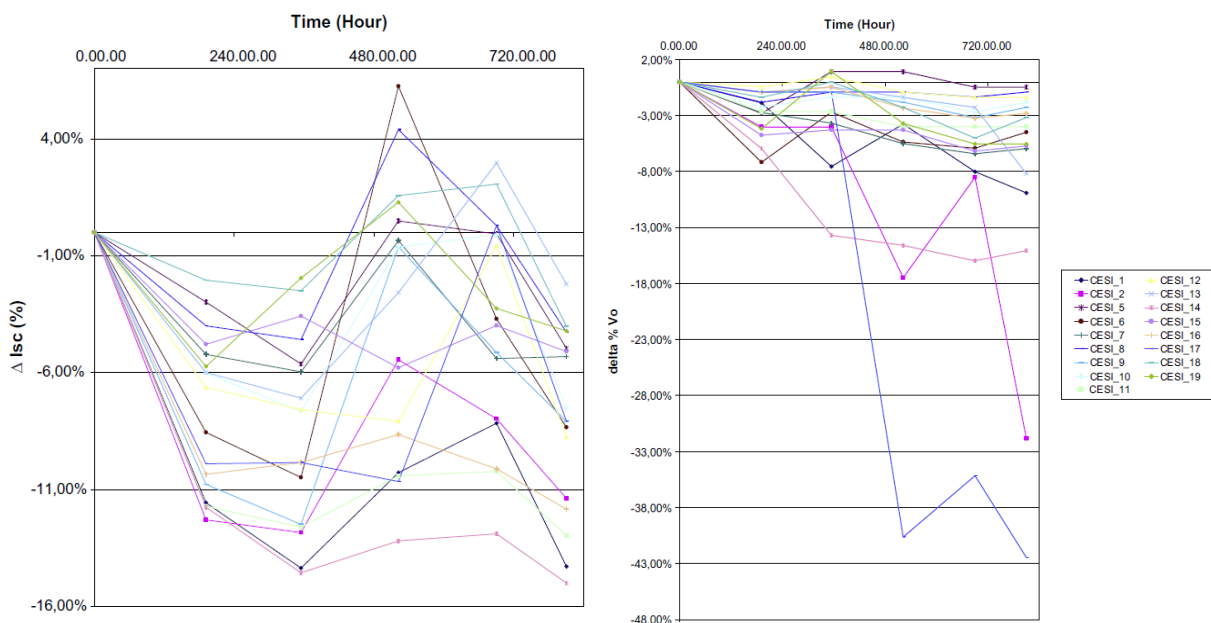
Τα κελιά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τριπλής επικάλυψης INGaP/InGaAs/Ge, έχουν διαστάσεις 2,05\*2,05mm<sup>2</sup>, πάχος 0,15nm και η ενεργή περιοχή του κελιού είναι 2,63mm<sup>2</sup>. Ο λόγος συγκέντρωσης είναι 500X και φασματική κατανομή AM1,5D (air mass 1.5direct). Στο διπλανό διάγραμμα φαίνονται τα χαρακτηριστικά του κελιού.

Διάγραμμα 29

Οι επιταχυνόμενες αυτές συνθήκες επετεύχθησαν σε μία κλιματική κάμερα που ζεσταίνει τους συλλέκτες στους 140°C.

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε πως μετά από 792h (δηλ. 20 χρόνια) 16 από τα 19 κελιά παρουσίαζαν μία μείωση στην τάση τους 3% με 10%, ενώ τα υπόλοιπα εμφάνιζαν μεγαλύτερη υποβάθμιση.

Μετά το ίδιο χρονικό διάστημα το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{SC}$ ) παρουσίασε υποβάθμιση μεταξύ 2% και 10%.



Διάγραμμα 30

### 3.1.6 Οπτική συμπεριφορά στο θερμοδυναμικό όριο με ειδικά φτιαγμένο σχεδιασμό ειδώλου

Συγκεντρωτές ικανοί να φτάσουν το θερμοδυναμικό όριο στη μεταφορά ακτινοβολίας έχουν κατά γενικό κανόνα θεωρηθεί ότι ανήκουν στη περιοχή των οπτικών διατάξεων χωρίς είδωλο. Προκύπτει όμως ότι ένας απλός συγκεντρωτής με είδωλο μπορεί να αντιληφθεί επίπεδα ροής πολύ παραπάνω ακόμα και από τους καλύτερους σχεδιασμούς για χωρίς είδωλο.

Στη συγκεκριμένη δημοσίευση μελετάται δύο βαθμίδων κάτοπτρο, στο οποίο η κάθε επιφάνεια είναι προσαρμοσμένη ώστε να εξαλείφει πρώτης τάξης αποκλίσεις, το επονομαζόμενο μη πλανητικό σύστημα. Το κίνητρο της δημοσίευσης για σχεδιασμό με είδωλο, είναι η ταυτόχρονη ικανοποίηση για α) υπερσυμπαγείς συγκεντρωτές, β) μέγιστη συγκέντρωση για μέγιστο βαθμό συγκέντρωσης, γ) την ύπαρξη ευμεγέθους κενού μεταξύ του συλλέκτη και του καθρέπτη, δ) αυξανόμενη επιφάνεια συλλέκτη, ε) αμελητέες χρωματικές αποκλίσεις. Σχεδιασμοί χωρίς είδωλο δεν είναι συμπαγείς και δεν παρέχουν μεγάλο κενό για το συλλέκτη. Κοινοί παραβολικοί και Cassegrain σχεδιασμοί παρέχουν μερικούς αλλά όχι όλους αυτούς τους στόχους. Για παράδειγμα συστήματα με μεγάλο f-number (FN) έχουν μικρές αποκλίσεις αλλά απαιτούν μεγάλο aspect ratio (AR) και παράγουν μικρή ροή. Μολονότι το να είναι συμπαγής και να έχει μεγάλη ροή η διάταξη μπορεί να επιτευχθεί με cassegrain, έχουν υπερβολική σκίαση. (Gordon & Feuermann, 2005)

Το FN είναι το πηλίκο της απόστασης εστίασης προς τη διάμετρο εισόδου της ροής.

$$FN = \frac{f}{D} = \frac{1}{2 \times \tan \theta}$$

Το AR είναι το πηλίκο της απόστασης μεταξύ του επιπέδου της κορυφής του πρωτεύοντος και του επιπέδου του χείλους οποιουδήποτε από του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος είναι ψιλότερα, προς τη διάμετρο του πρωτεύοντος.

Η δημοσίευση περιορίζεται σε μακρινού πεδίου πηγή. Στο διπλανό σχήμα φαίνεται ένας αξονοσυμμετρικός καθρέφτης ειδώλου (axisymmetric imaging mirror) για συγκέντρωση ομοιόμορφης ακτινοβολίας, με αριθμητικό άνοιγμα (numerical aperture)  $NA_1$ , πάνω σε επίπεδο συλλέκτη με  $NA_2$ .

Το θερμοδυναμικό όριο είναι για τη συγκέντρωση:

$$C_{\max} = (NA_2 / NA_1)^2$$

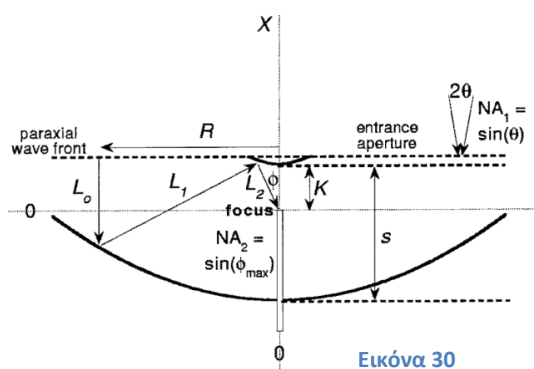
Και η διάμετρος του απορροφητή δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από:

$$d_{\min} = D(NA_1 / NA_2)$$

Όπου D είναι η διάμετρος του πρωτεύοντος κατόπτρου.

Το NA κανονικά είναι  $NA = n \cdot \sin(\theta)$ , όπου το n είναι ο δείκτης διάθλασης (εδώ λαμβάνεται  $n=1$  γιατί έχουμε αέρα) και  $\theta$  είναι το μισό της μέγιστης γωνίας του φωτός που μπορεί να εισέλθει ή να βγει από ένα φακό-συγκεντρωτή.

Ακόμα θα πρέπει να ισχύουν:





$$L_0 + L_1 + L_2 = \text{constant} \quad \text{και} \quad R = (\text{constant}') \sin(\varphi)$$

Για τη διάταξη του σχήματος οι πολικές συντεταγμένες είναι για το πρωτεύον κάτοπτρο:

$$R_p = \frac{2T}{1+T^2}$$

$$X_p = s - \frac{1}{1+T^2} + \frac{[s - (1-s)T^2][1 - Kg(T)]}{s(1+T^2)^2}$$

Και για το δευτερεύον κάτοπτρο είναι:

$$R_s = \frac{2sKTg(T)}{s - (1-s)T^2 + KT^2g(T)}$$

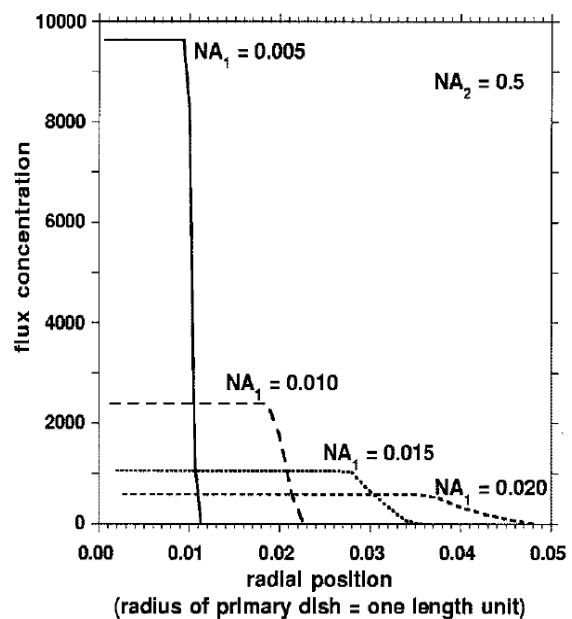
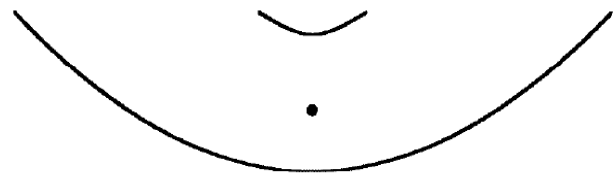
$$X_s = -\frac{sK(1-T^2)g(T)}{s - (1-s)T^2 + KT^2g(T)}$$

Όπου  $T = \tan(\varphi/2)$  και  $g(T) = \left[1 - \frac{(1-s)T^2}{s}\right]^{-\frac{s}{1-s}}$

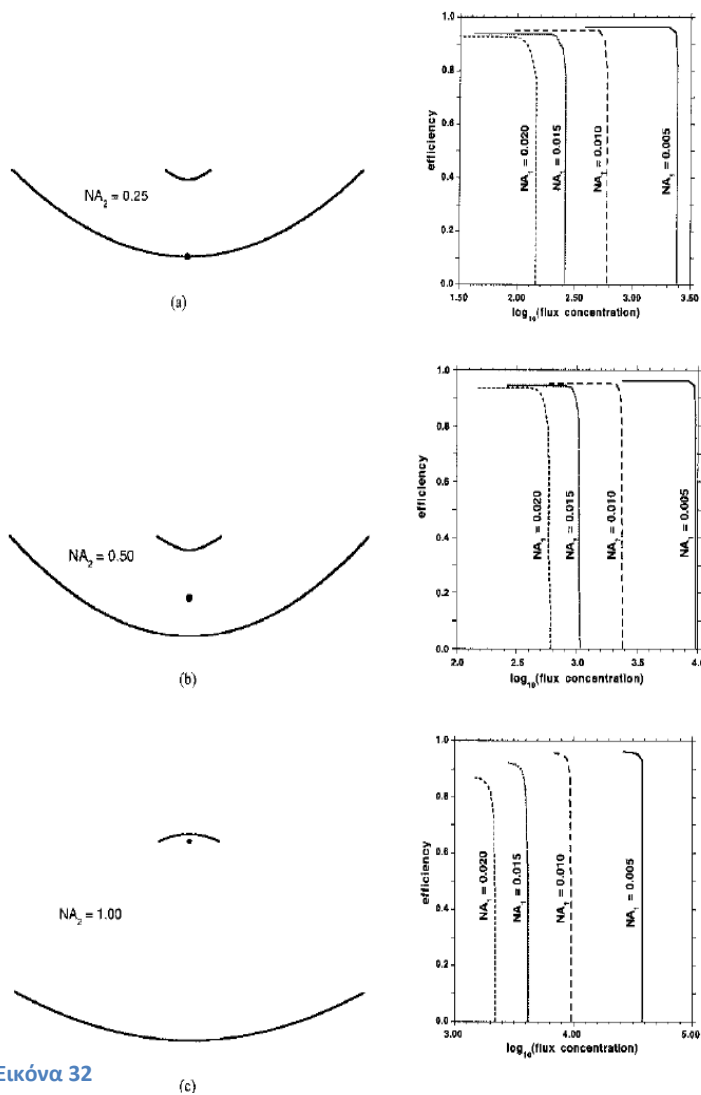
Οι εξισώσεις αυτές δίνουν τη λύση στη μία πλευρά του άξονα συμμετρίας. Για την άλλη προφανώς ισχύουν τα ίδια.

Στη συνέχεια διαπιστώθηκε η οπτική συμπεριφορά με εξομοίωση, όπου διανεμήθηκαν 250.000 ακτίνες. Στη διπλανή εικόνα το  $NA_2$  είναι 0,5 και δίνονται τιμές για διάφορα  $NA_1$ . Στον οριζόντιο άξονα έχουμε την ακτινική θέση, όπου η ακτίνα του πρωτεύοντος πιάτου λαμβάνεται σαν μονάδα μήκους.

Παρακάτω παρουσιάζονται και άλλα διαγράμματα, όπου φαίνεται και ο γεωμετρικός βαθμός απόδοσης με βάση τη συγκέντρωση. Φαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης είναι κάτω της μονάδας, ακόμα και για μικρή συγκέντρωση, εξαιτίας της απόρριψης ακτίνων και της σκίασης. Απορρόφηση στους καθρέπτες δεν έχει ληφθεί υπόψη αλλά υπολογίζεται εύκολα σαν  $1-\rho^2$  ( $\rho$  είναι η αντανάκλαστικότητα), καθώς κάθε ακτίνα υπόκειται σε δύο αντανάκλασεις. Οι αντανάκλασεις Fresnel από τον απορροφητή δεν λαμβάνονται υπόψη καθώς εξαρτώνται από το υλικό και προσδιορίζονται εύκολα.



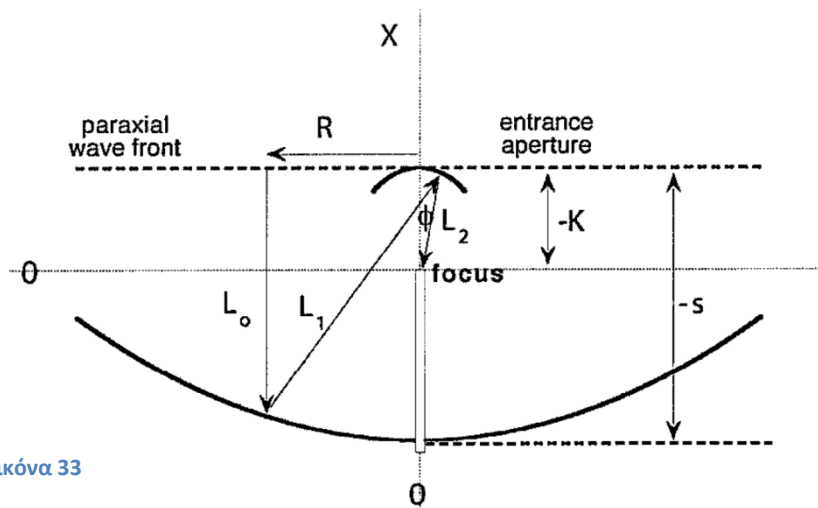
Εικόνα 31



Εικόνα 32

μεγαλύτερα  $NA_1$  αλλά με μεγαλύτερη σκίαση.

Στην περίπτωση της διάταξης που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, χρησιμοποιούνται οι προαναφερθείσες σχέσεις αλλά με αρνητικό πρόσημο για τις γεωμετρικές παραμέτρους. (Luque & Andreev)



Εικόνα 33

Με σχεδιασμό όπου  $NA_2=0,5$  επιτυγχάνεται τόσο το να είναι υπερσυμπαγείς οι συγκεντρωτές με  $AR=1/4$  όσο και το να είναι τα ανώτερα σημεία των δύο καθρεπτών στο ίδιο επίπεδο (coplanarity of the rims). Το τελευταίο είναι απαραίτητο για χαμηλό κόστος και μεγάλη παραγωγή. Όμως ο σχεδιασμός αυτός απαιτεί να έχει το σημείο εστίασης πάνω από την κορυφή του πρωτεύοντος.

Η οπτική συμπεριφορά των συγκεντρωτών με είδωλο χειροτερεύει, καθώς το  $NA_1$  μεγαλώνει και εμφανίζονται μεγαλύτερης τάξης αποκλίσεις. Η ευαισθησία στο  $NA_2$  και στο να είναι συμπαγές είναι ανεπαίσθητη. Καθώς το  $NA_2$  αυξάνεται, γίνεται πολύ δύσκολο το να αντιληφθούμε συμπαγείς διατάξεις, χωρίς να έχουν μεγάλη σκίαση και απόρριψη ακτινών. Βαθύτεροι συγκεντρωτές τείνουν να είναι πιο ανεκτικοί σε

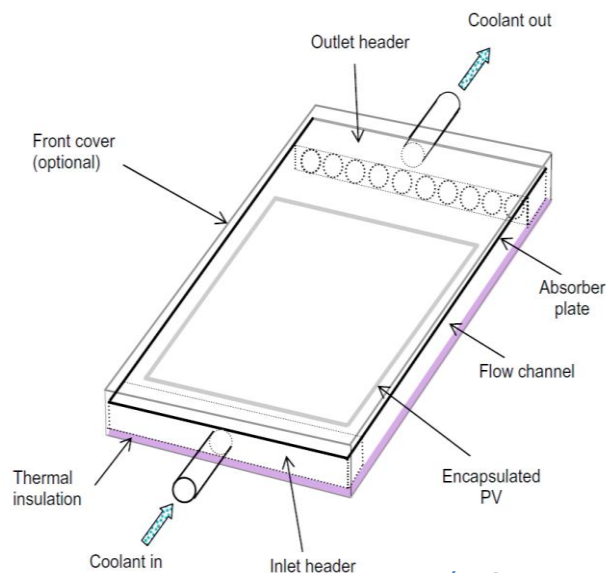


### 3.1.7 Μια επισκόπηση σε φωτοβολταϊκά/θερμικά υβριδικής ηλιακής τεχνολογίας

Αυτή η δημοσίευση είναι μία επισκόπηση της εξέλιξης της τεχνολογίας, ειδικότερα της προόδου τα τελευταία χρόνια και των αναγκών του μέλλοντος.

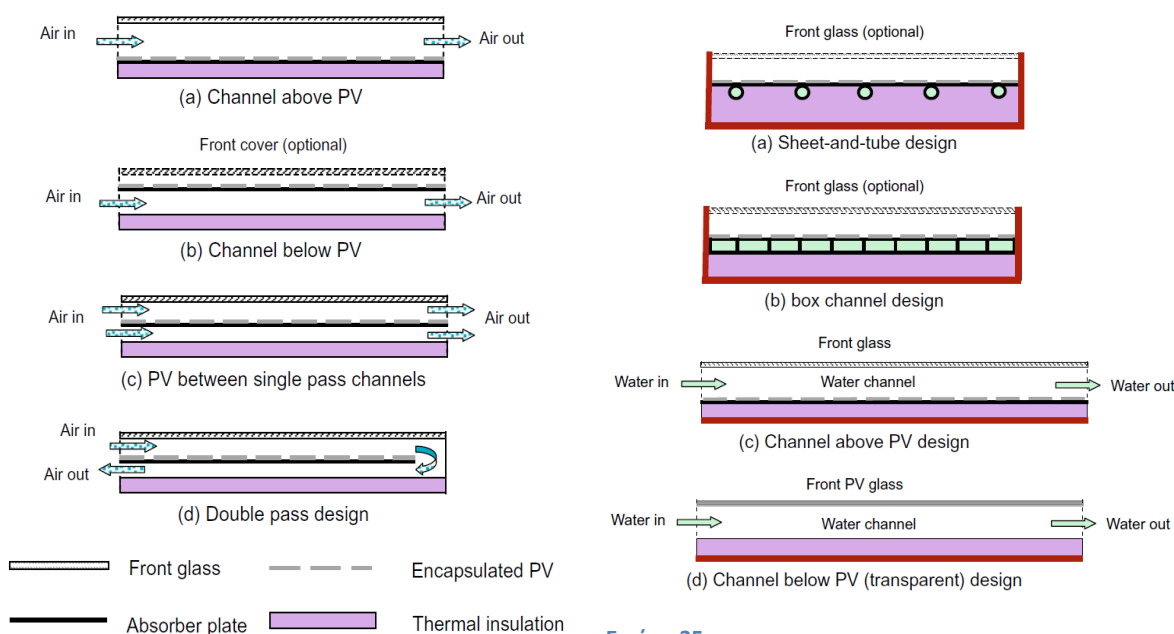
Ένα φωτοβολταϊκό/θερμικό υβριδικό ηλιακό σύστημα (PVT) είναι ένας συνδυασμός φωτοβολταϊκού και ηλιακών θερμικών στοιχείων/συστημάτων που παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα από ένα ενσωματωμένο στοιχείο ή σύστημα. Με άλλα λόγια το PV χρησιμεύει σαν μέρος του θερμικού συλλέκτη. Μπορούν να γίνουν διάφορες επιλογές, όπως συλλέκτες αέρα, νερού, ατμού, PV από μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, άμορφο πυρίτιο (c-Si/pc-Si/a-Si) ή και thin-film, επίπεδοι ή συγκεντρωτικοί συλλέκτες, πάνελ με γυαλί ή χωρίς, και άλλα. (Chow, 2009)

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός επίπεδου PVT συλλέκτη φαίνονται στη διπλανή εικόνα.



Εικόνα 34

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται διάφοροι σχεδιασμοί για την απαγωγή της θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πάνελ, τόσο με αέρα (αριστερά) όσο και με υγρό (δεξιά).



Εικόνα 35

Γνωρίζουμε ότι φωτόνια μέχρι ένα μήκος κύματος μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρισμό από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, συγκεκριμένα εκείνα των οποίων η ενέργεια ξεπερνά το ενεργειακό χάσμα. Φωτόνια με μεγαλύτερο μήκος κύματος χαραμίζουν την ενέργειά τους σαν θερμότητα στο φωτοβολταϊκό. Μία κοινή διάταξη φωτοβολταϊκού μετατρέπει το 4-17% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα ποσοστό πάνω από το 50% της

προσπίπτουσας ακτινοβολίας να μετατρέπεται σε θερμότητα και να φτάνει η θερμοκρασία του κελιού 50<sup>0</sup>C πάνω από τη αυτή του περιβάλλοντος. Μπορεί να υπάρχουν λοιπόν δύο ανεπιθύμητες συνέπειες:

- Μείωση του βαθμού απόδοσης του κελιού 0,4% για κάθε βαθμό <sup>0</sup>C
- Μόνιμη δομική βλάβη στη διάταξη των φωτοβολταϊκών, αν η θερμική επιβάρυνση ασκείται για παρατεταμένη χρονική περίοδο

Ψύχοντας λοιπόν τα κελιά του φωτοβολταϊκού ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μπορεί να βελτιωθεί. Ακόμα η καλύτερη διάταξη είναι αυτή που χρησιμοποιεί τη θερμότητα του ψυκτικού υγρού, πετυχαίνοντας έτσι μεγαλύτερο συνολικό βαθμό απόδοσης ανά μονάδα εμβαδού του πάνελ.

Η ανάπτυξη των συστημάτων PVT την τελευταία εικοσαετία οφείλεται στην επιδείνωση του περιβάλλοντος και στο ενδιαφέρον κατασκευαστικών εταιριών για επιλογές ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών σε κτίρια (building-integrated-photovoltaic BiPV). Τα PVT παρέχουν καλύτερη αισθητική ομοιομορφία από δύο ξεχωριστούς συλλέκτες για φωτοβολταϊκά και ηλιακή θερμότητα.

### Αποτίμηση επίδοσης

Ο υπολογισμός του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης του PVT είναι εύκολος καθώς η χρήση του ηλεκτρισμού είναι άμεση και η παροχή αποθήκευσης αυτού είναι προαιρετική. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης όμως είναι πιο δύσκολο να υπολογιστεί, καθώς το θερμικό σύστημα αποτελείται από πολλά υποσυστήματα όπως: μονάδα αποθήκευσης θερμότητας, εφεδρική θέρμανση, αγωγούς του ψυκτικού υγρού, αντλίες και άλλα.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C(T_{out} - T_{in})}{GA}$$

$$\eta_e = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{GA}$$

Όπου  $\dot{m}$  :παροχή μάζας

C:ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού υγρού

A:εμβαδό συλλέκτη (ΦΒ πάνελ)

T<sub>in</sub> και T<sub>out</sub>: θερμοκρασία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του ψυκτικού στον εναλλάκτη

G: προσπίπτουσα ακτινοβολία

V<sub>mpp</sub> και I<sub>mpp</sub>: τάση και ρεύμα αντίστοιχα στο σημείο ισχύος αιχμής

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του ΦΒ πάνελ σχετίζεται με το βαθμό απόδοσης του ΦΒ κελιού σύμφωνα με τον τύπο:

$$\eta_e = \frac{A_{cell} \eta_{cell}}{A} = \beta \eta_{cell}$$

Όπου  $\beta$  είναι ο παράγοντας κάλυψης (packing factor). Υφίσταται αδυναμία όσον αφορά την πλήρη κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του ΦΒ πάνελ από την επιφάνεια των ΦΒ στοιχείων, αφού η πραγματική επιφάνεια των ΦΒ στοιχείων που αποτελούν το πάνελ είναι μικρότερη από την επιφάνεια του πάνελ. Έτσι ο παράγοντας κάλυψης  $\beta$  (packing factor) ορίζεται ως εξής:

$$\beta = \frac{A_{cell}}{A}$$

Όπου  $A_{cell}$ : το συνολικό εμβαδό των ΦΒ στοιχείων

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της μειούμενης θερμοκρασίας, η οποία ορίζεται ως:

$$T^* = \frac{T_{in} - T_a}{G}$$

Όπου  $T_a$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Έτσι λοιπόν

$$\eta_{th} = F_R \left[ (\tau\alpha)_e (1 - \eta_e) - U_L \left( \frac{T_{in} - T_a}{G} \right) \right]$$

$$\eta_{th} = F' \left[ (\tau\alpha)_e (1 - \eta_e) - U_L \left( \frac{T_m - T_a}{G} \right) \right]$$

Όπου  $F_R$ : παράγων θερμικής απολαβής του συλλέκτη

$U_L$ : συντελεστής θερμικών απωλειών

$(\tau\alpha)_e$ : προσυζητημένο γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας

$T_m$ : μέση θερμοκρασία του ρευστού

$F'$ : παράγων απόδοσης του συλλέκτη

Ακόμα αν υποθέτουμε προσεγγιστικά σταθερά τα γινόμενα  $F_R(\tau\alpha)_e$  και  $F_R U_L$ , τότε ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι γραμμική συνάρτηση της μεταβλητής  $T^*$  με κλίση  $-F_R U_L$  και τομή με τον άξονα των τεταγμένων στη θέση  $F_R(\tau\alpha)_e$  (Αντωνόπουλος, 2004).

$$\eta_t = \eta_{to} - aT^*$$

με  $\eta_{to} \rightarrow F_R(\tau\alpha)_e$  και  $a \rightarrow -F_R U_L$

Όσον αφορά τον ολικό βαθμό απόδοσης κάποιοι ερευνητές τον υπολογίζουν σαν καθαρό άθροισμα του ηλεκτρικού και του θερμικού.

$$\eta_o = \eta_t + \eta_e$$

Άλλοι ερευνητές πιστεύουν ότι ο ηλεκτρισμός είναι ανώτερης τάξης μορφή, αφού μετατρέπεται από θερμική ενέργεια. Έτσι ο βαθμός απόδοσης εξοικονόμησης ενέργειας είναι:

$$\eta_{saving} = \frac{\eta_e}{\eta_{power}} + \eta_t$$

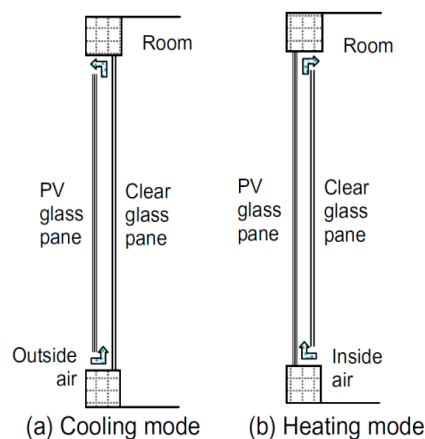
με  $\eta_{power}$  τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης από συμβατικές διατάξεις.

## Αξιοποίηση των επίπεδων συλλεκτών PVT

### *Ψύξη του συλλέκτη με αέρα*

Η ψύξη με αέρα αποτελεί έναν απλό και οικονομικό σχεδιασμό για να ψύχονται τα φωτοβολταϊκά. Ο αέρας μπορεί να θερμαίνεται σε διάφορες θερμοκρασίες μέσω εξαναγκασμένης ή φυσικής ροής. Η εξαναγκασμένη ροή είναι πιο αποδοτική από τη φυσική, αλλά οι ανεμιστήρες μειώνουν το ηλεκτρικό κέρδος, αφού ανήκουν στις ιδιοκαταναλώσεις. Στη συγκεκριμένη δημοσίευση επικαλούνται άλλες δημοσιεύσεις, όπως μία του πανεπιστημίου Πατρών, στην οποία αναφέρεται ότι το επιπλέον κόστος παραγωγής είναι 5% για PVT/a (με αέρα) και 8% επιπλέον για PVT/w(με υγρό), έναντι των απλών PV. Ακόμα σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε 38,2<sup>0</sup>N προέκυψε θερμικός βαθμός απόδοσης με εύρος 38%-75% για PVT/a και 55%-80% για PVT/w.

Μία εφαρμογή είναι τα BiPVT/a (building integrated photovoltaic) που είναι φωτοβολταϊκά στοιχεία που ενσωματώνονται σε κτίρια. Το κύριο πρόβλημα στην ανάλυση των BiPVT/a είναι η εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς. Εφόσον εκτιμηθούν η θερμική συμπεριφορά και η κατάσταση σκίασης του ηλίου, η ηλεκτρική συμπεριφορά μπορεί εύκολα να καθοριστεί. Μία διάταξη BiPVT/a φαίνεται στο διπλανό σχήμα.



Εικόνα 36

### *Ψύξη του συλλέκτη με υγρό*

Στη συγκεκριμένη δημοσίευση αναφέρεται μία σειρά δημοσιεύσεων με καινοτομίες για τη βελτίωση των PVT/w και τα αποτελέσματά τους.

Καθώς μεταλλικά ελάσματα και μεταλλικοί αγωγοί υιοθετήθηκαν για χρήση σε επίπεδους συλλέκτες, η χρήση συμπολυμερών υλικών εξετάστηκε εκτενώς. Αυτή η εναλλακτική προσφέρει α) μείωση του βάρους που οδηγεί σε χρήση λιγότερων υλικών και ευκολότερη εγκατάσταση, β) η διαδικασία κατασκευής είναι ευκολότερη, καθώς χρησιμοποιούνται λιγότερα συστατικά, γ) η επένδυση μπορεί να είναι φθηνότερη, καθώς χρησιμοποιούνται λιγότερα υλικά.

Όπως και στην περίπτωση της ψύξης με αέρα, έτσι και σε αυτήν με υγρό μία εφαρμογή είναι τα BiPV/w.

## Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Με τη χρήση συγκεντρωτών, δηλαδή έχοντας σύστημα CPVT, έχουμε τη δυνατότητα να αυξήσουμε την πυκνότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στα ηλιακά κελιά, σε αντίθεση με διατάξεις επίπεδου συλλέκτη. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί το κόστος που αφορά τα ηλιακά κελιά και να χρησιμοποιηθούν κελιά με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Επιπρόσθετο κόστος μπορεί να υπάρξει με τη χρήση συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Η απόδοση του ηλιακού στοιχείου μειώνεται, όταν υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας πάνω σε αυτό. Ακόμα με σύνδεση των ηλιακών στοιχείων σε σειρά, αυξάνεται η τάση στην έξοδο και μειώνεται το ρεύμα. Όμως το ηλιακό στοιχείο που υπόκειται στη μέγιστη θερμοκρασία, θα περιορίσει την απόδοση του συνόλου των στοιχείων. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό σαν (current matching problem). Άρα θα πρέπει το κύκλωμα του ψυκτικού υγρού να

σχεδιαστεί έτσι ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου ομοιόμορφη και σε χαμηλά επίπεδα, ο σχεδιασμός του να είναι απλός και αξιόπιστος και να διατηρεί την παρασιτική ισχύ σε χαμηλά επίπεδα.

Για υψηλές συγκεντρώσεις απαιτούνται περισσότερα υλικά για τους συγκεντρωτές ανά μονάδα κελιού/απορροφητή. Έτσι σε αυτήν την περίπτωση η χρήση φακών είναι καταλληλότερη από τη χρήση ανακλαστών, εξαιτίας του μικρότερου βάρους τους και του μικρότερου κόστους υλικών. Παρόλα αυτά συγκεντρωτικά συστήματα που χρησιμοποιούν φακούς δεν είναι σε θέση να συγκεντρώσουν τη διάχυτη ακτινοβολία, γι' αυτό και η χρήση τους περιορίζεται σε μέρη με καθαρή ατμόσφαιρα.

Από την άλλη μεριά η χρήση υγρού ως ψυκτικό μέσο από τη χρήση αέρα είναι πιο αποτελεσματική για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύς εξόδου. Γι' αυτό το λόγο τα CPVT είναι συνήθη για συστήματα μέσης και υψηλής θερμοκρασίας ζεστού νερού που εφαρμόζονται για ψύξη, αφαλάτωση και βιομηχανικές εφαρμογές. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, μπορεί οι επίπεδοι συλλέκτες να έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, όταν και οι δύο κοιτούν απευθείας στον ήλιο. Αυτή η διαφορά όμως μειώνεται, όταν η θερμοκρασία λειτουργίας αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι για υψηλότερες θερμοκρασίες, η μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια του επίπεδου συλλέκτη έχει μεγαλύτερες θερμικές απώλειες.

Ακόμα τα CPVT αναφέρονται και σαν combined heat and solar (CHAPS) collector system.

Μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί αν τοποθετήσουμε λεπτά ελάσματα (foil) αλουμινίου πάνω σε υπόστρωμα χάλυβα. Με αυτόν τον τρόπο ωφελούμαστε και από τις καλές μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα αλλά και από την υψηλή ανάκλαση του ηλίου από το αλουμίνιο.

### **Πολυποίκιλες εξελίξεις**

#### *Βελτίωση απορρόφησης φωτονίων μεγάλου μήκους*

Καθώς ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος με φωτόνια που έχουν ενέργεια μικρότερης αυτής του ενεργειακού χάσματος απορροφάται πολύ δύσκολα, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα ηλιακά στοιχεία είναι σημαντικά μικρότερη από ένα μαύρο συλλέκτη (με απορροφητικότητα 0,95). Ο Santbergen έχει προτείνει δύο μεθόδους για την αύξηση της απορρόφησης της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους. α) τη χρήση ημιδιαφανών ηλιακών στοιχείων, τα οποία θα ακολουθούνται από έναν δεύτερο απορροφητή β) την αύξηση του ποσού της ακτινοβολίας που απορροφάται από την πίσω επαφή του ηλιακού στοιχείου. Ανάλυση που έγινε έδειξε ότι η πρώτη και η δεύτερη μέθοδος είναι σε θέση να απορροφήσουν 0,87 και 0,85 αντίστοιχα.

#### *Εφαρμογές*

Ψύκτες βρομιούχου καλίου με νερό είναι από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες στον τομέα της ψύξης με απορροφητικές μηχανές. Ο Mittelman μελέτησε την εφαρμογή ενός CPVT σε ψύκτη με μονοβάθμια απορρόφηση. Το PV που χρησιμοποίησε είναι τριπλής επίστρωσης. Ακόμα μελέτησε την εφαρμογή του CPVT για αφαλάτωση. Και οι δύο εφαρμογές αναλύονται περαιτέρω παρακάτω.

Η ηλιακή απόσταξη υφάλμυρου νερού είναι μία άλλη καλή επιλογή για να αποκτήσουμε καθαρό νερό, λαμβάνοντας υπόψη την απλή της τεχνολογία και τη χαμηλή ενέργεια που χρειάζεται.

#### Αγορά

Η σημερινή αγορά τόσο των ηλιακών θερμικών όσο και των φωτοβολταϊκών αυξάνεται ταχύτατα, ωφελούμενη από την κυβερνητική πολιτική και την επίγνωση του πλήθους. Τα PVT έχουν τη δυνατότητα να γνωρίσουν την ίδια αύξηση και στο μέλλον, καθώς και η αγορά τους αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από αυτήν των ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Σύμφωνα με το σχεδιασμό της ευρωπαϊκής ένωσης το μεγαλύτερο ποσοστό της αγοράς των PVT ανήκει στον οικιακό τομέα (το 90% της τωρινής αγοράς είναι ο οικιακός τομέας). Για το άμεσο μέλλον πιθανές αγορές είναι η θέρμανση χώρου, θέρμανση πισίνας, αυτόνομες εφαρμογές. Η διάταξη CPVT θα έχει εφαρμογές και σε εμπορικό, βιομηχανικό και αγροτικό επίπεδο. Τα CPVT θα γίνουν ένα σημαντικό κομμάτι της αγοράς, όταν το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου γίνει οικονομικά βιώσιμο. Καινούριες μέθοδοι θα εφαρμοστούν για να κάνουν τα φωτοβολταϊκά ένα αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού ενός κτιρίου. Σε βάθος χρόνου η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών θα χρησιμοποιείται και για ψύξη. Οι αγοραστές των PVT μπορεί να είναι ιδιοκτήτες μονοκατοικιών, για μικρής κλίμακας χρήση, και αργότερα μεγαλύτερης κλίμακας όπως πολυκατοικιών, αθλητικών κέντρων, νοσοκομείων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

### 3.1.8 Θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών διατάξεων: Επισκόπηση σχετικών σχέσεων

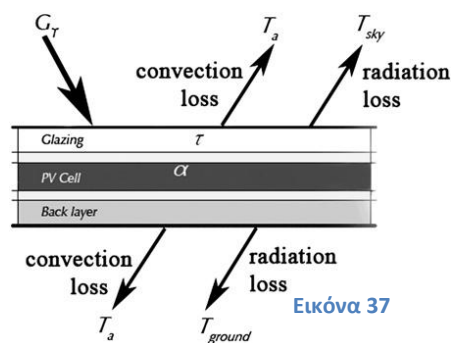
Η δημοσίευση αυτή πραγματεύεται τη σημασία της θερμοκρασίας λειτουργίας ηλιακού κελιού/διάταξης για την ηλεκτρική συμπεριφορά φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Δίδονται πίνακες με ρητές και πεπλεγμένες συναρτήσεις. (Skoplaki & Palyvos, 2008)

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές σχέσεις που εκφράζουν τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού ( $T_c$ ) συναρτήσει των μεταβλητών του καιρού. Δηλαδή πιο συγκεκριμένα, συναρτήσει:

- της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_a$ )
- της ταχύτητας του αέρα
- της στιγμιαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο ( $G_T$ )

Αυτές οι σχέσεις έχουν σαν παραμέτρους ιδιότητες των υλικών και του συστήματος (σχεδιασμός διάταξης), όπως τη διαπερατότητα του καλύμματος ( $\tau$ ), την απορροφητικότητα του απορροφητήρα του συλλέκτη ( $\alpha$ ) και άλλες.

Στο διπλανό σχήμα φαίνονται οι ανταλλαγές της θερμικής ενέργειας μεταξύ του περιβάλλοντος και της διάταξης του PV.



Έχει διαπιστωθεί ότι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού είναι ευαίσθητη στην ταχύτητα του ανέμου και όχι τόσο στην κατεύθυνση του ανέμου. Ακόμα, πρακτικά δεν είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Από την άλλη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

### Πεπλεγμένες συναρτήσεις

Για τον υπολογισμό της  $T_c$  πρέπει να ληφθούν υπόψη, εκτός από τις εσωτερικές διεργασίες που λαμβάνουν μέρος στο εσωτερικό των ημιαγωγικών υλικών εξαιτίας του βομβαρδισμού των φωτονίων, μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας, όπως συναγωγή, αγωγή και ακτινοβολία.

Η κατάσταση ενεργειακής ισορροπίας, μέσω της οποίας οδηγούμαστε στον υπολογισμό της  $T_c$ , απαιτεί το να γνωρίζουμε: α) φυσικές και θερμικές ιδιότητες της PV διάταξης β) την ηλιακή ακτινοβολία και τα καιρικά δεδομένα γ) το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του αέρα. Το τελευταίο είναι δύσκολο να το υπολογίσουμε.

Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού ίσως είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του πίσω μέρους της διάταξης ( $T_b$ ) κατά μερικούς βαθμούς και εξαρτάται από τα υλικά της διάταξης και την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Μια απλή έκφραση που σχετίζει τις δύο αυτές θερμοκρασίες είναι:

$$T_c = T_b + \frac{G_T}{G_{ref}} \Delta T$$

Όπου  $G_{ref}$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς  $1000\text{W/m}^2$  και  $\Delta T$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας ( $T_c - T_b$ ) σε αυτήν την αναφορική ακτινοβολία.

Μία εξακριβωμένη διαδικασία για να διατυπωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού  $T_c$ , προϋποθέτει τη χρήση της θερμοκρασίας ενός κανονικά λειτουργούντος ηλιακού στοιχείου (NOCT) (Nominal Operating Cell Temperature). Η NOCT ορίζεται ως η θερμοκρασία μίας συσκευής σε κανονικό περιβάλλον (NTE) (Nominal Terrestrial Environment). Όταν ένα ηλιακό στοιχείο λειτουργεί σε NTE, λειτουργεί κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία  $800\text{W/m}^2$ , θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20^\circ\text{C}$ , μέση ταχύτητα ανέμου  $1\text{m/s}$  και είναι ανοικτού κυκλώματος. Ισχύει λοιπόν:

$$NOCT = (T_c - T_a)_{NTE} + 20^\circ\text{C}$$

Η σχετική μέθοδος η οποία θεωρεί ότι και οι δύο πλευρές δέχονται την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος, βασίζεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασιακή διαφορά  $T_c - T_a$  είναι πρακτικά ανεξάρτητη από την  $T_a$  αλλά σχετίζεται γραμμικά με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Ακόμα κάνει την προσέγγιση ότι ο συντελεστής των συνολικών απωλειών του συλλέκτη ( $U_L$ ) είναι σταθερός.

Το ενεργειακό ισοζύγιο είναι:

$$(\tau\alpha)G_T = \eta_c G_T + U_L(T_c - T_a)$$

Αν το ενεργειακό ισοζύγιο γραφτεί για NOCT συνθήκες, τότε η προκύπτουσα εξίσωση σε συνδυασμό με το ενεργειακό ισοζύγιο δίνει την ακόλουθη σχέση:

$$T_c = T_a + \left( \frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) \left( \frac{U_{L,NOCT}}{U_L} \right) (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[ 1 - \left( \frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right) \right]$$

Στο τέλος παρατίθεται πίνακας με πεπλεγμένες συναρτήσεις για τον υπολογισμό της  $T_c$ .

### Ρητές συναρτήσεις

Η πιο απλή ρητή εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας του PV ( $T_c$ ) συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι:

$$T_c = T_a + kG_T$$

Όπου  $k$  είναι ο συντελεστής Ross με  $k = \frac{\Delta(T_c - T_a)}{\Delta G_T}$

Η ΙΕΑ κατηγοριοποίησε το συντελεστή  $k$  με βάση το βαθμό ενσωμάτωσης και το κενό αέρα, αν υπάρχει πίσω από τη διάταξη. Έδωσε ακόμα το διπλανό πίνακα με τιμές του  $k$ .

PV array type	$k$ ( $\text{Km}^2/\text{W}$ )
Well cooled	0.02
Free standing	0.0208
Flat on roof	0.026
Not so well cooled	0.0342
Transparent PV	0.0455
Façade integrated	0.0538
On sloped roof	0.0563

Άλλη μία ρητή συνάρτηση προκύπτει με απλοποίηση προηγούμενης σχέσης. Αν θεωρηθεί το  $U_L$  σταθερό και καθώς ο λόγος ( $\eta_c/\tau_a$ ) είναι πολύ μικρός σε σχέση με τη μονάδα, έχουμε:

$$T_c = T_a + \left( \frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) (T_{NOCT} - T_{a,NOCT})$$

Στο τέλος παρατίθεται πίνακας με ρητές συναρτήσεις για τον υπολογισμό της  $T_c$ .

### Συμπεράσματα

Μία σημαντική μεταβλητή για τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του PV κελιού/διάταξης. Οι πολυάριθμες σχέσεις για τον υπολογισμό της  $T_c$ , που παρουσιάζονται παρακάτω εφαρμόζονται σε απλής διάταξης PV, σε PV/thermal συλλέκτες και σε BIPV διατάξεις. Οι σχέσεις αυτές περιλαμβάνουν μεταβλητές του περιβάλλοντος και αριθμητικές παραμέτρους, οι οποίες είτε εξαρτώνται από το υλικό είτε όχι. Για αυτό πρέπει κάποιος να είναι προσεχτικός κατά την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης έκφρασης για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας του PV ( $T_c$ ), επειδή οι υπάρχουσες σχέσεις έχουν αναπτυχθεί για συγκεκριμένη γεωμετρία και επίπεδο ενσωμάτωσης στα κτίρια.



Ρητές συναρτήσεις

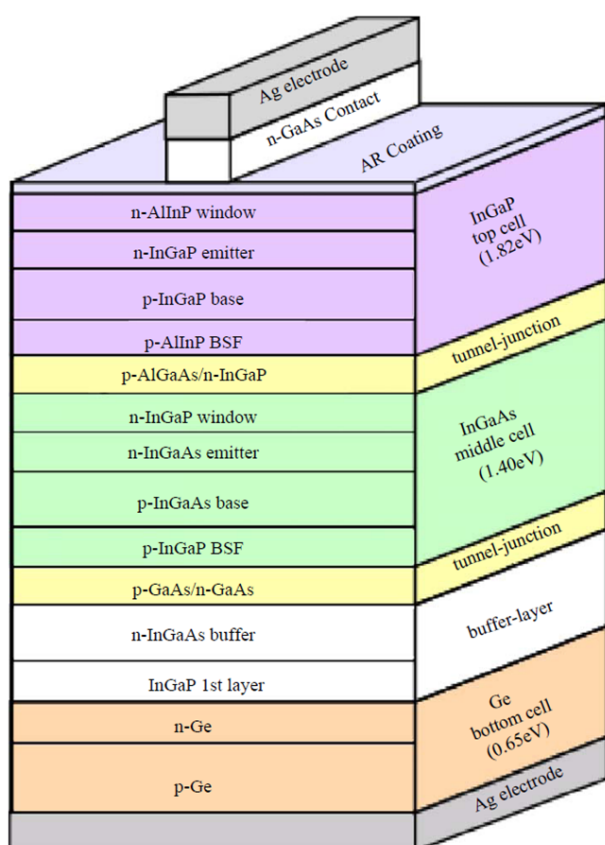
Correlation	Comments
$T_c = T_a + kG_T$	$k = \frac{\Delta T_c}{\Delta G_T}$ : 0.02–0.04 °Cm <sup>2</sup> /W <sup>2</sup> ; no load, no wind, $T$ in °C
Same as above	0.02 < $k$ < 0.056 for BIPV situations. Actual values depend on level of integration and (ventilation) gap size
Same as above	$k = 0.03, 0.012, 0.0058$ for conventional, and upper or lower module in packaged home system, respectively. $T$ in °C
$T_c = 3.12 + 0.025G_T + 0.899T_a - 1.30V_w$	18 kW DC output supplying a UPS
$T_c = 3.81 + 0.0282G_T + 1.31T_a - 1.65V_w$	104 kW array with MPPT
$T_c = \left[ \frac{(U_{in}/F_b) - (m_0/F_b)(T_a + T_{c0})}{2(m_0/F_b)} \right] \left[ (1 + Y)^{1/2} - 1 \right]$	Zero subscripts denote annual averages. $F_b$ packing factor; $m_0$ , a meteo parameter. $Y$ is similar to left bracket expression involving $G_T$ , $T_a$ and a modified reference efficiency. <sup>b</sup> $T_{c0}$ is an annual average $T_c$
$T_c = T_a + 0.028G_T - 1.0$	For 1.00 < $V_w$ < 1.5 m/s, 0 < $T_a$ < 35 °C
$T_c = T_a + 0.035G_T$	Typical free-standing earlier modules, $V_w \approx 1$ m/s
$T_c = T_a + \alpha G_T (1 + \beta T_a) (1 - \gamma V_w)$	Array $T$ , $\alpha = 0.0138$ , $\beta = 0.031$ , $\gamma = 0.042$ , $T$ in °C,
$T_c = \left[ \frac{\alpha_{cell} - \eta_{ref} (1 + \beta T_{ref})}{1 - \eta_{ref} \beta \left( \frac{G_T}{T} \right)} \right] \left( \frac{G_T}{T} \right)$	open-circuit version of Table 1 equation
$T_c = \left[ \frac{(c\tau_0) - \eta_{ref} (G_T + T_a [h_{ref} + 2\sigma\epsilon_c \tau_{nk} (1 + \cos \beta)] T_{sky} T_c^2 + h_{cb} + 4\sigma T_c^3 F_b F_b]}{h_{ref} + 2\sigma\epsilon_c \tau_{nk} \beta^2 (1 + \cos \beta) + h_{cb} + 4\sigma T_c^3 F_b F_b} \right]$	$\alpha_{cell}$ = fraction absorbed, 0.004 < $\beta$ < 0.006 °C <sup>-1</sup> , $h \sim 8.5 + 3.2V_{wind}$ , includes both radiation and convection
$T_c = T_a + 0.0155G_T + 0.7$	$h_{cb}$ , $F_e$ , and $F_b$ refer to the back side and are estimated via tabulated correlations <sup>c</sup>
$T_c = 30.006 + 0.0175(G_T - 300) + 1.14(T_a - 25)$	PV cells sealed in gas-filled glass tube-flasks; $T$ in °C
$T_c = T_a + \frac{G_T}{G_{T,ref}} [0.0712V_w^2 - 2.411V_w + 32.96]$	Module $T$ for pc-Si, $T$ in °C
$T_c = T_a + \frac{G_T}{G_{NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_a, NOCT) = T_a + \frac{G_T}{800} (NOCT - 20)$	c-Si in open rack mount, $T$ in °C; $V_w$ < 18 m/s
$T_c = T_a + (219 + 832\bar{K}_t) \frac{NOCT - 20}{800}$	NOCT: 800 W/m <sup>2</sup> , AM1.5, 20 °C, $v_w$ > 1 m/s, assumes constant $U_L$
$T_c = 30 + 0.0175(G_T - 150) + 1.14(T_a - 25)$	$\bar{K}_t$ = monthly clearness index at optimum tilt; <sup>d</sup> NOCT = 45 °C for c,pc-Si, 50 °C for a-Si, $T$ in °C
$T_c = T_1 + kT_T G_T$ $k = \frac{F_b}{F_b U_L}$	Module $T$ for a-Si, $T$ in °C
$T_c = T_a + \frac{G_T}{G_{ref}} \{ T_1 e^{bV_w} + T_2 + \Delta T_{ref} \}$	PV/T system, $\eta_T$ = thermal efficiency,
$T_c = T_a + G_T \left[ e^{(a+bV_i)} + \frac{\Delta T_{ref}}{G_{ref}} \right]$	$T_1$ = tank inlet temperature
$T_c = T_a + 0.031G_T$	$T_1$ = max $T$ at low wind, $T_2$ = min $T$ at high wind, $\Delta T_{ref} = T_c - T_{back}$ at $G_{T,ref} = 1000$ W/m <sup>2</sup> , $b$ = rate of $T$ drop with wind, $T$ in °C
$T_c = T_a + 0.031G_T - 0.058$	Used in the SNL model, $\Delta T_{ref} = T_c - T_{back}$ at $G_{T,ref} = 1000$ W/m <sup>2</sup> , $T$ in °C, $T_m$ is the back-side temperature, $V_i$ = free-stream wind speed. Dimensionally inconsistent equation!
Same as in Ref. [65] but for monthly average $T_{c,eif}$	$T_c$ average back and front, $T$ in °C
$T_c = \frac{U_{pw} T_a + G_T [(c\tau_0) - \eta_{ref} (1 + \beta T_{ref})]}{U_{pw} - \beta \eta_{ref} G_T}$	$T_c$ average back and front, $T$ in °C
$T_c = 0.943T_a + 0.028G_T - 1.528V_w + 4.3$	Based on meteodata, $T$ in °C
	$U_{pw}$ = 2-sides heat transfer coefficient, $\alpha\tau = 0.9$ , $U_{pw} = 28.8$ W/m <sup>2</sup> K, $U_{pw} = 24.1 + 2.9V_w$

Correlation	Comments
$T_c = T_a + [(\alpha - \eta)G_T + (a + bT_a)] / (17.8 + 2.1V_w)$	$a, b$ are empirical functions of PV and ground emissivities $\varepsilon_{pv}$ and $\varepsilon_g$ , respectively, and of a cloudiness factor, $\varepsilon_c^a$
$T_c = T_a + \alpha G_T (1 + \beta T_a) (1 - \gamma v_w) (1 - 1.053 \eta_c)$	$v_w = 1$ m/s, $G_T$ in W/m <sup>2</sup> , $\alpha = 0.0138$ , $\beta = 0.031$ , $\gamma = 0.042$ , $T$ in °C
$T_c = T_a + G_T \left( \frac{U_L}{U_L} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right) \right]$	$\tau \alpha / U_L$ taken as constant, used in TRNSYS Type 170 – Mode 1 <sup>b</sup>
$T_c = T_a + \frac{(\tau \alpha - \eta_c)}{U_L} G_T$	Adapted from Eq. (3), similar to Refs. [32,33], $\tau \alpha / U_L$ determined experimentally
$T_c = T_a + \frac{G_T}{\tau_1 + C_2 V_w} \left[ (1 - \rho)(1 - \eta) - \sigma \frac{\varepsilon T_c^4 - T_a^4}{G_T} \right]$	$\rho =$ module reflectivity, $\varepsilon =$ module emissivity, neglects radiative loss to ground, <sup>c</sup> $C_1, C_2$ conductive and convective coefficients
$T_c = T_a + \frac{G_T}{G_{NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_a) \left( 1 - \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right)$	Eqs. (23.3.2) and (23.3.3) of Ref. [32]; assumes constant $U_L$
$T_c = T_a + \frac{G_T}{G_{NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_a,NOCT) \left( 1 - \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right)$	NOCT <sup>d</sup> conditions: 800 W/m <sup>2</sup> , AM1.5, 20 °C, $V_{wind} > 1$ m/s; assumes constant $U_L$
$T_c = T_a + G_T \left( \frac{U_L}{U_L} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right) \right]$	$U_L = h_{radn} + h_{conv}$
$T_c = T_a + \left( \frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) \left( \frac{U_{L,NOCT}}{U_L} \right) (T_{NOCT} - T_a,NOCT) \left[ 1 - \left( \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right) \right]$	$U_L = h_{radn} + h_{conv} +$ conduction through mounting frame
$T_c = T_a + \left( \frac{9.5}{5.7 + 3.8V_w} \right) \left( \frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) (T_{NOCT} - T_a,NOCT) \left[ 1 - \left( \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right) \right]$	Uses Nusselt–Jurgess correlation for convection; $\tau \alpha \approx 0.9$
$T_{bs} = \frac{h_{p1} (\tau \alpha)_{eff} G_T + U_{tb} T_a + h_b T_w}{U_{tb} + h_b}$	$T_{bs} =$ back surface of tedlar, $U_{tb} =$ glass to tedlar coefficient, $h_T =$ tedlar heat transfer coefficient, $h_{p1} =$ penalty factor (resistance due to EVA, Si material, tedlar), ( $\tau \alpha$ ) <sub>eff</sub> = function of $\eta_c(T_c)$
$T_c = \frac{\tau(\alpha_c p + \alpha_T)(1 - \beta_c) G_T - \eta_c G_T \beta_c + U_T T_a + U_T T_{bs}}{U_T + U_T}$	$U_T =$ cell to ambient via glass, $U_T =$ tedlar side, $p =$ packing factor, $T_{bs} =$ function of $\eta_c(T_c)$
$T'_c = \frac{\tau(\alpha_c p + \alpha_T)(1 - \beta_c) G_T + (U_T + U_{T_a}) T_a}{U_T + U_{T_a}}$	$T'_c =$ cell $T$ at zero water flow, $\tau \alpha_c =$ function of $\eta_c(T_c)$ , $p =$ packing factor, $U_{T_a} = \left[ \frac{h_T}{k_T} + \frac{1}{h_i} \right]^{-1}$

### 3.1.9 Εκτίμηση της ετήσιας παραγωγής ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού τριπλής επίστρωσης InGaP/InGaAs/Ge, βασισμένο σε πειραματικά χαρακτηριστικά ηλιακών κελιών και πρακτική δοκιμή σε μετεωρολογικά δεδομένα.

Σ' αυτή τη δημοσίευση παρουσιάζεται η εξάρτηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των InGaP/InGaAs/Ge triple-junction ηλιακών κελιών από τη θερμοκρασία. Ακόμα γίνεται μία σύγκριση με flat plate collector από c-Si. Οι μετρήσεις και υπολογισμοί έχουν γίνει στο ινστιτούτο NAIST της Ιαπωνίας, το οποίο είναι σε γεωγραφικό πλάτος  $34,45^{\circ}$  βόρεια και γεωγραφικό μήκος  $135,44^{\circ}$  ανατολικά(Google earth). Είναι κοντά στο γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας που είναι  $37^{\circ}$  βόρεια.

Τα ηλιακά κελιά τριπλής επίστρωσης αποτελούνται κατά σειρά από InGaP, InGaAs, Ge και παρέχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Το κόστος κατασκευής τους είναι υψηλότερο από το κόστος ενός ηλιακού κελιού από Si. Όμως το απαιτούμενο μέγεθος του κελιού μειώνεται με αύξηση του λόγου συγκέντρωσης και έτσι το συνολικό κόστος του συγκεντρωτικού συστήματος μειώνεται. Σε τέτοια συστήματα τα ηλιακά στοιχεία, εάν είναι μονωμένα, μπορούν να φτάσουν τη θερμοκρασία των  $1400^{\circ}\text{C}$  σε λόγο συγκέντρωσης 500 ήλιων. Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Με παθητική ψύξη αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας δεν μπορεί να εξαλειφτεί. (Nishioka, Takamoto, Agui, Kaneiwa, Uraoka, & Fuyuki, 2005)



Εικόνα 38

Όπως φαίνεται και στο δίπλα σχήμα, τα “υποκελιά” InGaP, InGaAs, Ge αναπτύσσονται πάνω σε p τύπου Ge με απόθεση χημικής εξαέρωσης που χρησιμοποιεί σαν πηγή οργανικά μέταλλα (metal-organic chemical vapor deposition). Τα ηλεκτρόδια κατασκευαστήκαν με τη μέθοδο της εξαέρωσης. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από Ag  $5\mu\text{m}$ . Το πλάτος και το ύψος του πλέγματος ηλεκτροδίου είναι 7 και  $120\mu\text{m}$  αντίστοιχα. Το AR Coating ή ARC (Anti-Reflection Coating) είναι το αντανακλαστικό επίχρισμα.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η οπίσθια περιοχή τύπου  $p^+$  (εδώ Ge) χρησιμοποιείται για να αυξήσει την απόδοση του ηλιακού κυττάρου, καθώς δημιουργεί ένα οπίσθιο επιφανειακό πεδίο που μικραίνει την πιθανότητα που υπάρχει οι φορείς να επανασυνδεθούν στην επιφάνεια αυτή. (Markvart, 2003)



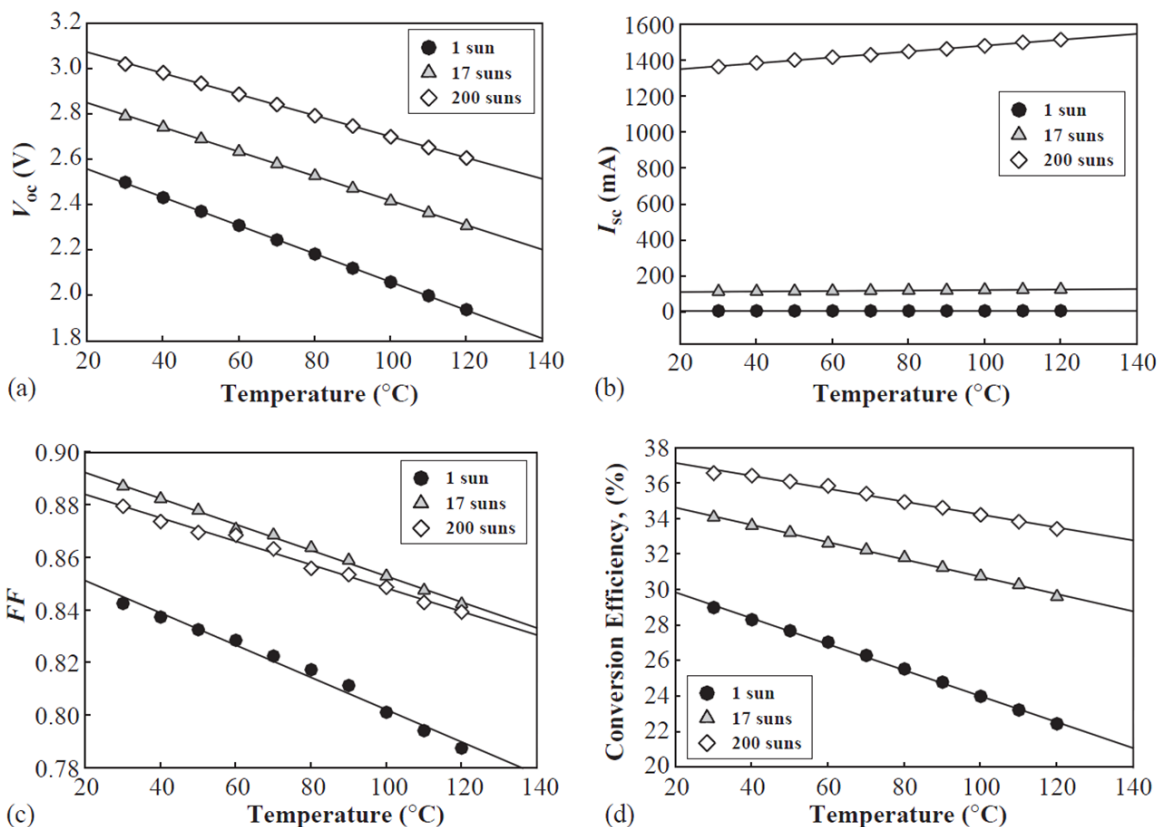
### Χαρακτηριστικά του ηλιακού κελιού τριπλής επικάλυψης υπό συγκεντρωμένο φως

Το φως από ένα ηλιακό εξομοιωτή ρυθμίστηκε στις συνθήκες αναφοράς 1 ήλιου και συγκεντρώνεται από ένα φακό Fresnel. Ο λόγος συγκέντρωσης ποικίλει από 1 έως 200. Η ανάλυση για την επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά των κελιών έγινε από 30<sup>0</sup> έως τους 120<sup>0</sup>C.

Ο ακόλουθος πίνακας δείχνει τα χαρακτηριστικά του ηλιακού κελιού (InGaP/InGaAs/Ge triple-junction) στους 25<sup>0</sup>C για διάφορους λόγους συγκέντρωσης.

	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA)	FF	$\eta$ (%)
1sun	2.53	6.74	0.849	29.5
17 suns	2.82	113	0.890	34.4
200 suns	3.05	1362	0.883	37.0

Ενώ στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η εξάρτηση των παραπάνω χαρακτηριστικών συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 31

Οι συντελεστές θερμοκρασίας των παραπάνω χαρακτηριστικών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	1 sun	17 suns	200 suns
$\frac{dV_{oc}}{dT}$ [V/°C]	-0.0062	-0.0054	-0.0046
$\frac{1}{V_{oc(25^\circ\text{C})}} \frac{dV_{oc}}{dT} \times 100$ [%/°C]	-0.245	-0.191	-0.151
$\frac{dI_{sc}}{dT}$ [mA/°C]	0.005	0.139	1.637
$\frac{1}{I_{sc(25^\circ\text{C})}} \frac{dI_{sc}}{dT} \times 100$ [%/°C]	$7.42 \times 10^{-2}$	$12.28 \times 10^{-2}$	$12.02 \times 10^{-2}$
$\frac{dFF}{dT}$ [1/°C]	-0.0006	-0.0005	-0.0004
$\frac{1}{FF(25^\circ\text{C})} \frac{dFF}{dT} \times 100$ [%/°C]	$-7.07 \times 10^{-2}$	$-5.62 \times 10^{-2}$	$-4.53 \times 10^{-2}$
$\frac{d\eta}{dT}$ [%/°C]	-0.073	-0.0486	-0.0363
$\frac{1}{\eta(25^\circ\text{C})} \frac{d\eta}{dT} \times 100$ [%/°C]	-0.248	-0.141	-0.098

Από τα διαγράμματα και τον πρώτο πίνακα προκύπτει:

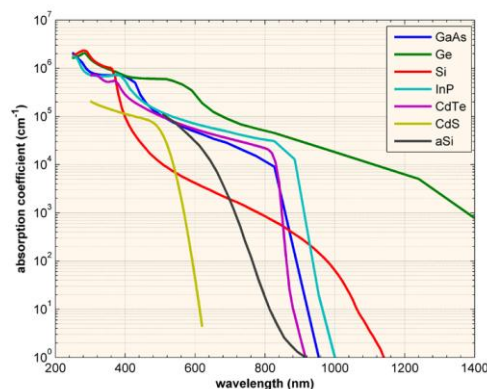
● **V<sub>oc</sub> (τάση ανοικτού κυκλώματος)**

Το V<sub>oc</sub> μικραίνει, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Όμως ο ρυθμός μείωσης του V<sub>oc</sub> εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, μικραίνει όσο αυξάνει ο λόγος συγκέντρωσης. Αυτό συμβαίνει, διότι η εξάρτηση του V<sub>oc</sub> από τη θερμοκρασία, είναι μικρότερη για μεγαλύτερο V<sub>oc</sub> και αύξηση του λόγου συγκέντρωσης αυξάνει το V<sub>oc</sub>.

● **I<sub>sc</sub> (ρεύμα κορεσμού)**

Η αύξηση του I<sub>sc</sub> με την αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στη μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης.

Παρατήρηση: Ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient) καθορίζει το πόσο βαθιά μπορεί να διεισδύσει σε ένα υλικό, φως συγκεκριμένου μήκους κύματος, πριν απορροφηθεί. Για παράδειγμα, στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται ο συντελεστής απορρόφησης διάφορων ημιαγωγικών υλικών συναρτήσει του μήκους κύματος στη θερμοκρασία των 27°C.



Διάγραμμα 32

### ● FF (συντελεστής πλήρωσης)

Ο συντελεστής πλήρωσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται με την αύξηση του λόγου συγκέντρωσης. Όμως ο FF στους 200 ήλιους είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο στους 17 ήλιους λόγω της επίδρασης της σειριακής αντίστασης. Η εξάρτηση του FF από τη θερμοκρασία προέρχεται κυρίως από την εξάρτησή του  $V_{oc}$  από τη θερμοκρασία. Υπενθυμίζεται ότι:

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

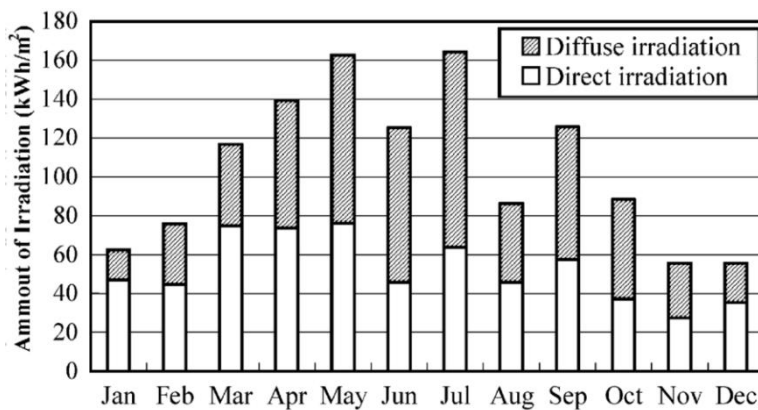
### ● η (βαθμός απόδοσης)

Η εξάρτηση του η από τη θερμοκρασία, επηρεάζεται περισσότερο από την εξάρτηση του  $V_{oc}$  από τη θερμοκρασία. Για κάθε λόγο συγκέντρωσης, το η μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται με την αύξηση του λόγου συγκέντρωσης, εξαιτίας της αύξησης του  $V_{oc}$ . Ο ρυθμός μείωσης του η με αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται με αύξηση του λόγου συγκέντρωσης.

Ο κανονικοποιημένος συντελεστής θερμοκρασίας ως προς τους 25°C (normalized temperature coefficient) του βαθμού απόδοσης  $((d\eta/dT)/\eta_{(25^\circ C)} \cdot 100)$  είναι για τριπλής επικάλυψης φωτοβολταϊκό -0,248%/°C υπό 1 ήλιο και -0,4 ή -0,5%/°C υπό 1 ήλιο για c-Si φωτοβολταϊκό.

### Υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής

Για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκε ένα μη συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό, δηλαδή ένα επίπεδο PV 50-kW και έγιναν μετρήσεις μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων λειτουργίας.



Ο διπλάνος πίνακας δείχνει τη διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία για κάθε μήνα. Η άμεση ακτινοβολία ήταν περίπου η μισή από την ολική ακτινοβολία.

Διάγραμμα 33

Ο επίπεδος συλλέκτης εκμεταλλεύεται τόσο την άμεση ακτινοβολία όσο και τη διάχυτη, ενώ ο συγκεντρωτικός συλλέκτης μόνο την άμεση. Άρα είναι σημαντική η σύγκριση ανάμεσα στα PV τριπλής επίστρωσης με λόγο συγκέντρωσης 17 και 200 και στο PV από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

✓ Η ετήσια παραγωγή ενέργειας για επίπεδο PV, εκφράζεται από τον τύπο:

$$P_{out} = K_T \times K_f \times P_g \times \eta_s$$

Όπου:

$P_g$ : η ολική ακτινοβολία (άμεση + διάχυτη)

$\eta_s$ : ο βαθμός απόδοσης υπό τις συνθήκες αναφοράς 1 ήλιου, κ.λπ.

$K_f$ : είναι ο συντελεστής διόρθωσης για όλους του παράγοντες εκτός της θερμοκρασίας (εδώ θεωρήθηκε ότι είναι 1)

$K_T$ : είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας και εφόσον η στάνταρ θερμοκρασία είναι  $25^{\circ}\text{C}$ , τότε

$$K_T = 1 + a(T_m - 25)$$

Όπου  $T_m$  είναι η θερμοκρασία της διάταξης και  $a$  είναι ο κανονικοποιημένος συντελεστής θερμοκρασίας ( $(d\eta/dT)/\eta_{(25^{\circ}\text{C})} * 100$ ), που βλέπουμε και σε παραπάνω πίνακα. Για το επίπεδο PV από Si λήφθηκε το  $a \rightarrow -0,4\%/^{\circ}\text{C}$  και το  $\eta_s \rightarrow 17,4\%$  στους  $25^{\circ}\text{C}$ .

✓ Η ετήσια παραγωγή ενέργειας για συγκεντρωτικό PV εκφράζεται από τον τύπο:

$$P_{out} = K_T \times K_f \times P_d \times \eta_s$$

Όπου:

$P_d$ : η άμεση ακτινοβολία

$K_T$ : είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας και εφόσον η στάνταρ θερμοκρασία είναι  $25^{\circ}\text{C}$ , τότε

$$K_T = 1 + a(T_{m(conc.)} - 25)$$

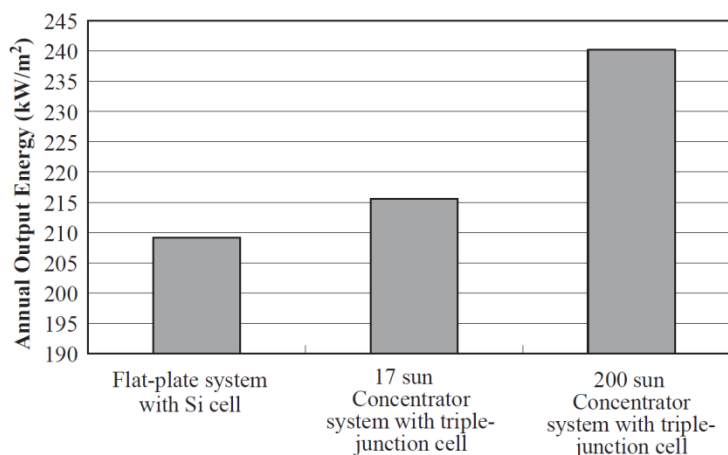
$K_f$ : καθορίζεται κυρίως από τις οπτικές απώλειες (αναφέρεται ότι το  $K_f$  για συγκεντρωτικό σύστημα 400 ήλιων με φακό Fresnel είναι 0,927, τιμή η οποία χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς αυτής της δημοσίευσης).

Η θερμοκρασία υπολογίζεται από τον πειραματικό τύπο:

$$T_{m(conc.)} = T_m + 17P_d$$

Για το λόγο συγκέντρωσης 17 λήφθηκε το  $a \rightarrow -0,141\%/^{\circ}\text{C}$  και το  $\eta_s \rightarrow 34,4\%$ , ενώ για λόγο συγκέντρωσης 200  $-0,098\%/^{\circ}\text{C}$  και  $36,7\%$  αντίστοιχα.

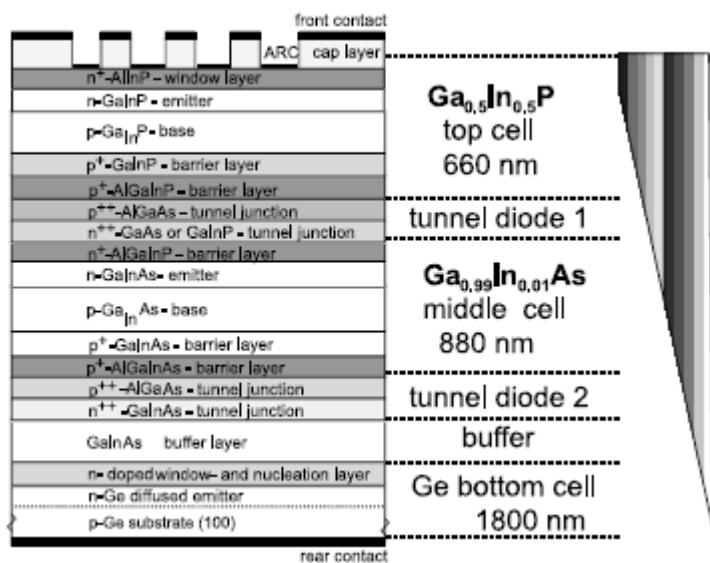
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την ετήσια παραγωγή είναι τα ακόλουθα.



Διάγραμμα 34

### 3.1.10 Φάσμα απορρόφησης triple junction

Ένα τυπικό ηλιακό κελί τριπλής επικάλυψης αποτελείται από περισσότερα από 20 στρώματα, τα οποία έχουν διαστάσεις από 10nm μέχρι μερικά μm.



Εικόνα 39

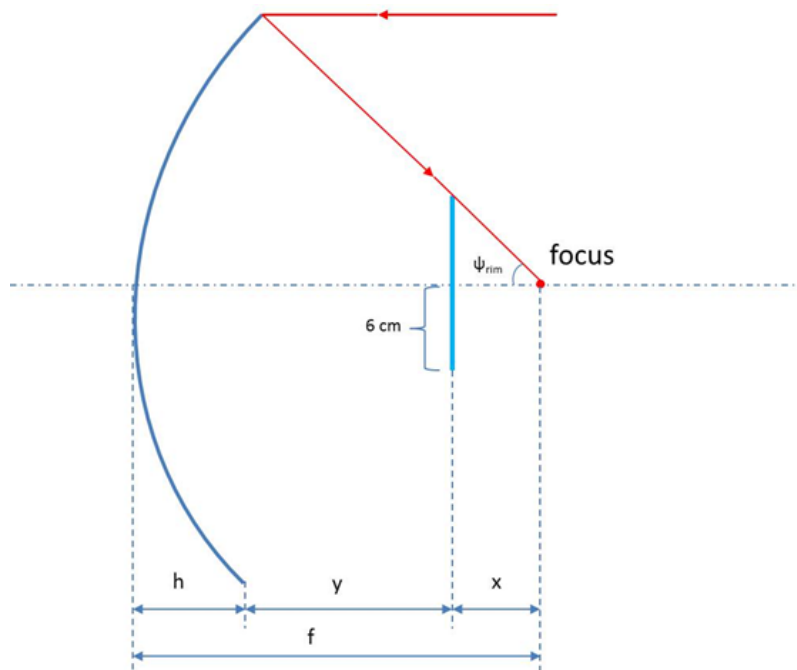
Όπως φαίνεται και στη διπλανή εικόνα το πρώτο στρώμα απορροφά από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία την περιοχή μέχρι 660nm. Το δεύτερο στρώμα απορροφά το μέρος της ακτινοβολίας που έχει μήκος κύματος μέχρι 880nm. Τα δύο προηγούμενα είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα υπόστρωμα από γερμάνιο, το οποίο απορροφά το μέρος της ακτινοβολίας που δεν έχει απορροφηθεί από τα προηγούμενα και φτάνει μέχρι και μήκος κύματος 1800nm.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Γεωμετρία του παραβολικού συλλέκτη

Ο παραβολικός συλλέκτης χαρακτηρίζεται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η βασική γεωμετρία που θα χρησιμοποιήσουμε φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 40

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον παραβολικό συλλέκτη στην περίπτωση μας είναι οι ακόλουθες:

Το ύψος της παραβολής:

$$h = \frac{d^2}{16f}$$

Η γωνία  $\Psi_{rim}$ :

$$\tan \psi_{rim} = \frac{1}{(d/8h) - (2h/d)}$$

Η απόσταση του πάνελ από το σημείο εστίασης:

$$x = \frac{(a/2)}{\tan \psi_{rim}}$$

Το εμβαδό της ανακλαστικής επιφάνειας:

$$E_{ανακλ.επιφ.} = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[ \left( \frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{3}{2}} - 1 \right\}$$

Το εμβαδό του ανοίγματος του συλλέκτη που βλέπει τον ήλιο (προσπίπτουσα ακτινοβολία):

$$E_{\text{ανοίγματος συλλέκτη}} = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\frac{f}{d} = \frac{1 + \cos \psi_{rim}}{4 \sin \psi_{rim}}$$

Ο λόγος συγκέντρωσης CR

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r}$$

Έχει γίνει ένα πρόγραμμα στη Fortran το οποίο υπολογίζει τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Σαν είσοδο δίνουμε τη διάμετρο του πιάτου, το πλάτος του PV (ή τη διάμετρό του), καθώς και το μήκος εστίασης (focal length) ή τη γωνία  $\Psi_{rim}$ , ανάλογα με το τι μας είναι γνωστό. Το ίδιο πρόγραμμα υπολογίζει και κάποια θερμοδυναμικά μεγέθη, καθώς και μία αρχική εκτίμηση της ανηγμένης σε κύκλο προσπίπτουσας ισχύς, στα οποία θα αναφερθούμε σε ακόλουθο κεφάλαιο. Βλέπε Παράρτημα Α.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την ανάλυση της ροής της ακτινοβολίας σε τρεις διατάξεις διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και σχεδιασμού. Σε κάθε περίπτωση όμως η διάμετρος του παραβολικού συλλέκτη είναι 1m.

## **4.2 Ανάλυση ροής ακτινοβολίας με το TracePro**

Για την ανάλυση ροής της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πρόγραμμα tracePro (version 7.0.1).

Διαδικασία που ακολουθείται στο tracePro:

1. Εισάγουμε το μοντέλο
2. Ορίζουμε τις ιδιότητες των επιφανειών
3. Εισάγουμε-ορίζουμε την πηγή
4. Τρέχουμε την ανάλυση
5. Επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα

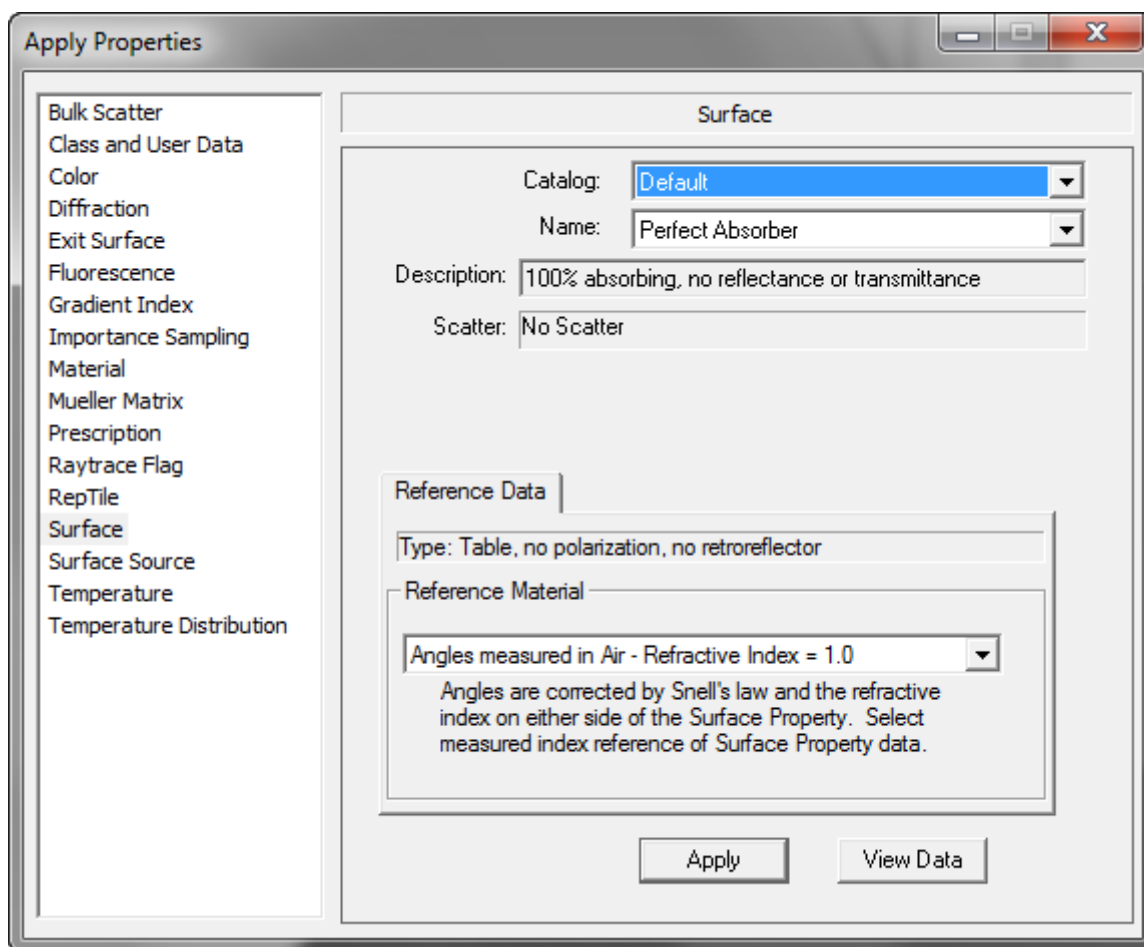
### Σχεδιασμός του μοντέλου-διάταξης

Το μοντέλο που εισάγεται προς ανάλυση στο tracePro είναι προσχεδιασμένο στο Solidworks, αποθηκευμένο σε ειδική μορφή αρχείου STEP AP203, που αναγνωρίζεται από το tracePro.

### Ιδιότητες επιφανειών

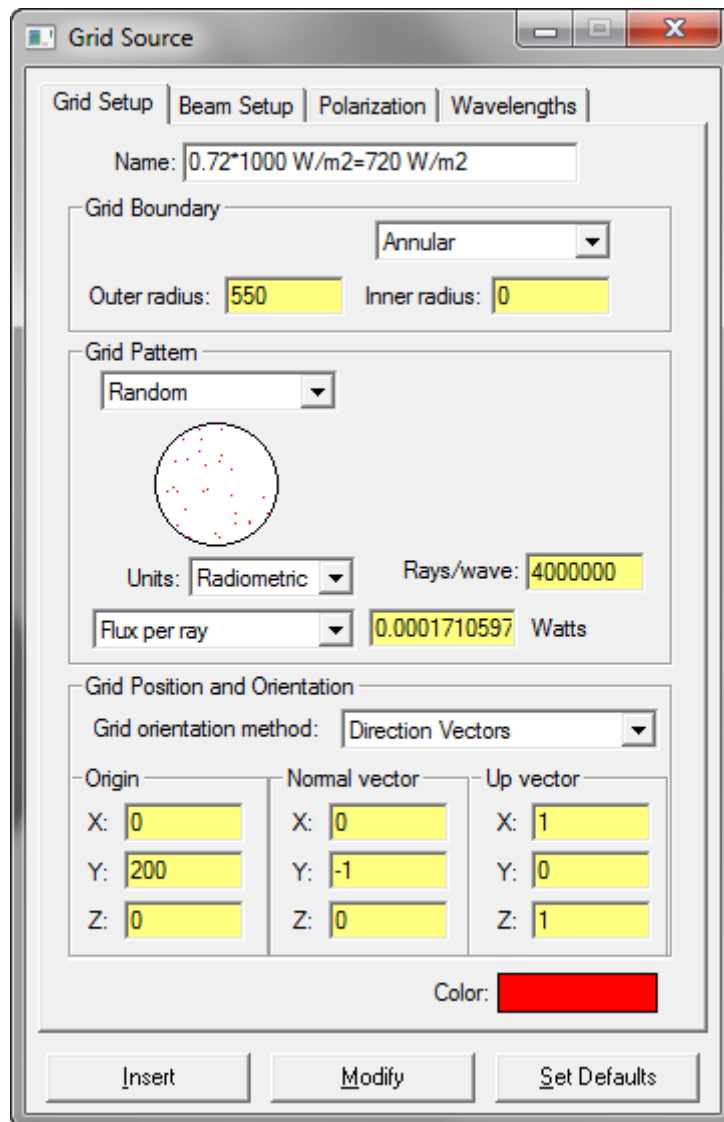
Το tracePro διαθέτει βιβλιοθήκη με μία μεγάλη γκάμα υλικών και ιδιοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν οι ιδανικές περιπτώσεις του

τέλειου ανακλαστή και του τέλειου απορροφητή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το παράθυρο με τις συγκεκριμένες επιλογές.



### Εισαγωγή πηγής

Το επόμενο βήμα είναι να εισάγουμε την πηγή η οποία θα προσομοιάζει την ηλιακή ακτινοβολία. Θα πρέπει οι διαστάσεις της πηγής να είναι ελαφρά μεγαλύτερες από τις διαστάσεις της διάταξης που υπόκειται σε ανάλυση. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, το σχήμα της πηγής είναι κυκλικό και κατανομή των ακτινών έχει επιλεγεί τυχαία. Εισάγουμε πηγή ακτινοβολίας κυκλική με ακτίνα 550mm, δηλαδή 50mm παραπάνω από την ακτίνα του πρώτου ανακλαστήρα (παραβολικού συλλέκτη) που είναι 500mm. Οπότε υπερκαλύπτονται οι διαστάσεις της διάταξης. Ο αριθμός των ακτινών που θα λαμβάνουν μέρος στην ανάλυση είναι 4.000.000. Η πηγή έχει τοποθετηθεί 200mm πάνω από την αρχή των αξόνων. Τέλος θεωρούμε ότι η πηγή δίνει μονοχρωματικό φως, δηλαδή ενός συγκεκριμένου μήκος κύματος. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα ισχύουν για όλες τις αναλύσεις που ακολουθούν'.



Το μόνο χαρακτηριστικό που θα αλλάζει είναι το Flux per ray, ανάλογα με την προσπίπτουσα ισχύ σε  $W/m^2$  που θα θέλουμε να προσομοιάσουμε. Σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης του TracePro για ομοιόμορφη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας, ο τύπος που δίνει το Peak Flux είναι ο ακόλουθος:

$$Flux\ per\ ray = \frac{E_0 \times A}{N}$$

Όπου :

$E_0$ : είναι η ακτινοβολία του ήλιου που θέλουμε να προσομοιάσουμε

A: είναι το εμβαδό της πηγής

N: είναι ο αριθμός των ακτινών που υπόκεινται σε ανάλυση

#### Ανάλυση-Αποτελέσματα

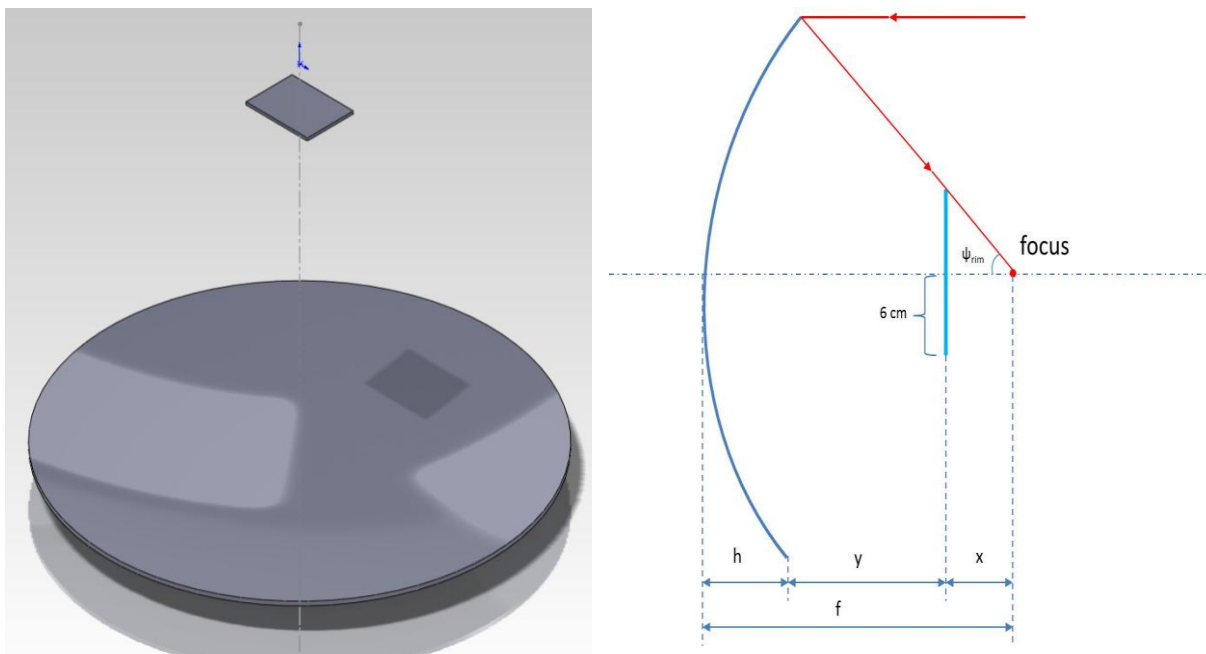
Την ανάλυση την τρέχουμε σε analysis mode και όχι σε simulation mode. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι τα επίπεδα ροής της ισχύος πάνω στην πλάκα του PV(και κατά συνέπεια πάνω στον εναλλάκτη), τη συνολική ισχύ που προσπίπτει στο PV- εναλλάκτη, το σύνολο των ακτινών που ανακλώνται.

Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση μεταξύ δύο ειδών σχεδίασης με βάση την ανάλυση της ροής της ακτινοβολίας από το tracePro. Η σύγκριση θα γίνει για  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Η διάχυτη ακτινοβολία δεν λαμβάνεται υπόψη.

### 1<sup>η</sup> Διάταξη

Χρησιμοποιείται πιάτο με:

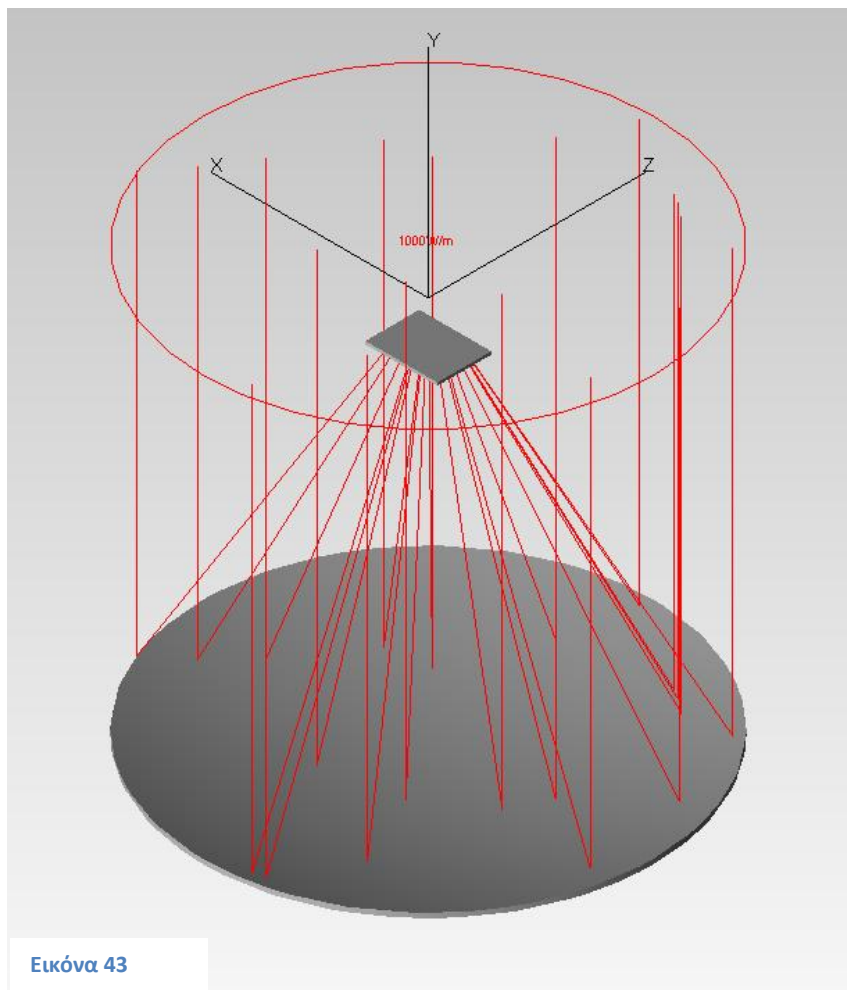
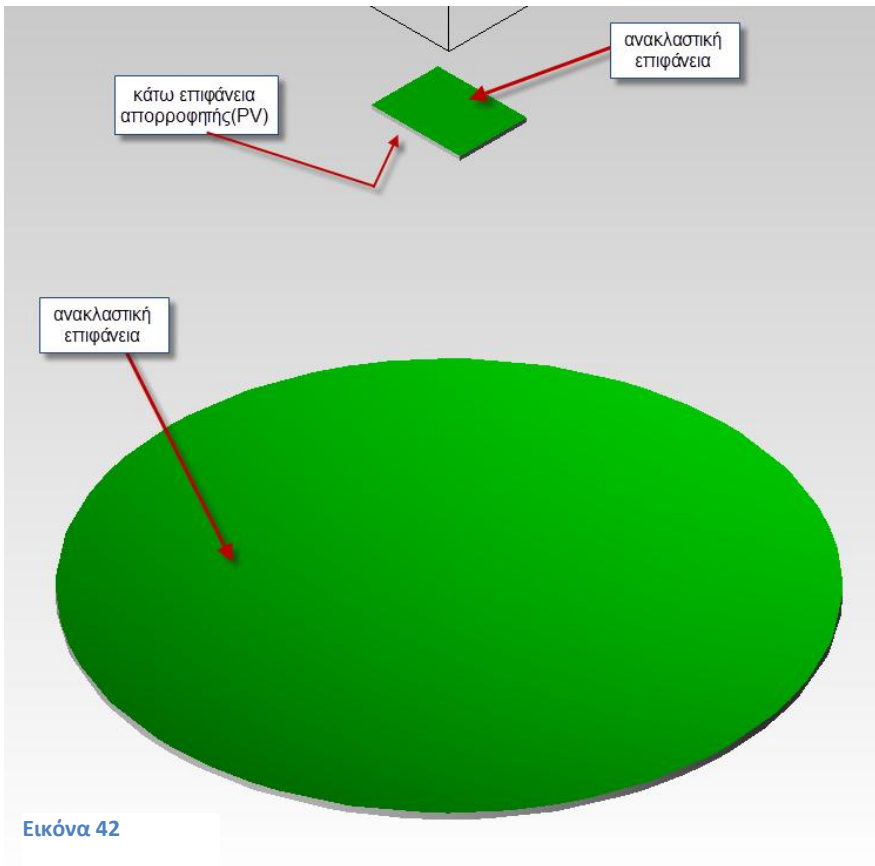
- διάμετρο 1m
- $\Psi_{\text{rim}}=31^\circ$
- Focal length  $f=0,9\text{m}$
- $X=99,667\text{mm}$
- Εμβαδό ανακλαστικής επιφάνειας  $e_{\text{anakl}}=0,8\text{m}^2$
- Άνοιγμα συλλέκτη που δέχεται την ακτινοβολία  $e_{\text{con}}=0,7854\text{m}^2$
- Το ύψος της παραβολής είναι  $h=69,44\text{mm}$
- Ο λόγος συγκέντρωσης  $\text{CR}=69,44$



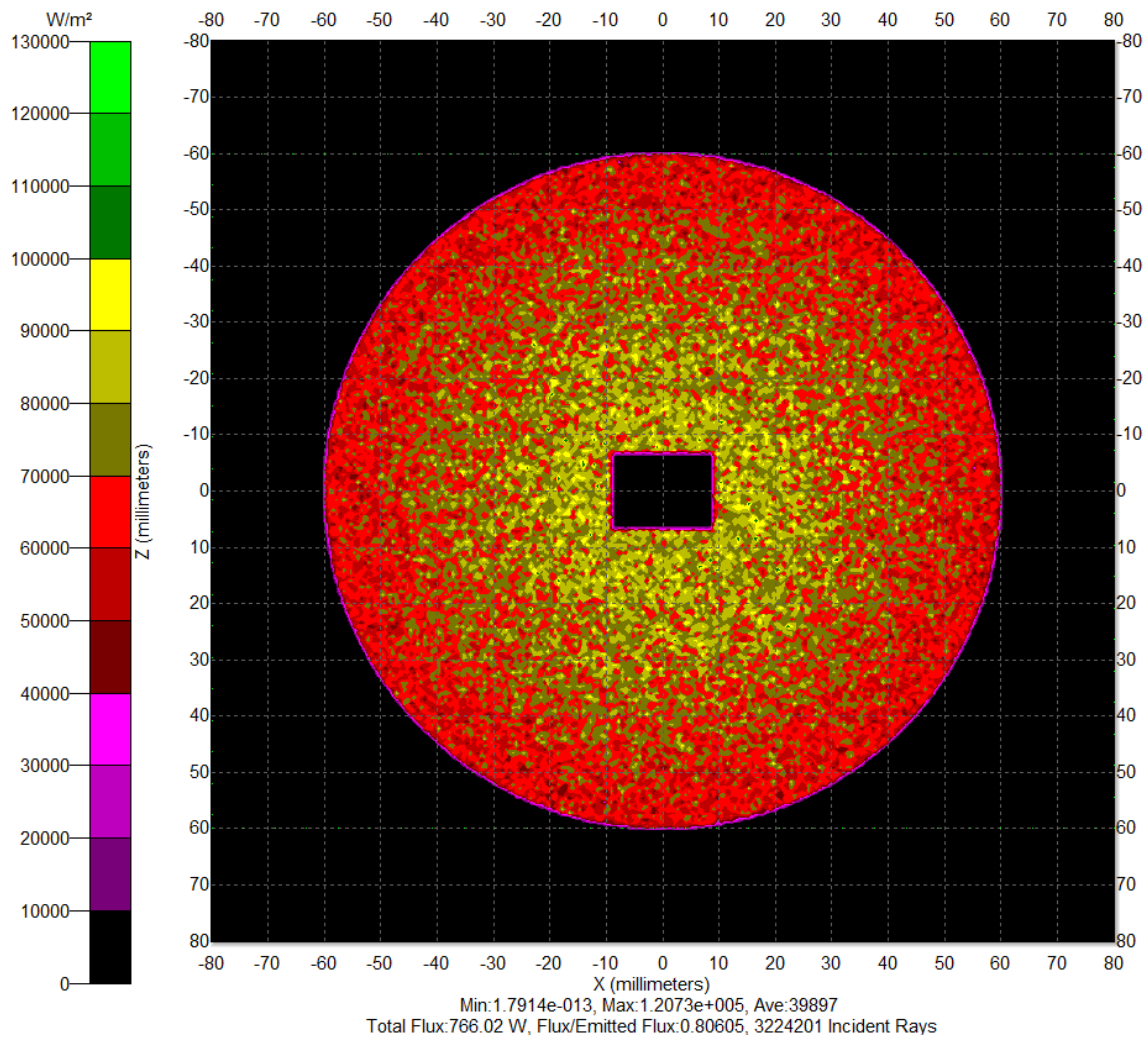
Εικόνα 41

Ο εναλλάκτης έχει τοποθετηθεί σε απόσταση  $\langle x \rangle$  από το focal point (πάνω εικόνα δεξιά).

Υπάρχει ένας ανακλαστής που ανακλά την ακτινοβολία απευθείας πάνω στο PV-εναλλάκτη. Η διάταξη, οι επιφάνειες που έχουν οριστεί οι ιδιότητές τους, καθώς και η πορεία των ακτινών φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Το αποτέλεσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πάνω στον εναλλάκτη στην πλευρά που είναι το PV για  $1000\text{W/m}^2$  είναι το ακόλουθο.

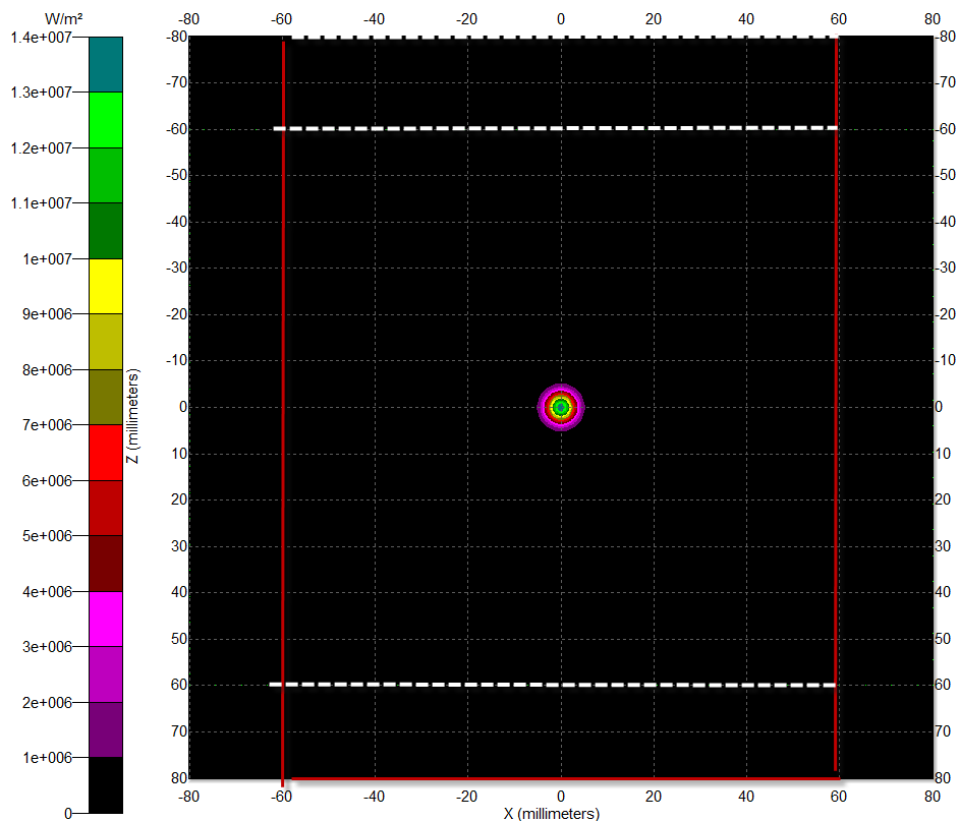


Διάγραμμα 35

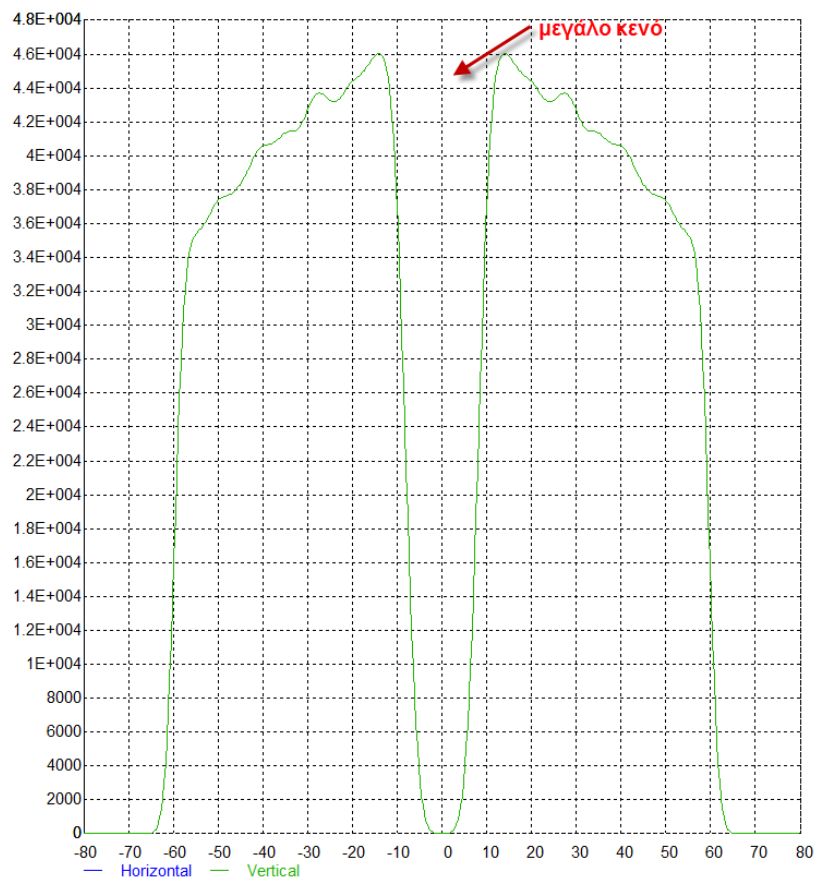
#### Συμπεράσματα-Προβλήματα:

Όπως φαίνεται στην εικόνα υπάρχει ένα κενό στο κέντρο, διαστάσεων  $14\text{mm} \times 18\text{mm}$ .

Αυτό οφείλεται στη μεγάλη σκίαση που προκαλεί ο εναλλάκτης έχοντας διαστάσεις  $160\text{mm} \times 120\text{mm}$  που κόβουν τη ροή της ακτινοβολίας. Κανονικά αυτό το κενό δε θα φαινόταν σχεδόν καθόλου αν ο εναλλάκτης ήταν τοποθετημένος στο σημείο εστίασης, αλλά τότε η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι μία κουκίδα (διάγραμμα 36). Εφόσον εμείς θέλουμε κατανομή με μεγάλη διάμετρο, βάζουμε σε απόσταση  $\langle X \rangle$  το μικροεναλλάκτη. Οι ανακλώμενες από το κάτοπτρο ακτίνες φτάνουν στο focal point υπό γωνία και βάζοντας εμείς τον μικροεναλλάκτη πιο κάτω τις ανακόπτουμε νωρίτερα. Κάθετα ανακλώμενες ακτίνες δεν υπάρχουν λόγω της σκίασης, άρα έχουμε το κενό στη μέση. Στο τέλος παρουσιάζονται εικόνες που δείχνουν ότι πράγματι φταίει η σκίαση για το κενό στο κέντρο.



Διάγραμμα 36

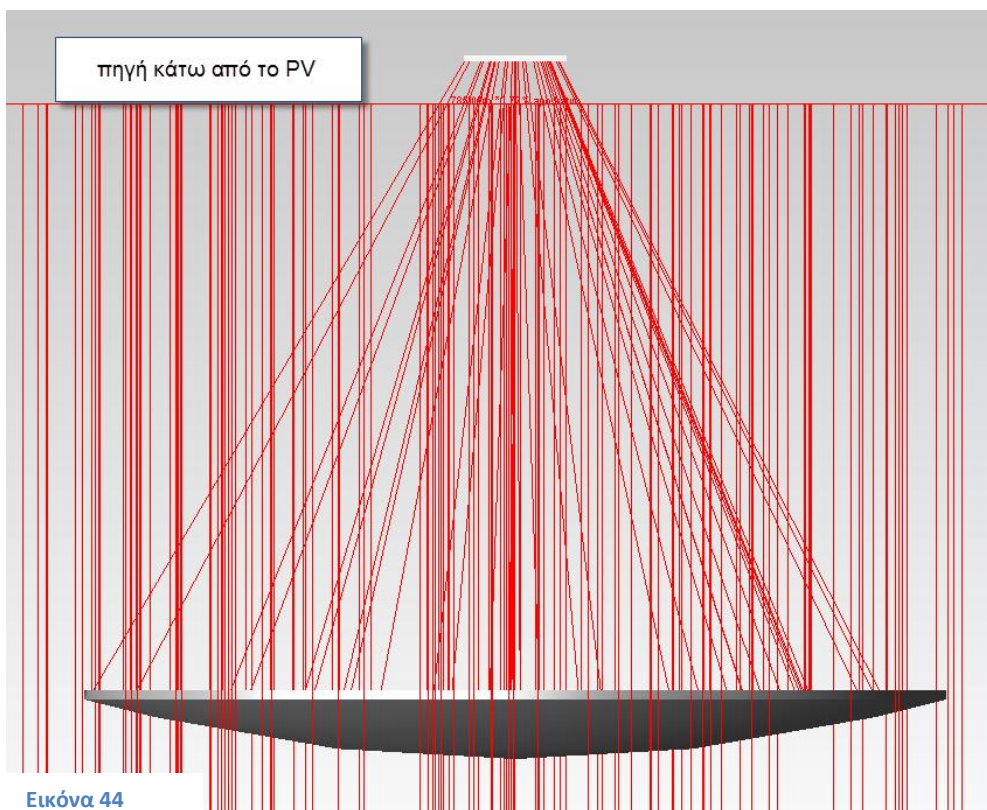


Διάγραμμα 37

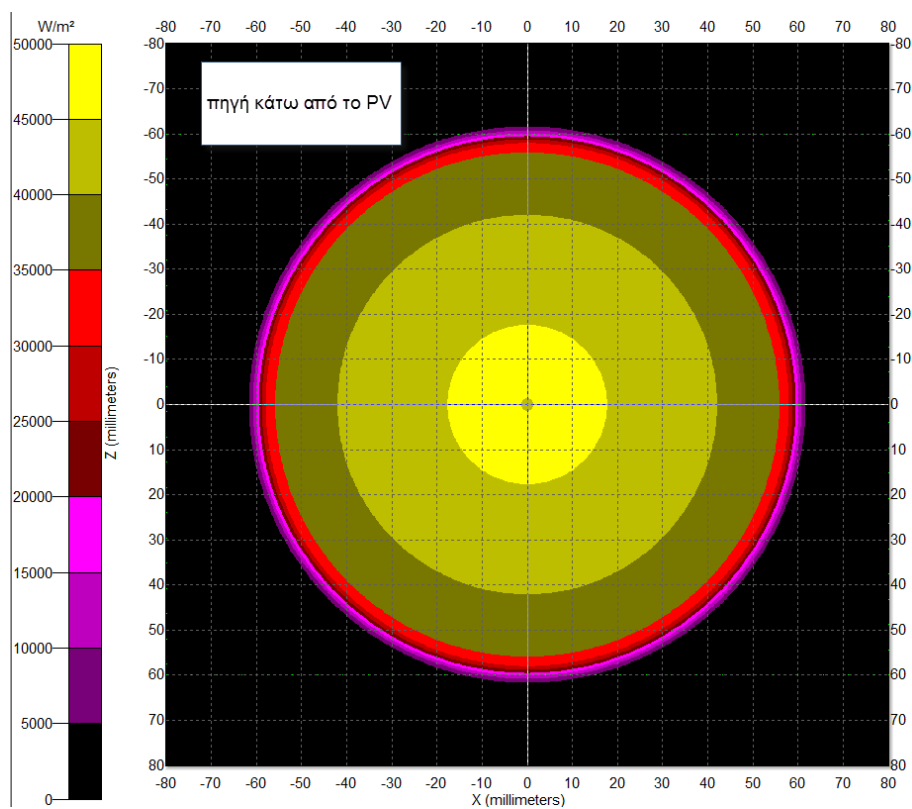


## Απόδειξη ότι φταίει η σκίαση για το κενό στο κέντρο.

Οι παρακάτω εικόνες είναι μόνο για την *περίπτωση 1*. Η πηγή ορίστηκε κάτω από τον εναλλάκτη και όπως φαίνεται δεν υπάρχει το κενό στο κέντρο όπως στην εικόνα 44.



Εικόνα 44



Διάγραμμα 38

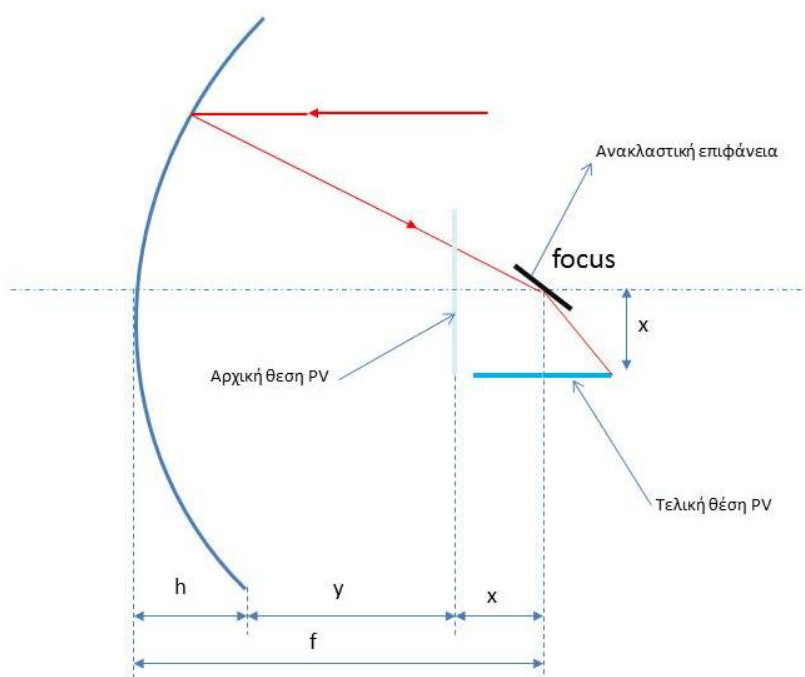
## 2<sup>η</sup> Διάταξη

Υπάρχει ακριβώς το ίδιο πιάτο όπως και στην πρώτη περίπτωση με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που είναι ο πρωτεύων ανακλαστής και ακόμα ένας δευτερεύων μικρός ανακλαστής.

Κάθε ακτινοβολία προσπίπτει στο δεύτερο ανακλαστή με συγκεκριμένη γωνία που έχει προκύψει από την ανάκλασή της στον παραβολικό συλλέκτη. Ο δευτερεύων ανακλαστής είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης υπό κλίση  $45^{\circ}$  και ανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στον εναλλάκτη-PV, δίνοντας σε κάθε ακτίνα μία επιπλέον γωνία  $45^{\circ}$ .

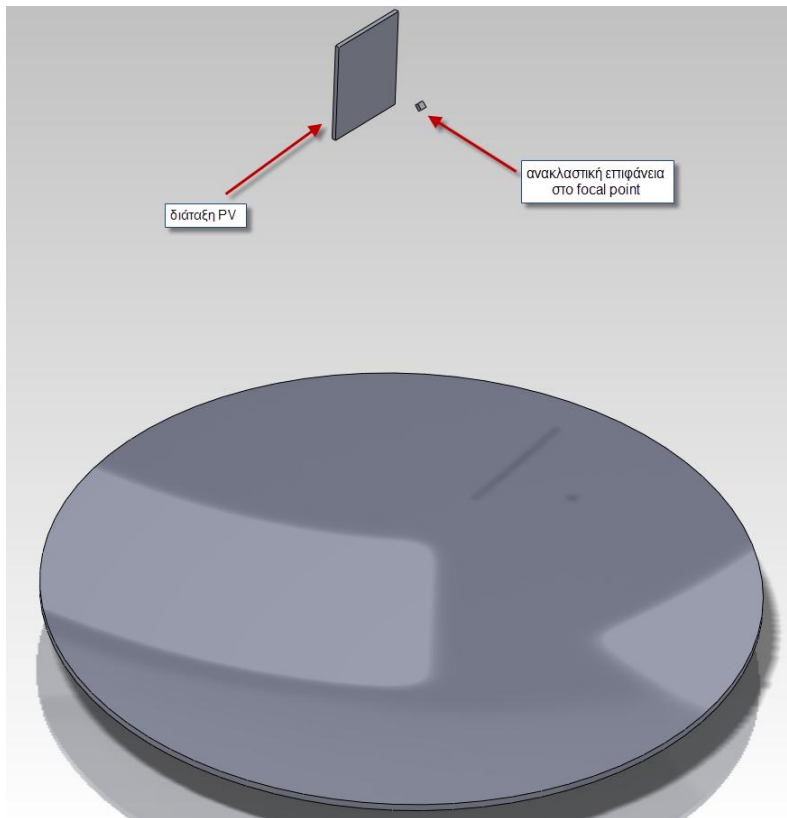
Το σύνολο της ροής προκύπτει κάθετο με την αρχική ροή. Τοποθετούμε τον εναλλάκτη-PV παράλληλα στην αρχική ροή και σε απόσταση  $<x>$  από το focal point.

Η απόσταση  $<x>$  είναι η ίδια με αυτή που έχει υπολογιστεί στην πρώτη περίπτωση. Αυτό γιατί η συνισταμένη της ροής που ανακλώνται από το πρωτεύον κάτοπτρο, φτάνουν στο focal point (συγκεντρώνονται) υπό γωνία. Με την ανακλαστική επιφάνεια των  $45^{\circ}$  θα ανακλώνται και θα αποκεντρώνονται πάλι με τις ίδιες γωνίες.



Εικόνα 45

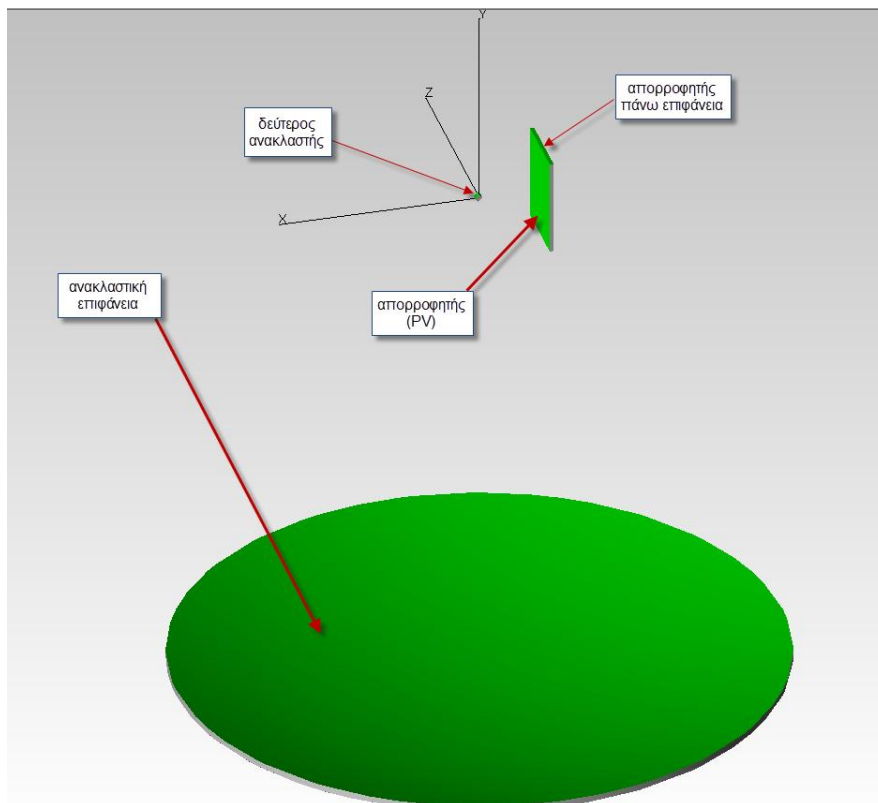
Το όφελος είναι ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία ανακλαστική επιφάνεια στο focal point πολύ μικρών διαστάσεων αφού έχει ήδη συγκεντρωθεί η ακτινοβολία. Μπορεί να έχει διαστάσεις περίπου  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ , όπως συμπεραίνουμε και από την εικόνα 4(παραπάνω), σε αντίθεση με την περίπτωση 1 που είναι  $120\text{mm} \times 160\text{mm}$ . Η επιφάνεια αυτή είναι υπό κλίση  $45^{\circ}$ , οπότε είναι ακόμα μικρότερη η σκίαση που προκαλείται στο πρωτεύον κάτοπτρο. Μία μικρή σκίαση θα προκαλείται και από τη διάταξη του PV, το οποίο όμως τώρα είναι παράλληλα στη ροή και η σκίαση προκαλείται από το πάχος του εναλλάκτη που έχουμε πει ότι είναι  $6,5\text{mm}$ . Δηλαδή σκίαση από μία επιφάνεια  $120\text{mm} \times 6,5\text{mm}$ . Η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 7.



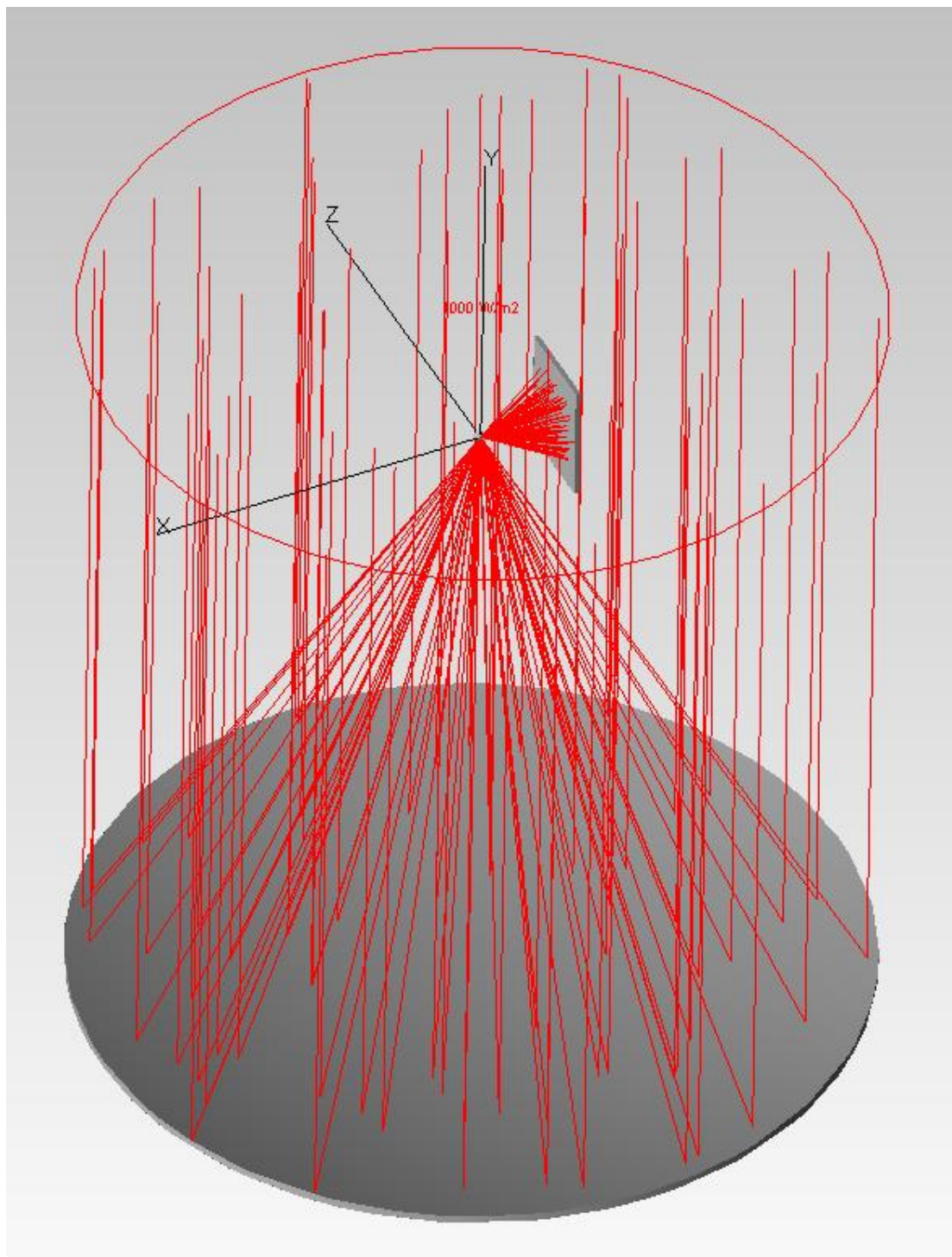
Εικόνα 46

Η διάταξη, η πορεία των ακτίνων, καθώς και οι επιφάνειες που έχουν οριστεί οι ιδιότητές τους, φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.

Για το δεύτερο ανακλαστή οι πάνω επιφάνειες είναι τέλει απορροφητές και η κάτω που ανακλά την ακτινοβολία στο PV είναι τέλει ανακλαστής.

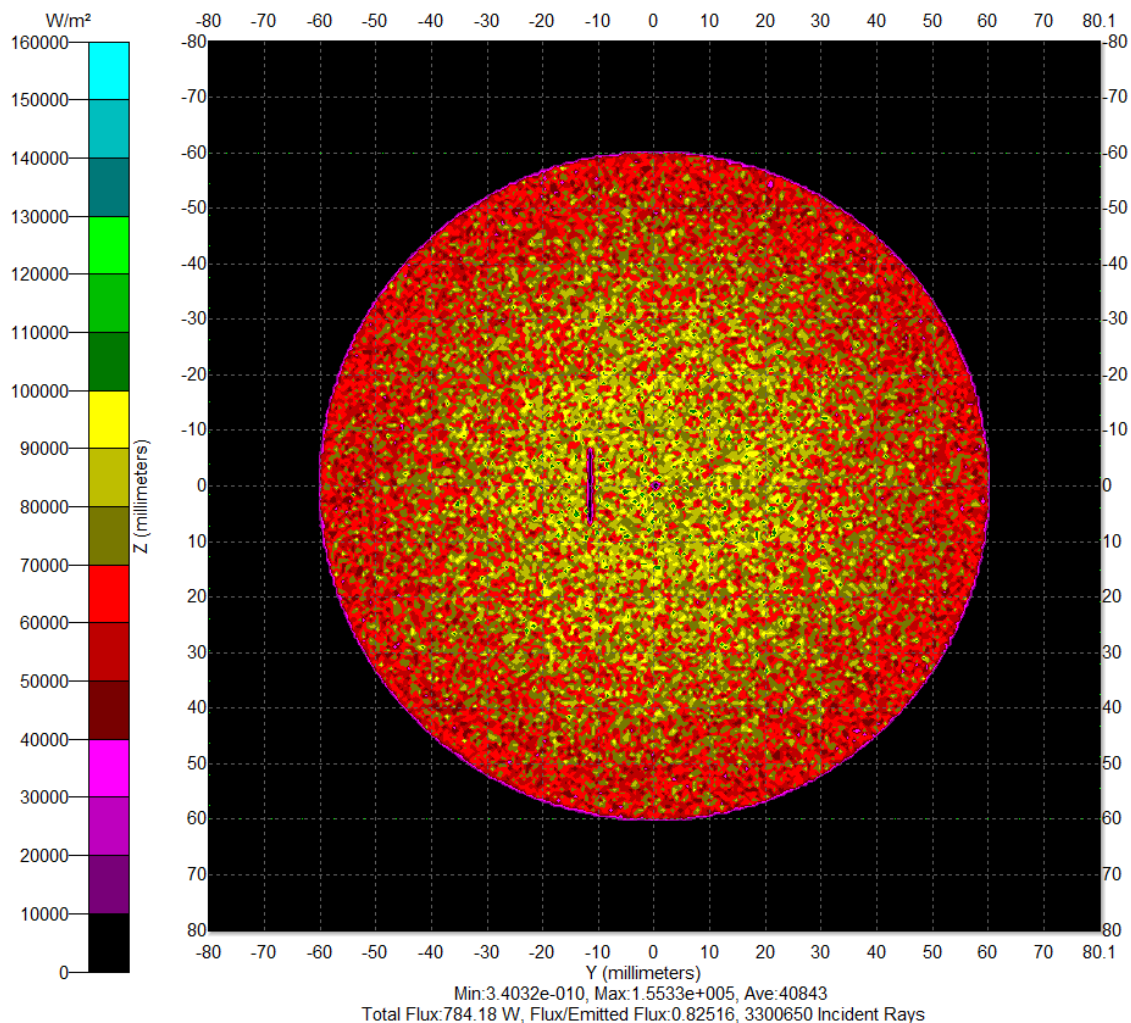


Εικόνα 47



Εικόνα 48

Το αποτέλεσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πάνω στον εναλλάκτη στην πλευρά που είναι το PV, για  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , είναι το ακόλουθο.



**Διάγραμμα 39**

Όπως φαίνεται στην εικόνα υπάρχει ένα κενό στο κέντρο, το οποίο είναι σχεδόν κυκλικό με ακτίνα της τάξης των 300μm και οφείλεται στη σκίαση του δευτερεύοντος ανακλαστή. Υπάρχει ακόμα ένα δεύτερο ορθογωνικό κενό διαστάσεων 12,6mm\*0,5mm, το οποίο οφείλεται στη σκίαση που προκαλεί ο εναλλάκτης.

### Επιλογή

Δεδομένου ότι τα ηλιακά κελιά συνδέονται μεταξύ τους είτε σε σειρά είτε παράλληλα, όταν κάποιο κελί δε δέχεται ανάλογη ακτινοβολία με τα υπόλοιπα τότε επηρεάζει την τάση (αν είναι συνδεδεμένα παράλληλα) ή το ρεύμα (αν είναι συνδεδεμένα σε σειρά) και των υπολοίπων, με συνέπεια και στις δύο περιπτώσεις να μειώνεται η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τη διάταξη.

Όσον αφορά τις διαστάσεις των triple junction υπάρχουν εταιρίες, όπως η emcore, οι οποίες παράγουν ηλιακά κελιά διαστάσεων 5,5mm\*5,5mm και 10mm\*10mm.

Άρα αν επιλεγεί η 1<sup>η</sup> διάταξη δε θα πρέπει να τοποθετηθούν κελιά στο ορθογωνικό κενό που εμφανίζεται στη μέση, αλλά μόνο στο υπόλοιπο χωρίο του κύκλου που φωτίζεται και έχει ακτίνα 60mm . Αν επιλεγθεί η δεύτερη διάταξη μπορούν να τοποθετηθούν ηλιακά κελιά σε όλο το χωρίο του κύκλου χωρίς να υπάρχει μείωση της ηλεκτρικής ισχύς, καθώς το εμβαδόν της σκίασης



(12mm\*0.9mm και 300μm ακτίνα στο κέντρο) είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο των ηλιακών κελιών.

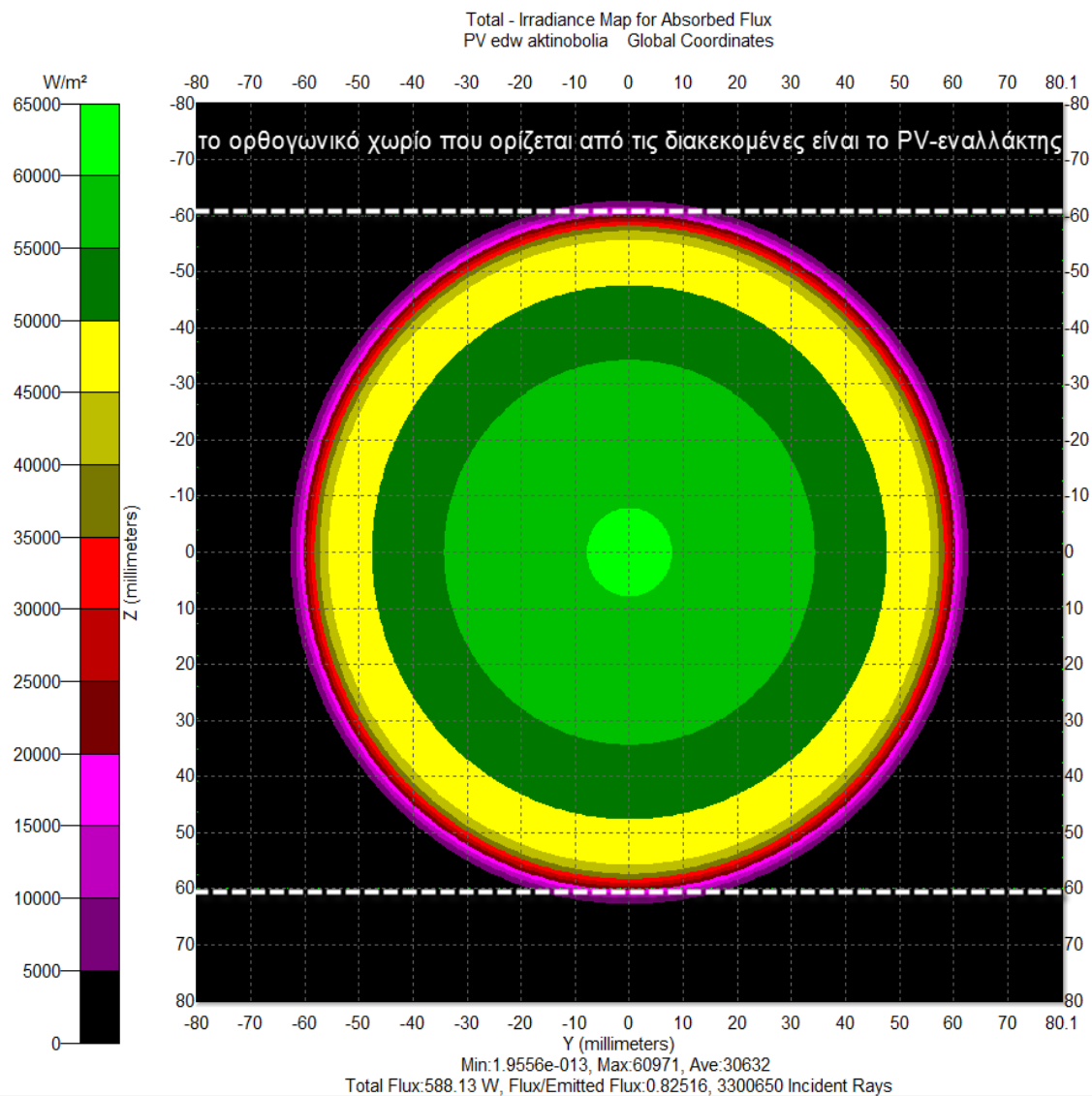
Αρα επιλέγεται η 2<sup>η</sup> διάταξη προς μελέτη.

### 4.3 Μελέτη διάταξης με δύο ανακλαστές

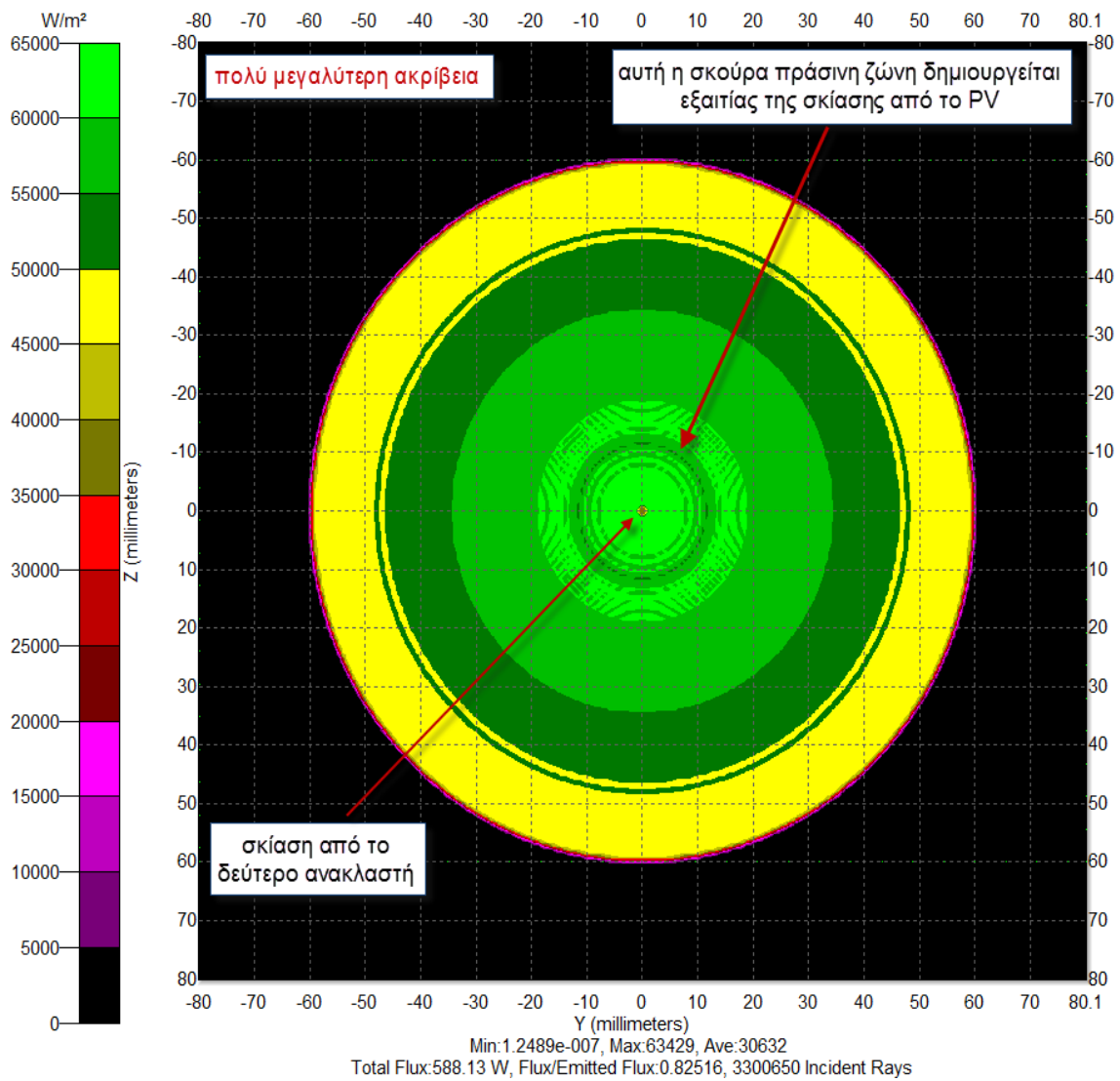
Για τη διάταξη με τους δύο ανακλαστές θα πραγματοποιηθεί ανάλυση για ακτινοβολία από τον ήλιο 750W/m<sup>2</sup>, 1000W/m<sup>2</sup> και 1250W/m<sup>2</sup>. Σε κάθε περίπτωση θα βλέπουμε την ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό πάνελ (PV) και την ισχύ που θα καταλήξει προς εκμετάλλευση από τον εναλλάκτη, δεδομένης της θεώρησης που έχουμε κάνει ότι όλα τα solar cells θα έχουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 28%. Αρα το υπολειπόμενο 72% της ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται το PV είναι θερμότητα που θα απάγεται με τη χρήση του εναλλάκτη.

#### 750W/m<sup>2</sup>

Το φωτοβολταϊκό δέχεται την ακόλουθη ακτινοβολία:

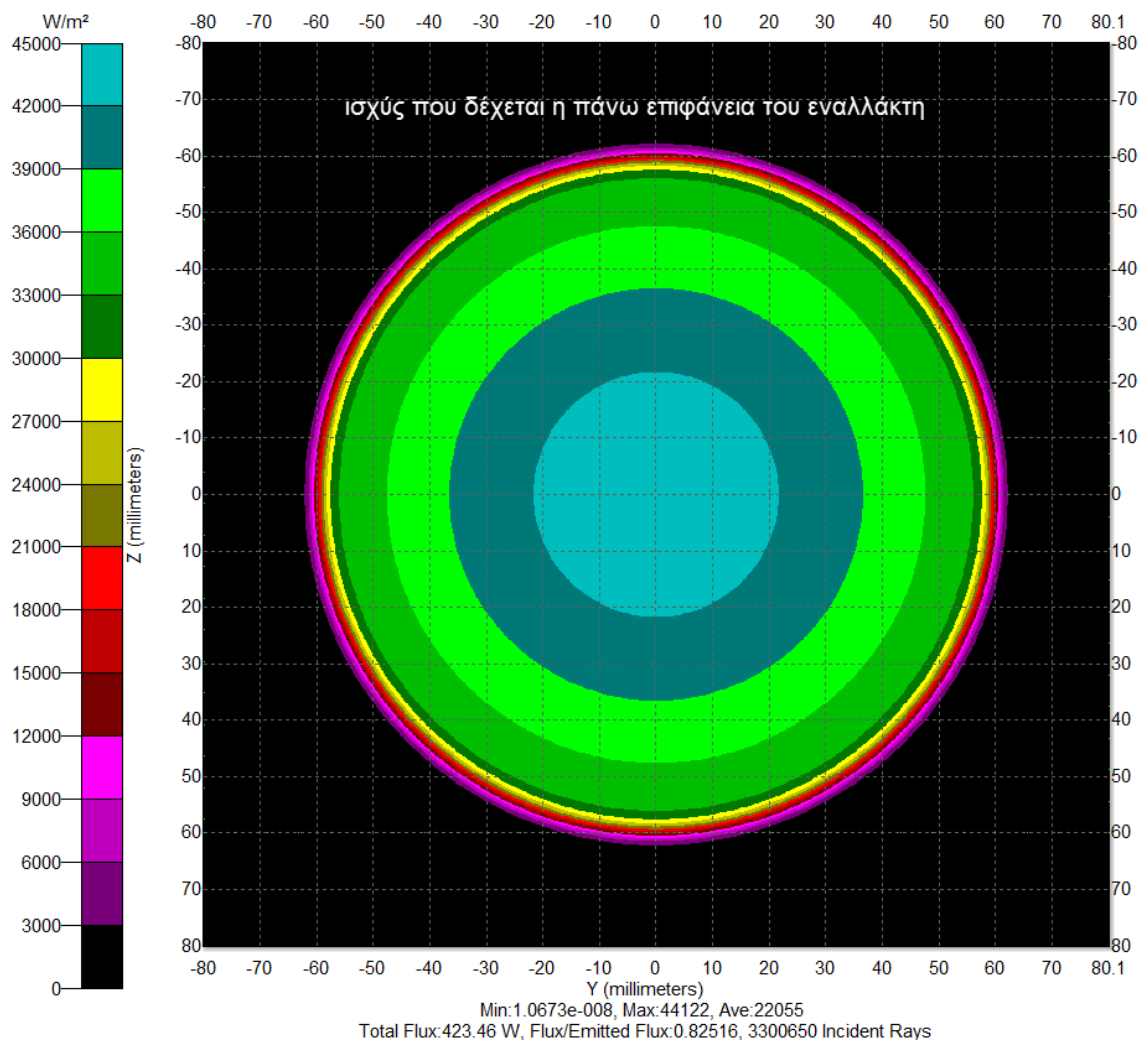


Διάγραμμα 40



Διάγραμμα 41

Η ισχύς που καταλήγει ως θερμότητα στον εναλλάκτη με τη θεώρηση ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού είναι 28%(δηλαδή το 72% της προσπίπτουσας ισχύς από τον ήλιο), είναι η ακόλουθη:



Διάγραμμα 42

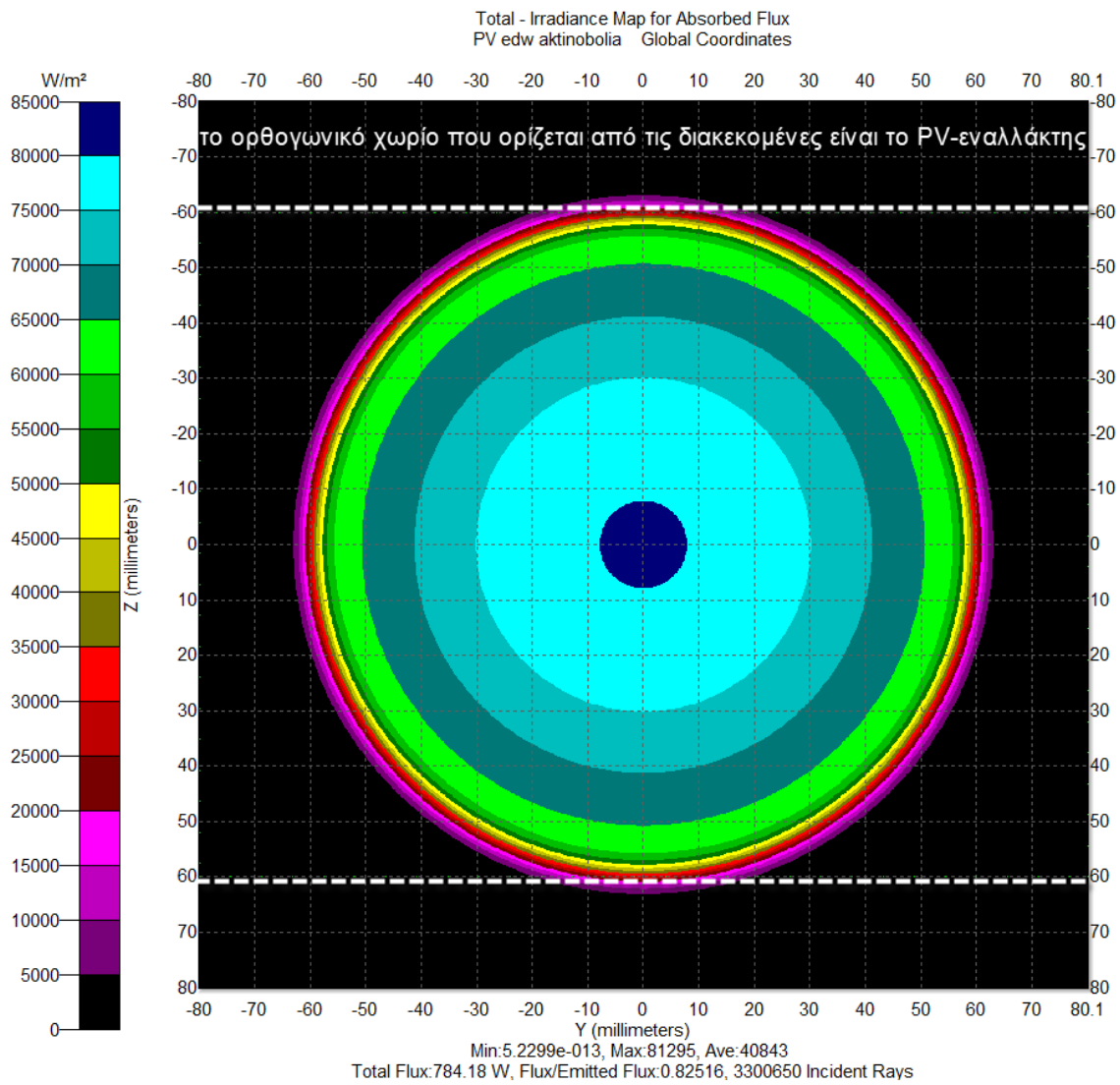
Παρατηρούμε τις ζώνες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

1. 0mm-21,8mm→43.500W/m<sup>2</sup>→66W
2. 21,8mm-36,5mm→40.500 W/m<sup>2</sup>→110W
3. 36,5mm-47,6mm→37.500 W/m<sup>2</sup>→111W
4. 47,6mm-55,8mm→34.500 W/m<sup>2</sup>→92W
5. 55,8mm-57,5mm→31.500 W/m<sup>2</sup>→20W
6. 57,5mm-58,2mm→28.500 W/m<sup>2</sup>→8W
7. 58,2mm-58,9mm→24.000 W/m<sup>2</sup>→7W
8. 58,9mm-60mm→19.500 W/m<sup>2</sup>→9W

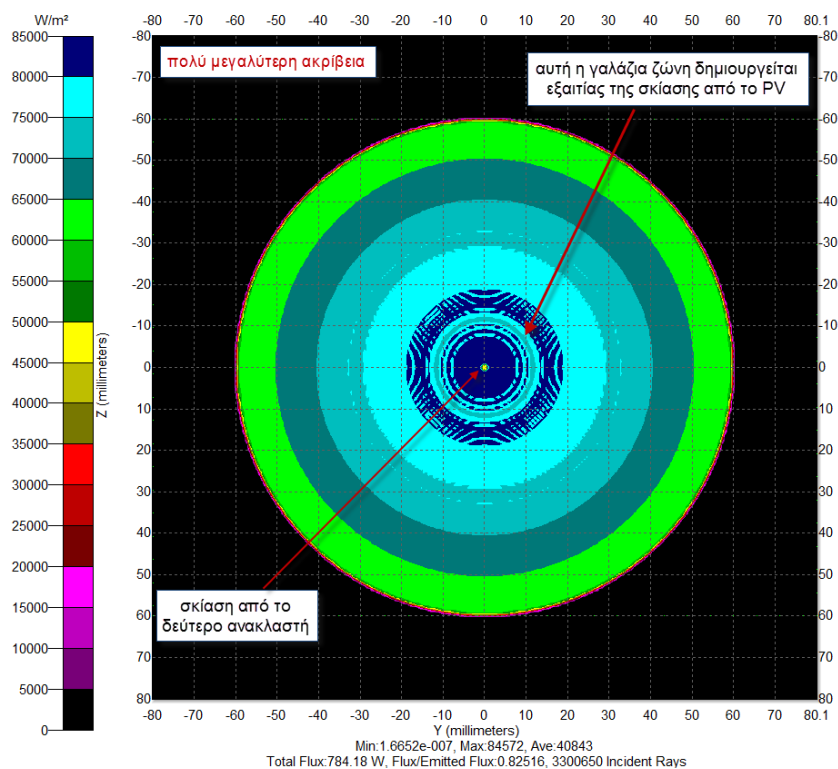
1000W/m<sup>2</sup>

Το φωτοβολταϊκό δέχεται την ακόλουθη ακτινοβολία:



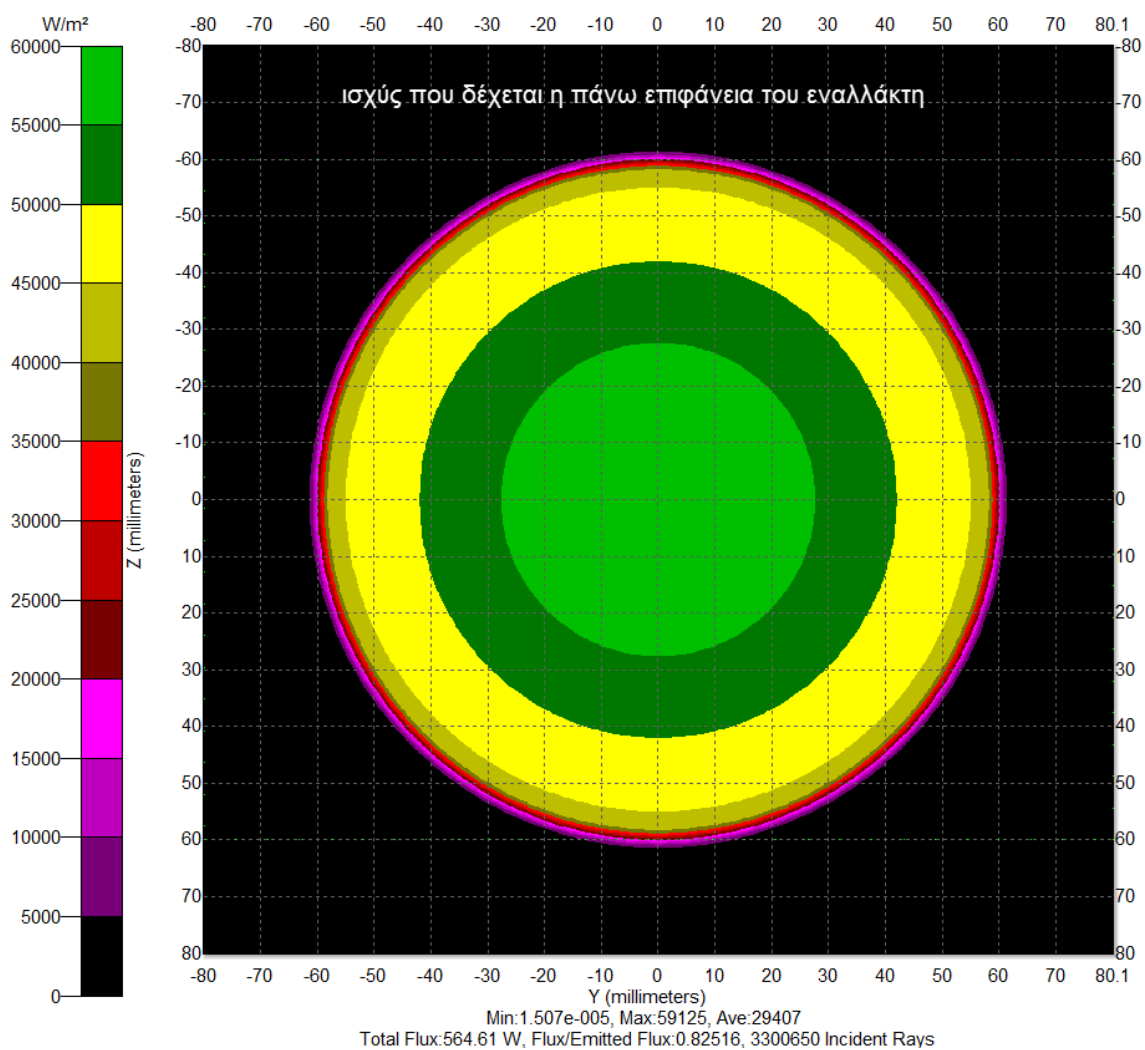


Διάγραμμα 43



Διάγραμμα 44

Η ισχύς που καταλήγει ως θερμότητα στον εναλλάκτη με τη θεώρηση ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού είναι 28%, είναι η ακόλουθη:



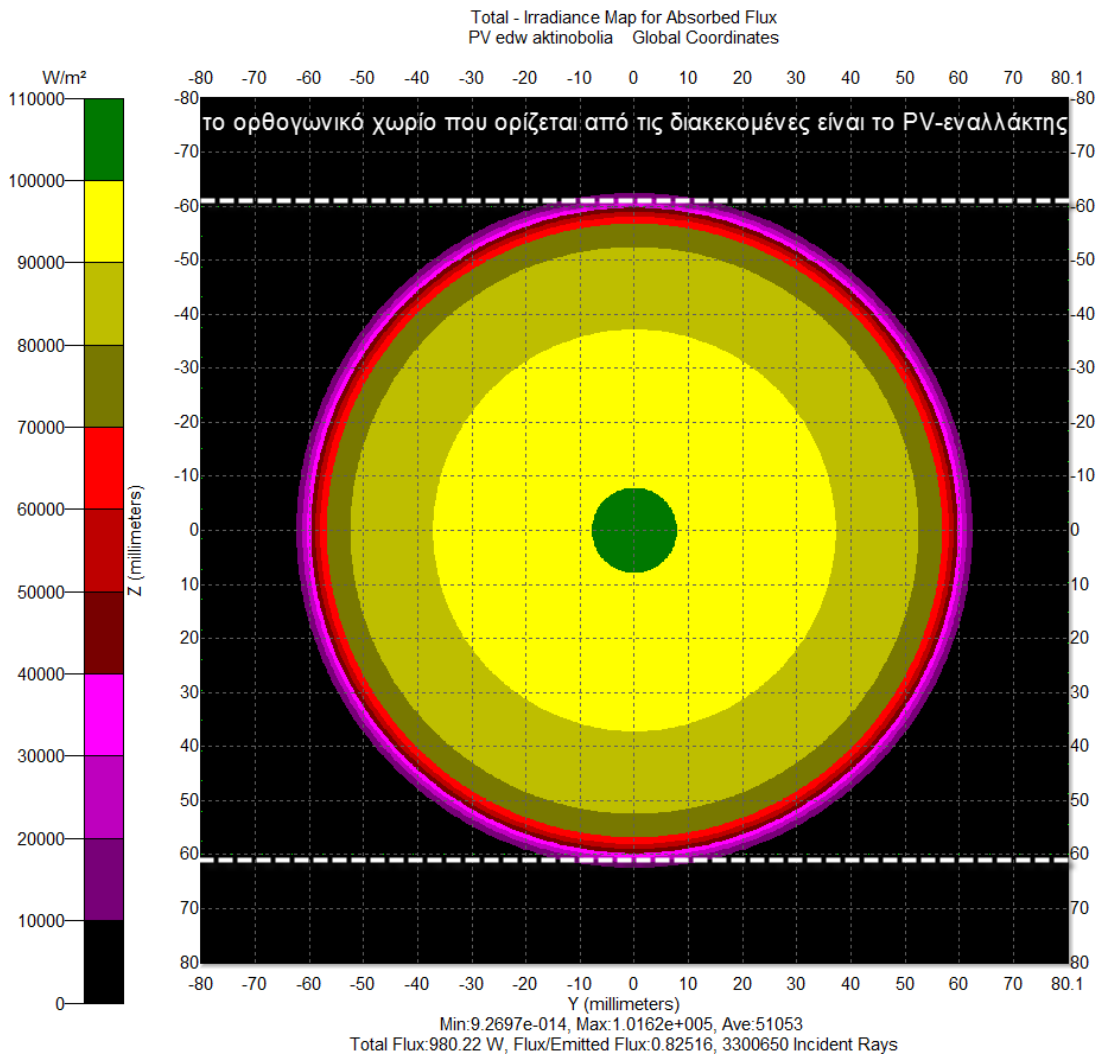
Διάγραμμα 45

Παρατηρούμε τις ζώνες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

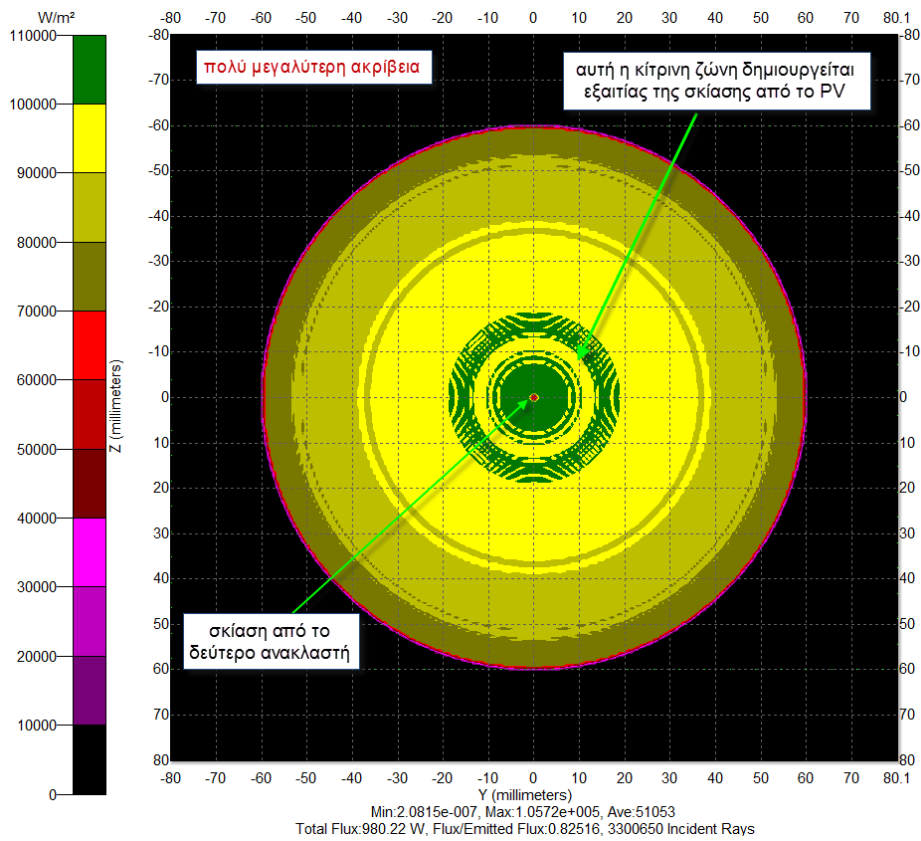
1. 0mm-27,5mm→57.500W/m<sup>2</sup>→137W
2. 27,5mm-42mm→52.500 W/m<sup>2</sup>→167W
3. 42mm-55mm→47.500 W/m<sup>2</sup>→189W
4. 55mm-58mm→42.500 W/m<sup>2</sup>→46W
5. 58mm-58,85mm→37.500 W/m<sup>2</sup>→12W
6. 58,85mm-60mm→32.500 W/m<sup>2</sup>→14W

1250W/m<sup>2</sup>

Το φωτοβολταϊκό δέχεται την ακόλουθη ακτινοβολία:

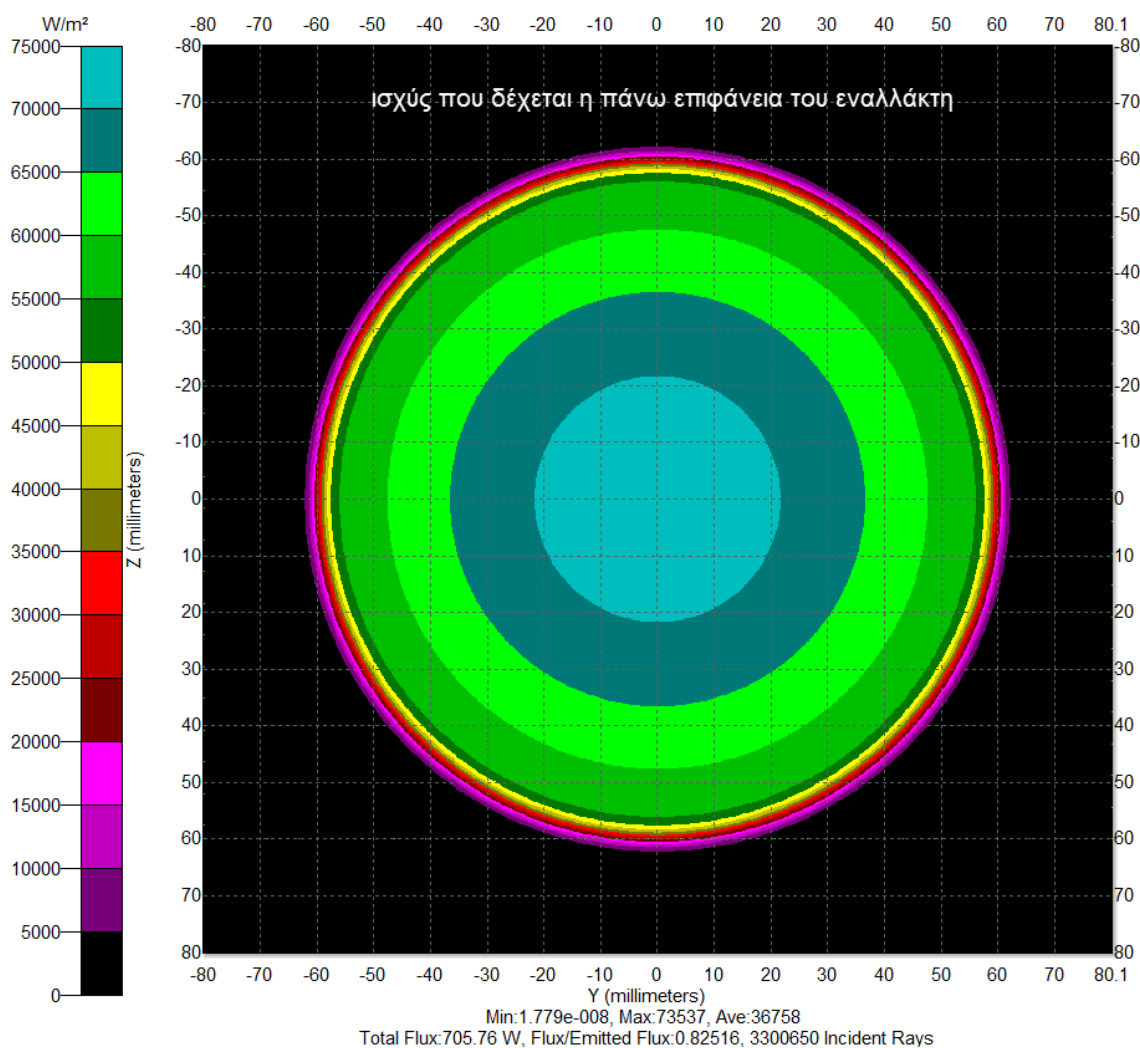


Διάγραμμα 46



Διάγραμμα 47

Η ισχύς που καταλήγει ως θερμότητα στον εναλλάκτη με τη θεώρηση ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού είναι 28%, είναι η ακόλουθη:



Διάγραμμα 48

Παρατηρούμε τις ζώνες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

1. 0mm-21,8mm→72.500W/m<sup>2</sup>→111W
2. 21,8mm-36,7mm→67.500 W/m<sup>2</sup>→187W
3. 36,7mm-47,8mm→62.500 W/m<sup>2</sup>→185W
4. 47,8mm-56mm→57.500 W/m<sup>2</sup>→155W
5. 56mm-57,3mm→52.500 W/m<sup>2</sup>→26W
6. 57,3mm-58,2mm→47.500 W/m<sup>2</sup>→16W
7. 58,2mm-58,9mm→40.000 W/m<sup>2</sup>→11W
8. 58,9mm-60mm→32.500 W/m<sup>2</sup>→14W

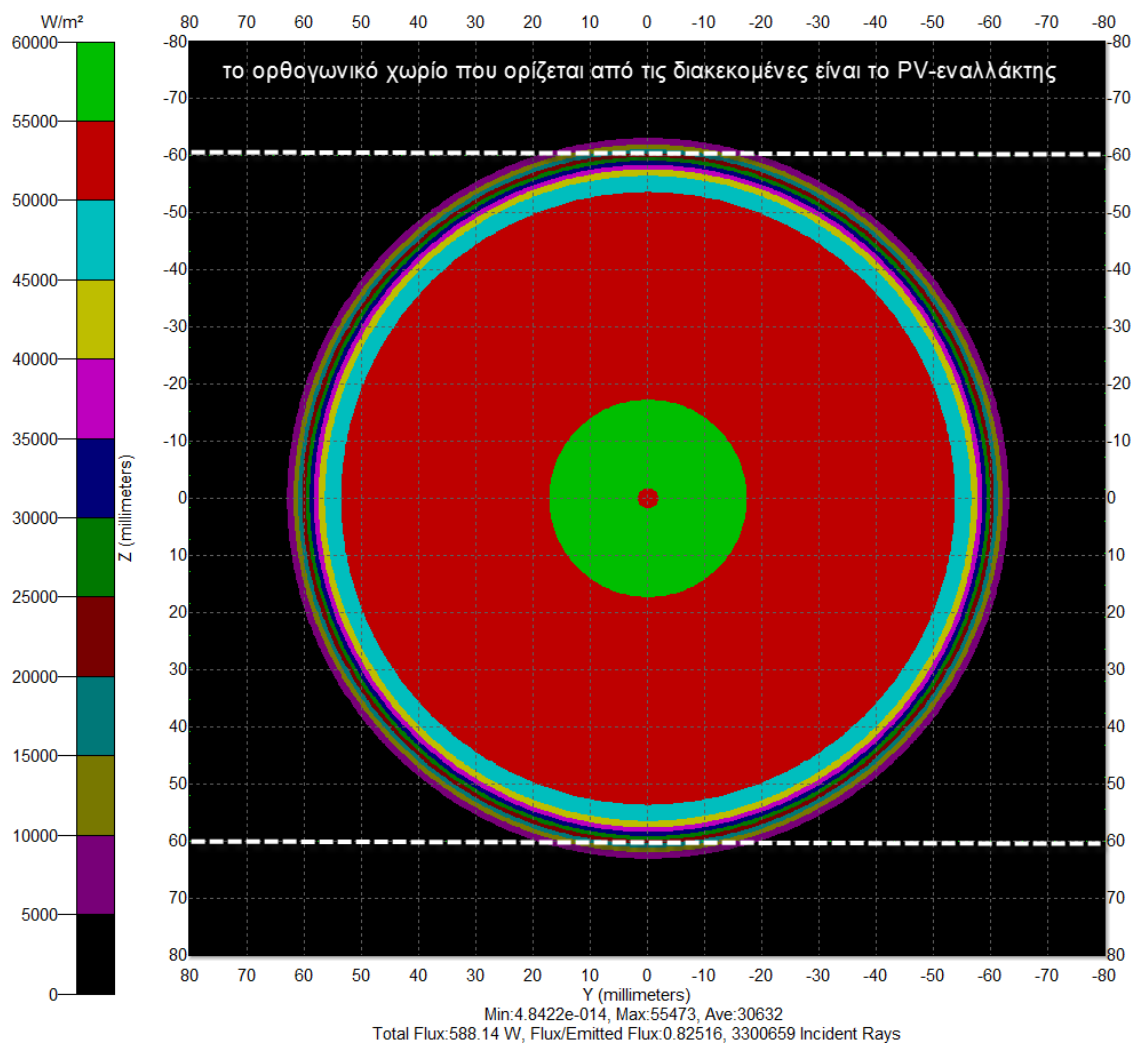
Η 3<sup>η</sup> διάταξη είναι σαν σχεδιασμός ίδια με τη δεύτερη, αλλά αλλάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραβολικού συλλέκτη.

Χρησιμοποιείται πιάτο με:

- διάμετρο 1m
- $\Psi_{rim}=20,25^{\circ}$
- Focal length  $f=1,4m$
- $X=162,64mm$
- Εμβαδό ανακλαστικής επιφάνειας  $e_{anakl}=0,7916m^2$
- Άνοιγμα συλλέκτη που δέχεται την ακτινοβολία  $e_{con}=0,7854 m^2$
- Το ύψος της παραβολής είναι  $h=46,428mm$
- Ο λόγος συγκέντρωσης  $CR=69,44$

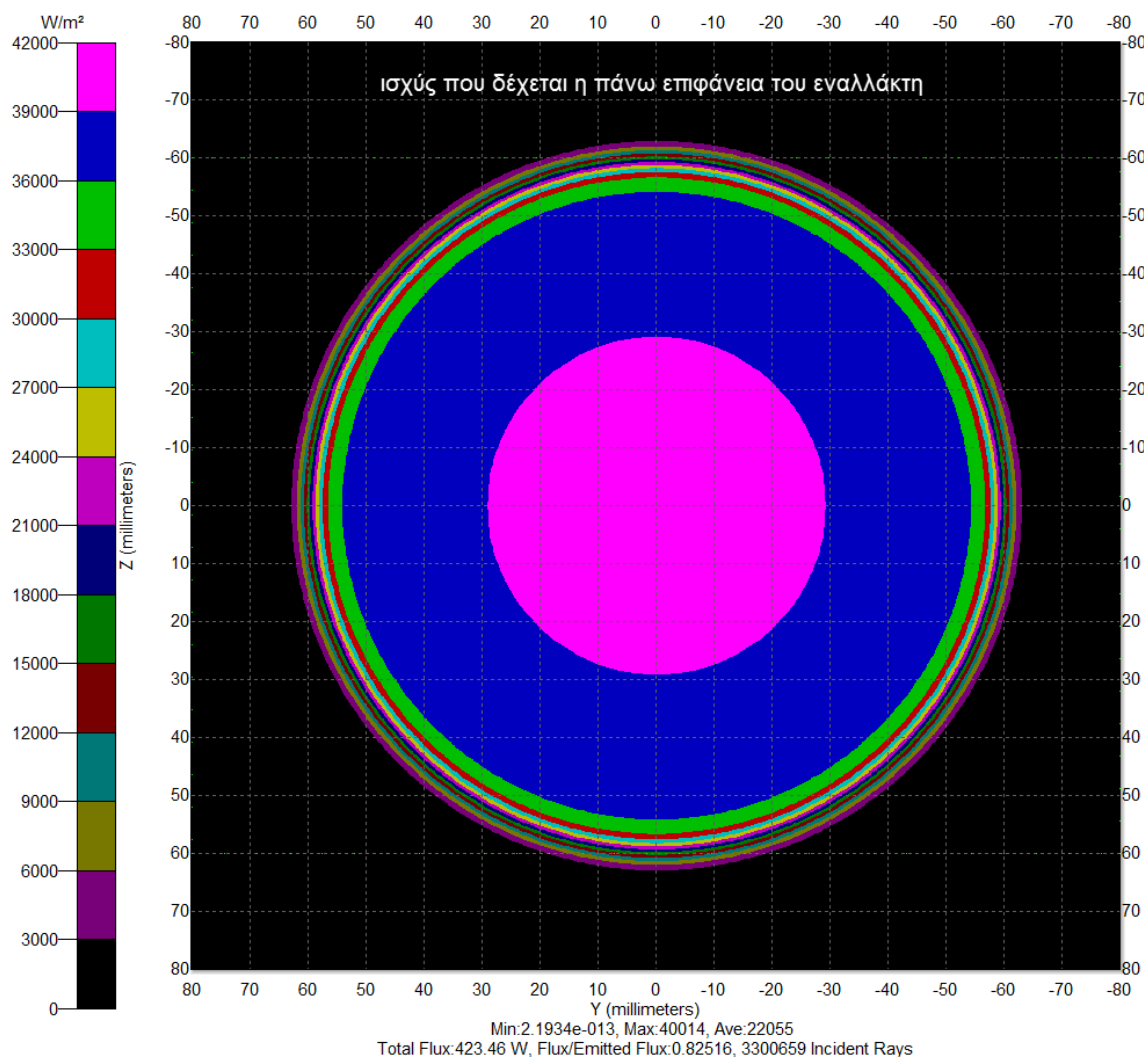
750W/m<sup>2</sup>

Το φωτοβολταϊκό δέχεται την ακόλουθη ακτινοβολία:



Διάγραμμα 49

Η ισχύς που καταλήγει ως θερμότητα στον εναλλάκτη με τη θεώρηση ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού είναι 28%(δηλαδή το 72% της προσπίπτουσας ισχύς από τον ήλιο), είναι η ακόλουθη:



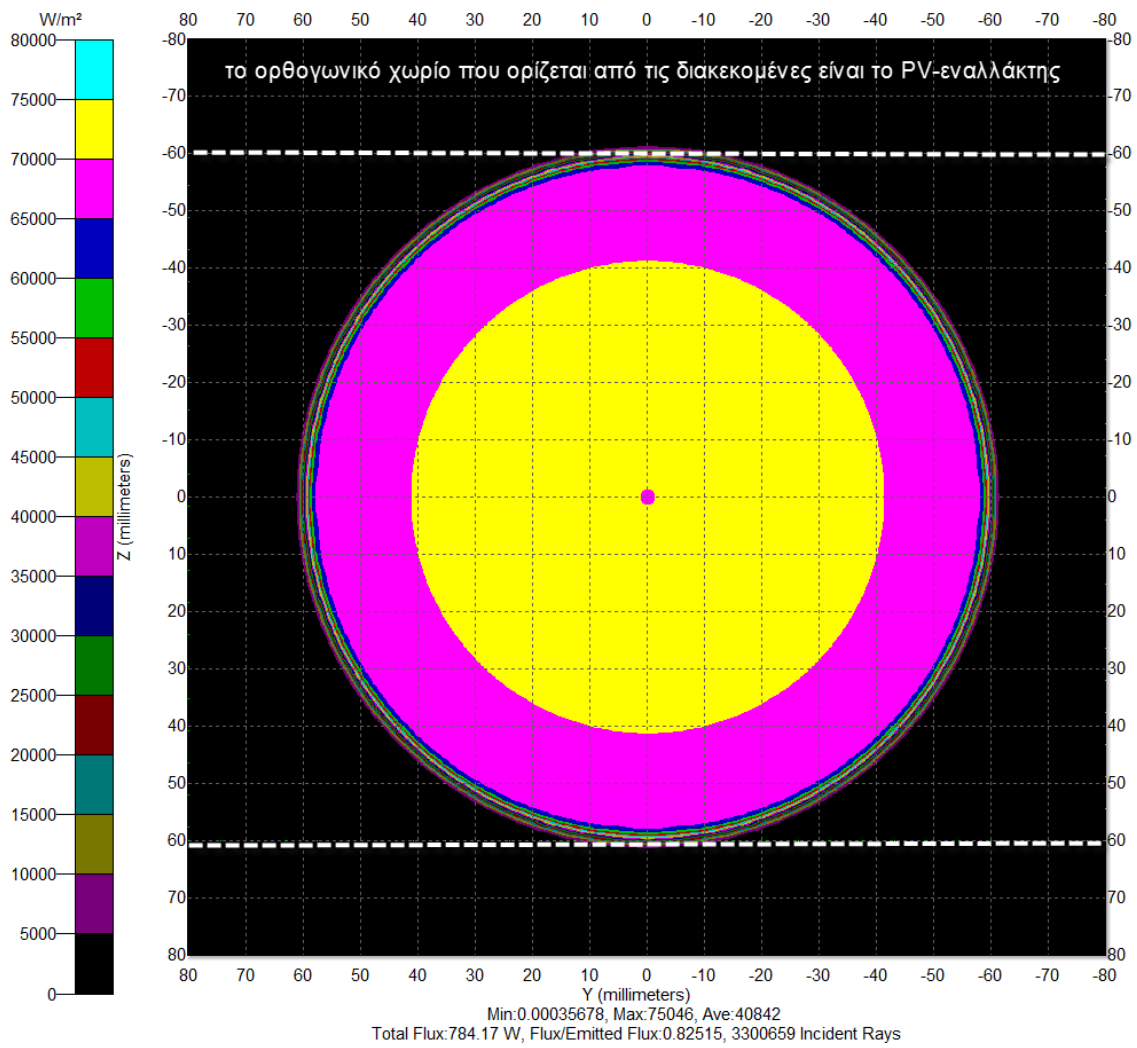
Διάγραμμα 50

Παρατηρούμε τις ζώνες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

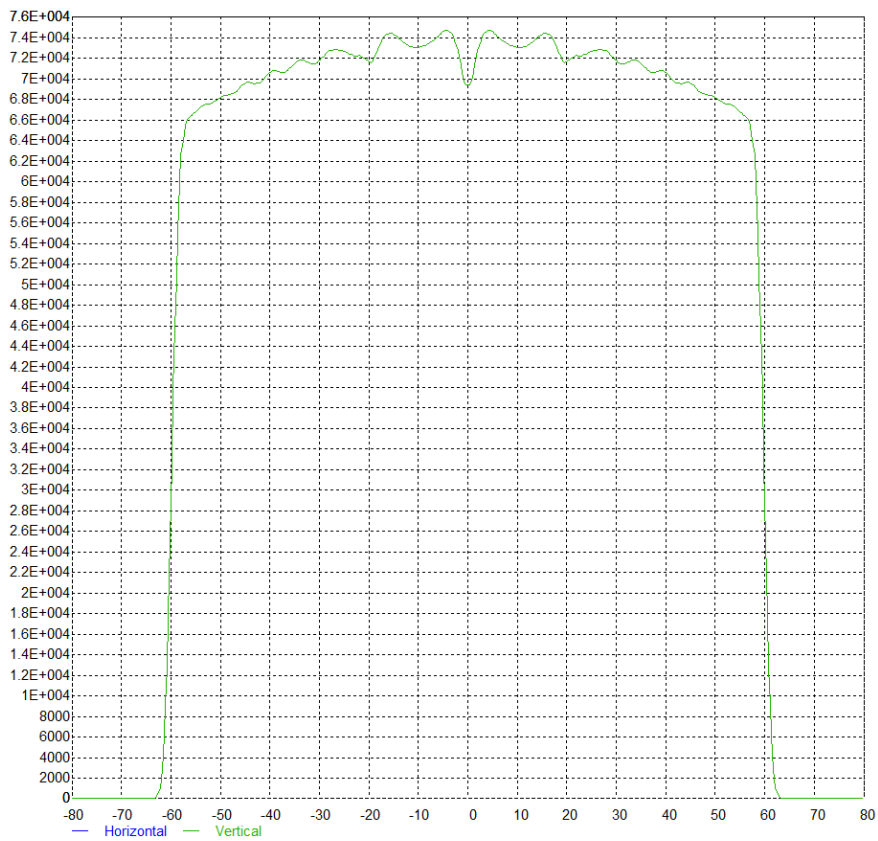
1. 0mm-29,26mm→40.500W/m<sup>2</sup>→114W
2. 29,26mm-55,2mm→37.500 W/m<sup>2</sup>→262W
3. 55,2mm-56,87mm→34.500 W/m<sup>2</sup>→25W
4. 56,87mm-57,75mm→31.500W/m<sup>2</sup>→7W
5. 57,75mm-58,41mm→28.500 W/m<sup>2</sup>→5W
6. 58,41mm-59,5mm→24.000 W/m<sup>2</sup>→6,5W
7. 59,5mm-60mm→21.000 W/m<sup>2</sup>→3W

1000W/m<sup>2</sup>

Το φωτοβολταϊκό δέχεται την ακόλουθη ακτινοβολία:



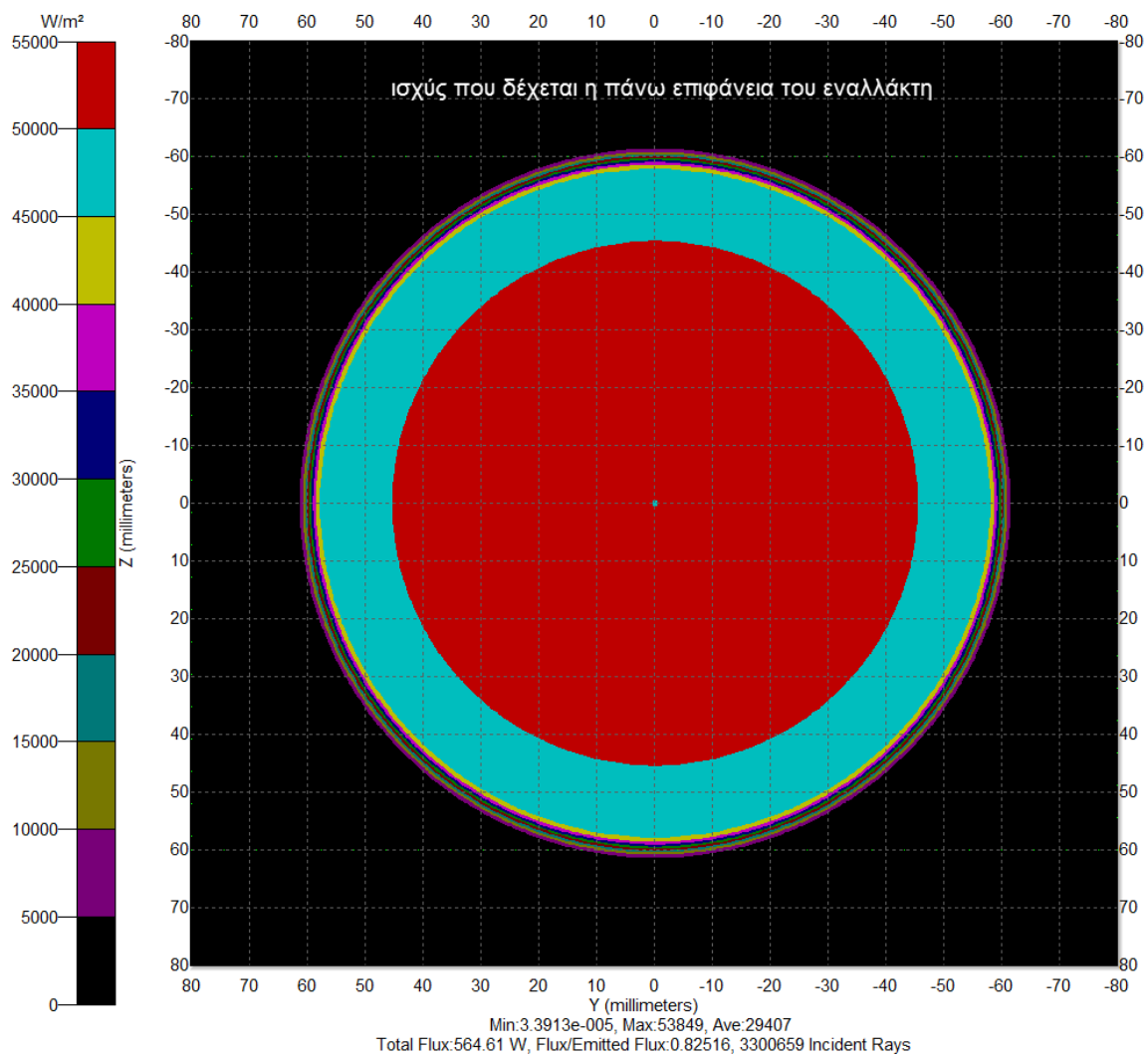
Διάγραμμα 51



Διάγραμμα 52



Η ισχύς που καταλήγει ως θερμότητα στον εναλλάκτη με τη θεώρηση ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού είναι 28%, είναι η ακόλουθη:



Διάγραμμα 53

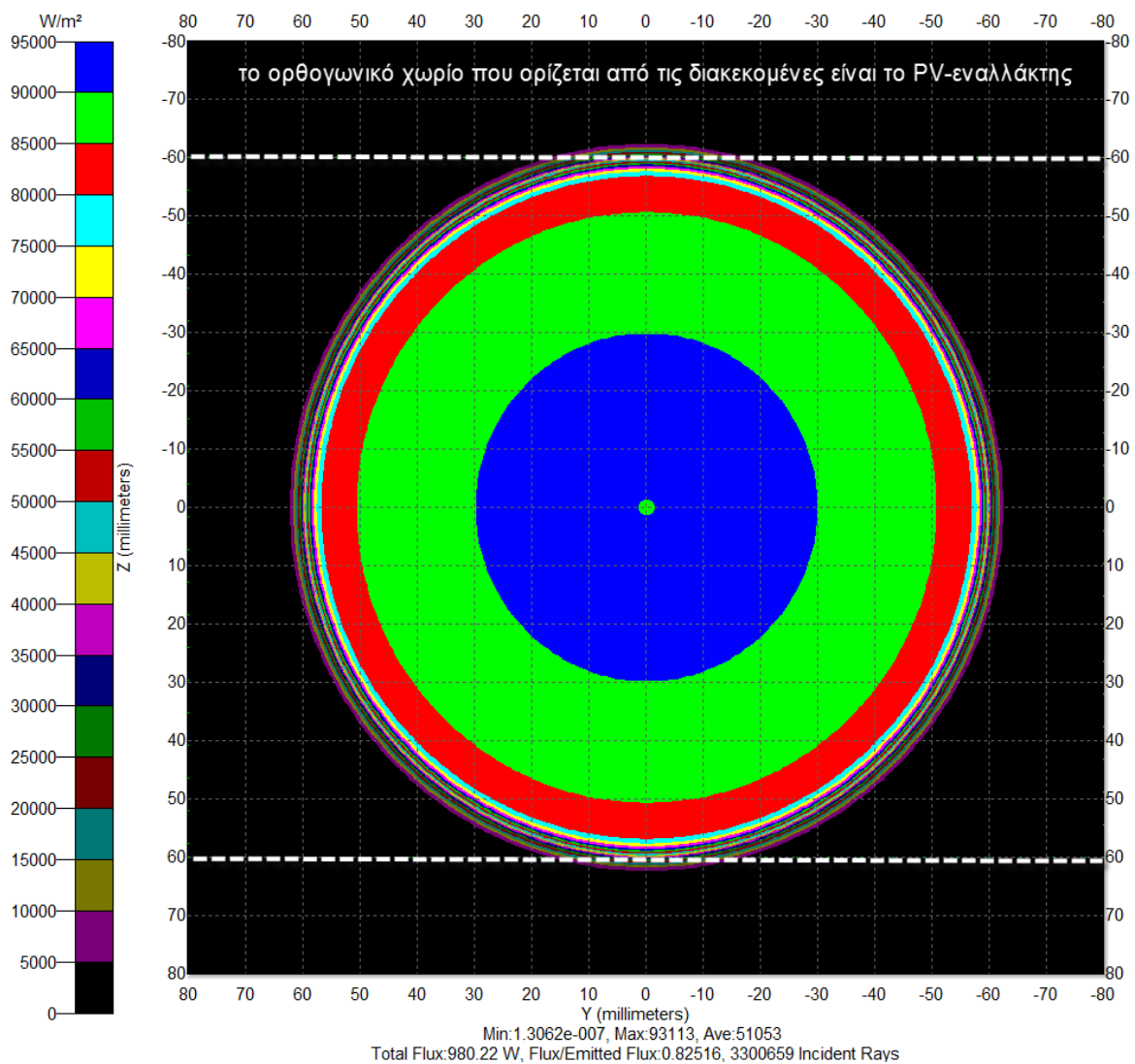
Παρατηρούμε τις ζώνες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

1. 0mm-45,5mm→52.500W/m<sup>2</sup>→342W
2. 45,5mm-58,2mm→47.500 W/m<sup>2</sup>→197W
3. 58,2mm-59,2mm→42.500 W/m<sup>2</sup>→16W
4. 59,2mm-60mm→37.500/m<sup>2</sup>→7W

1250W/m<sup>2</sup>

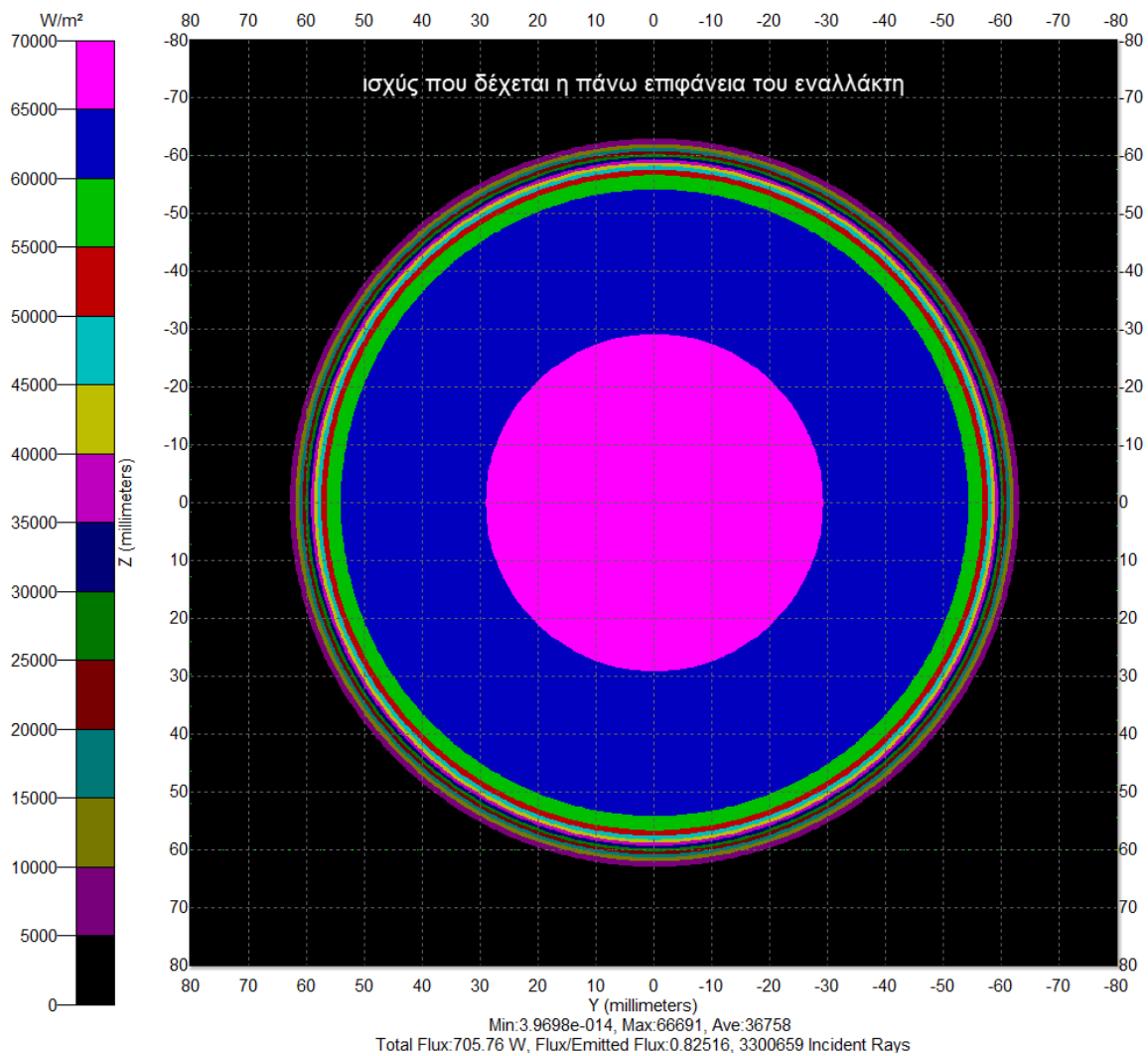
Το φωτοβολταϊκό δέχεται την ακόλουθη ακτινοβολία:





**Διάγραμμα 54**

Η ισχύς που καταλήγει ως θερμότητα στον εναλλάκτη με τη θεώρηση ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού είναι 28%, είναι η ακόλουθη:



Διάγραμμα 55

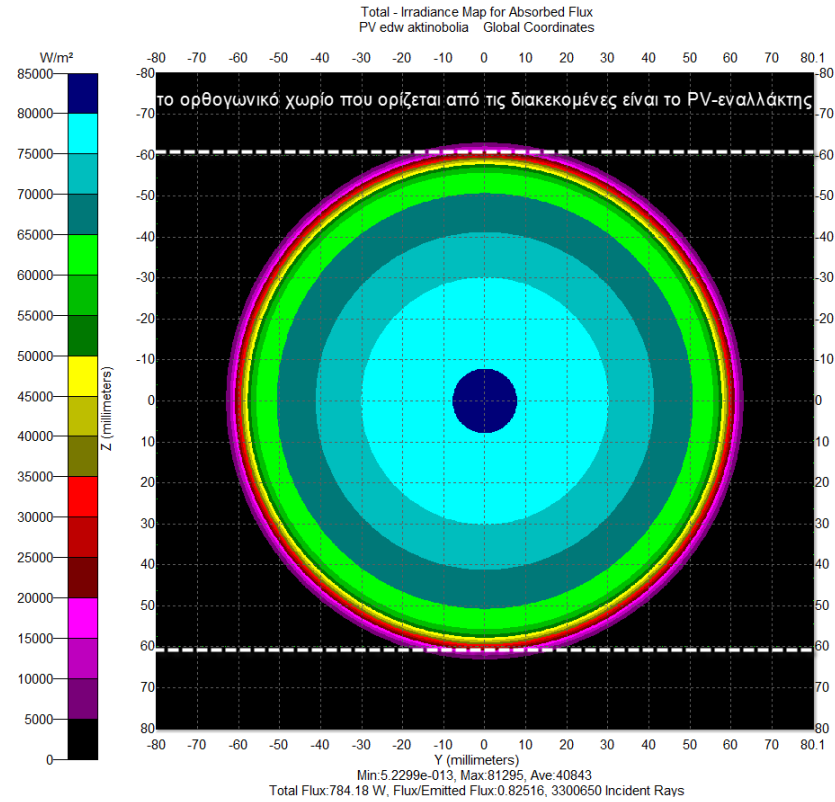
Παρατηρούμε τις ζώνες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

1. 0mm-29,48mm→67.500W/m<sup>2</sup>→188W
2. 29,48mm-55,34mm→62.500 W/m<sup>2</sup>→436W
3. 55,34mm-58,2mm→57.500 W/m<sup>2</sup>→63W
4. 58,2mm-58,5mm→52.500 W/m<sup>2</sup>→3,5W
5. 58,5mm-59mm→47.500 W/m<sup>2</sup>→5W
6. 59mm-59,5mm→42.500 W/m<sup>2</sup>→4,5W
7. 59,5mm-60mm→37.500 W/m<sup>2</sup>→4W

### Συμπέρασμα

Βλέποντας την κατανομή της ακτινοβολίας για 1000W/m<sup>2</sup> πάνω στο φωτοβολταϊκό τόσο για τον παραβολικό συλλέκτη με focal length 0,9m, όσο και για αυτόν με 1,4m, παρατηρούμε:

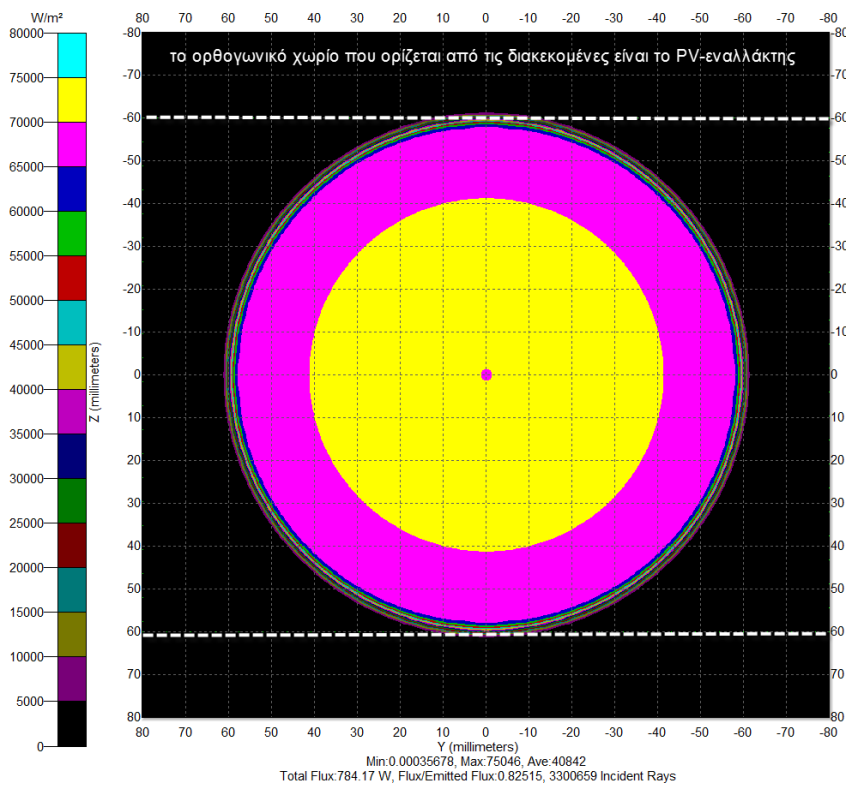
Συλλέκτης με focal length 0,9m



Διάγραμμα 56

Υπάρχουν πέντε βασικές περιοχές που δέχονται ακτινοβολία από  $85000\text{W/m}^2$  μέχρι  $65000\text{W/m}^2$ .

Συλλέκτης με focal length 1,4m

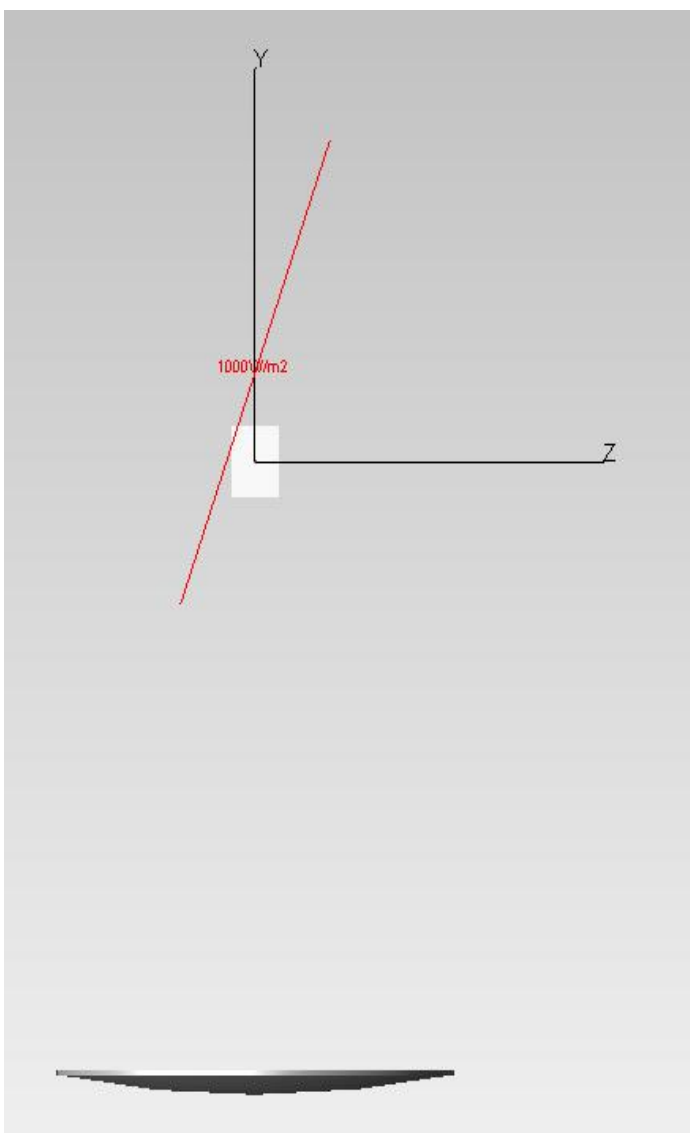


Διάγραμμα 57

Υπάρχουν δύο βασικές περιοχές που δέχονται ακτινοβολία από  $75000\text{W/m}^2$  μέχρι  $65000\text{W/m}^2$ .

Σαφώς λοιπόν η κατανομή της ακτινοβολίας πάνω στο φωτοβολταϊκό, που προκύπτει από τον παραβολικό συλλέκτη με focal length  $1,4\text{m}$ , είναι πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη του παραβολικού συλλέκτη με focal length  $0,9\text{m}$ . Αυτό οφείλεται στο ότι ο παραβολικός συλλέκτης με focal length  $1,4\text{m}$  και  $\psi_{\text{rim}}=20,25^\circ$  δίνει μικρότερες γωνίες ανάκλασης στις ακτίνες του ηλίου, ακτίνες οι οποίες ανακλώνται σε όλη την επιφάνειά του. Έτσι το πλήθος των ανακλώμενων ακτινών δεν έχει συγκλίνει αρκετά σε απόσταση  $\langle x \rangle$  από το σημείο εστίασης. Ο παραβολικός συλλέκτης με focal length  $0,9\text{m}$  και  $\psi_{\text{rim}}=31^\circ$  έχει πιο απότομη γεωμετρία, δίνοντας μεγαλύτερες γωνίες ανάκλασης στις ακτίνες του ήλιου που έχουν συγκεντρωθεί αρκετά σε απόσταση  $\langle x \rangle$  από το σημείο εστίασης.

#### 4.4 Ευαισθησία ως προς την παρακολούθηση της τροχιάς του ηλίου



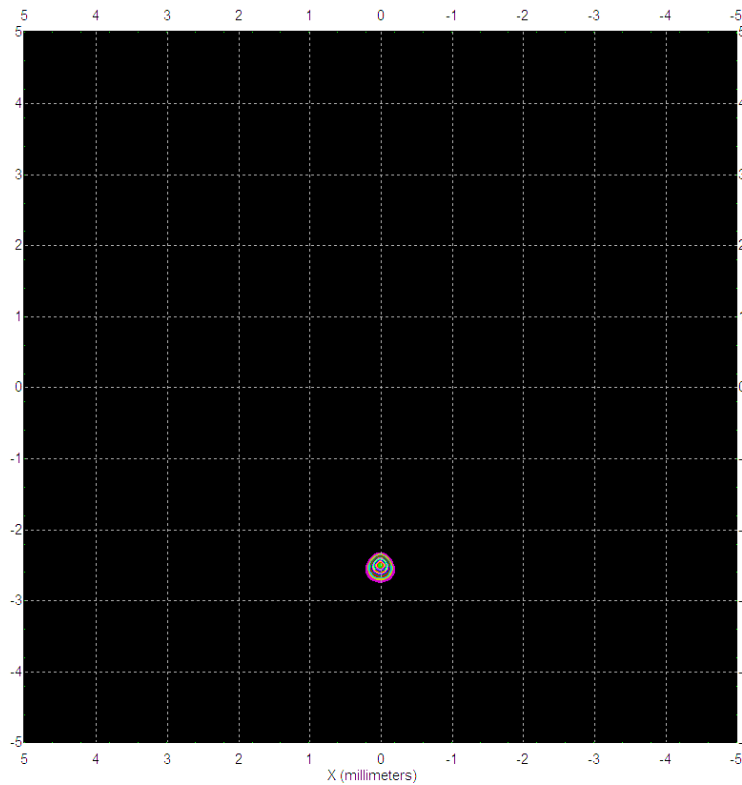
Πρέπει να τονίσου ότι οι συγκεντρωτικές διατάξεις απαιτούν πολύ ακριβή μηχανισμό για την παρακολούθηση του ηλίου. Αυτό φαίνεται και από την ανάλυση που ακολουθεί για το κάτοπτρο που έχει focal length  $1400\text{mm}$ .

Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις του δεύτερου ανακλαστή είναι  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ . Μπορεί όμως να αλλαχθούν με σχετικά μηδαμινή επίδραση στη συνολική ισχύ που δέχεται το κάτοπτρο και κατ' επέκταση το PV. Η ανάλυση που θα γίνει αφορά για προσπίπτουσα ακτινοβολία  $1000\text{W/m}^2$ .

Για να γίνει κατανοητή η φορά απόκλισης του ηλίου, στο αριστερό σχήμα φαίνεται η πηγή για απόκλιση  $70^\circ$ .

Εικόνα 49

### 0,1<sup>0</sup> μοίρες απόκλιση

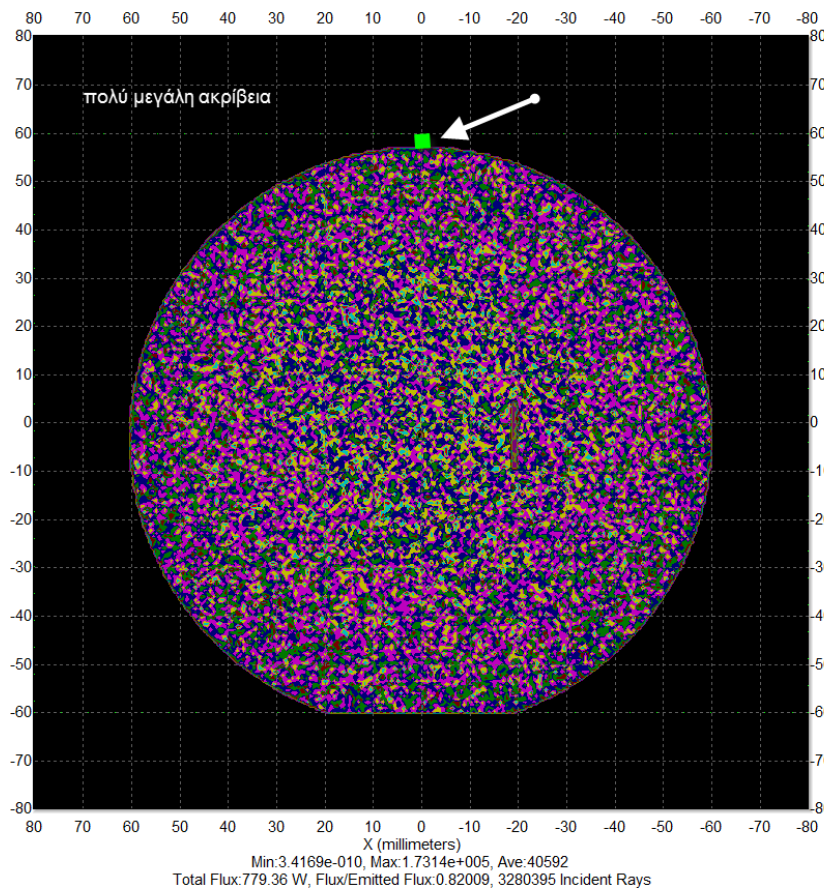


Για απόκλιση λοιπόν 0,1 μοιρών, η ακτινοβολία που βλέπει ο δεύτερος ανακλαστής στους τοπικούς του άξονες (είναι υπό κλίση 45<sup>0</sup>), φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.

Η απόκλιση που παρατηρείται για το σημείο εστίασης είναι 2,5mm.

Διάγραμμα 58

Ενώ η ακτινοβολία που βλέπει το PV είναι η ακόλουθη.

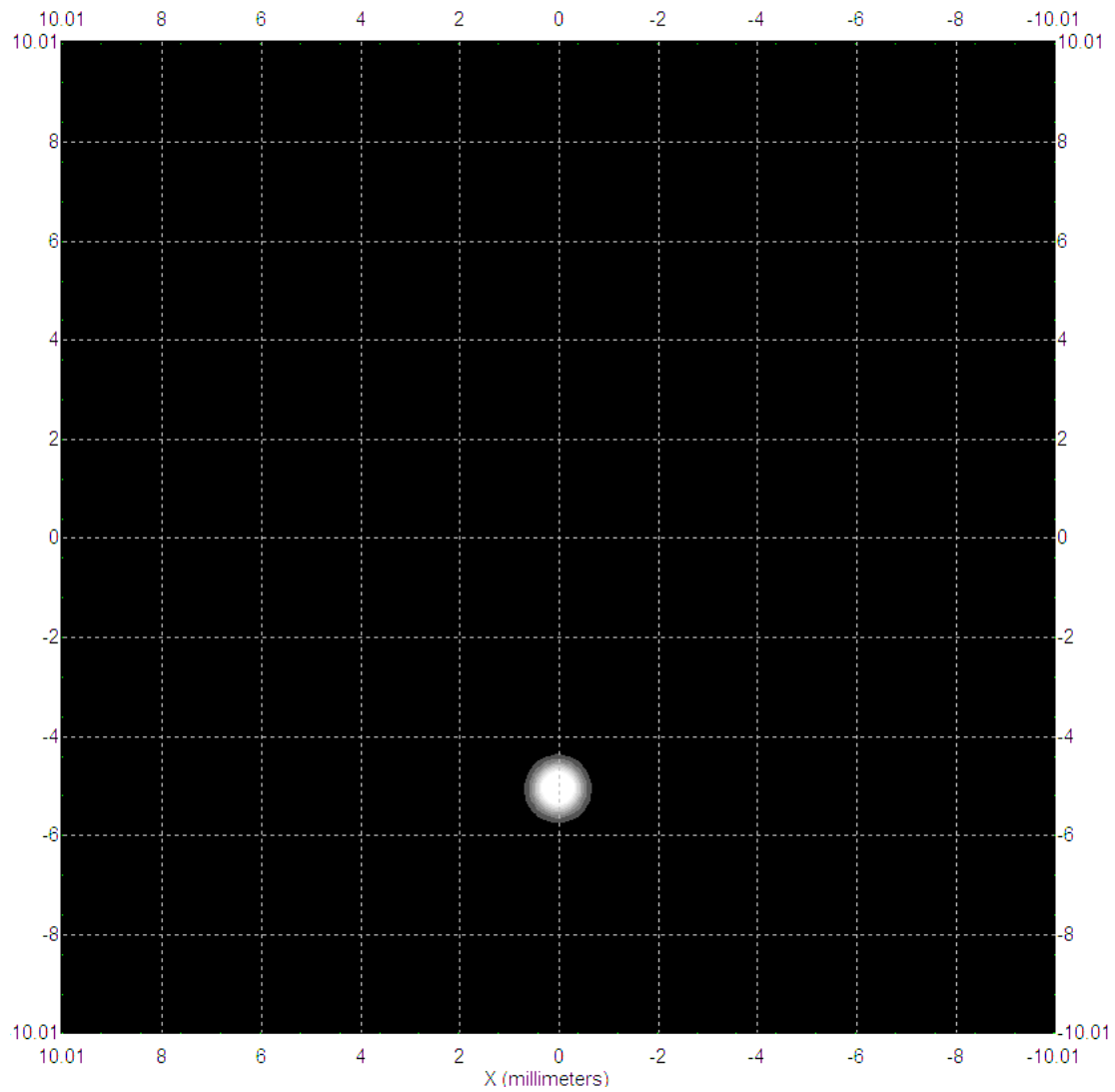


Διάγραμμα 59

Η απόκλιση είναι 3mm, ενώ η προσπίπτουσα ισχύς είναι 779,36W. Η ισχύς δηλαδή που χάνεται είναι 4,81W.

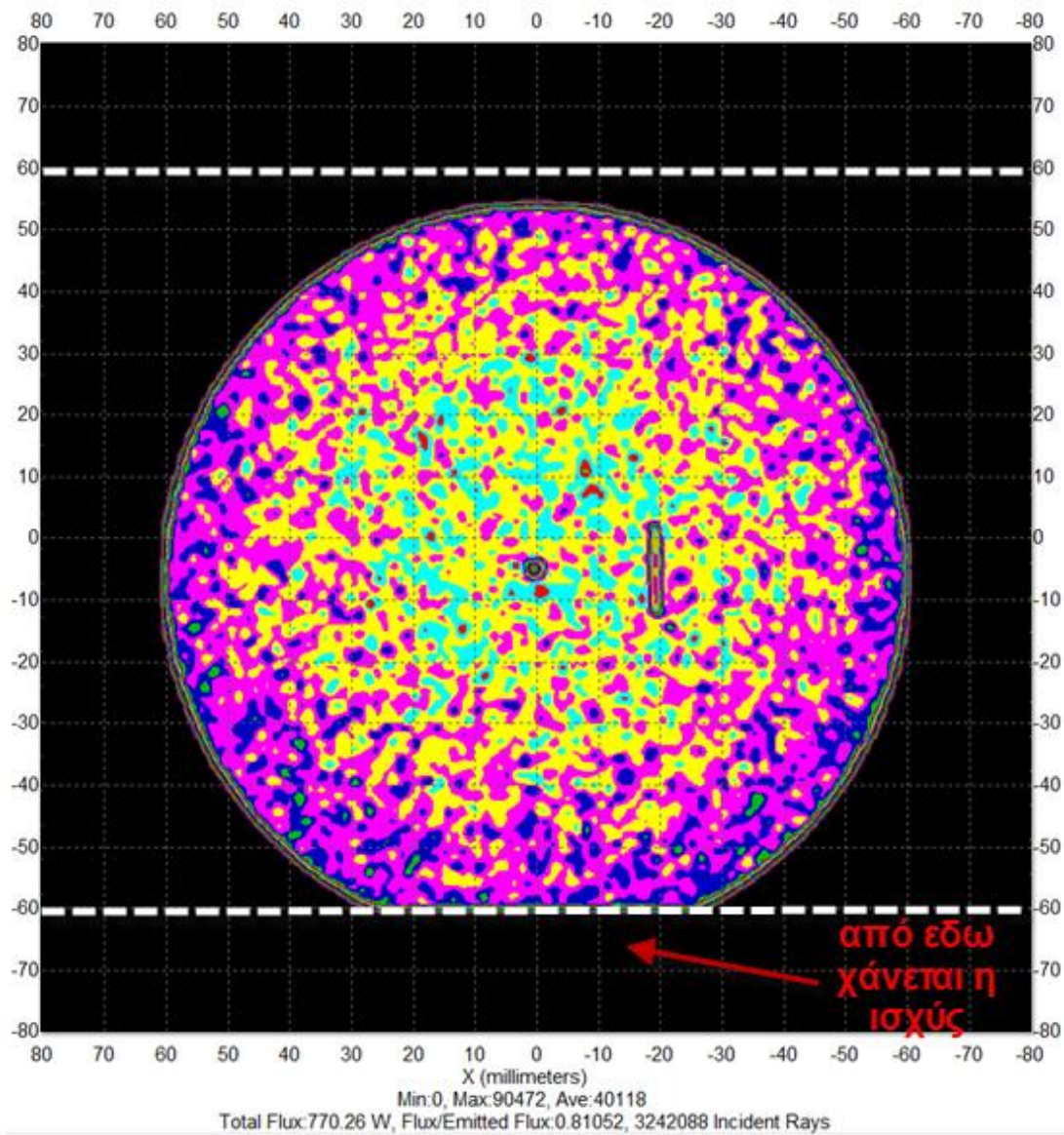
### 0,2<sup>o</sup> μοίρες απόκλιση

Για απόκλιση 0,2 μοίρες επανασχεδιάστηκε ο δεύτερος ανακλαστής με διαστάσεις 20mm\*20mm. Ομοίως φαίνονται οι αποκλίσεις.



Διάγραμμα 60

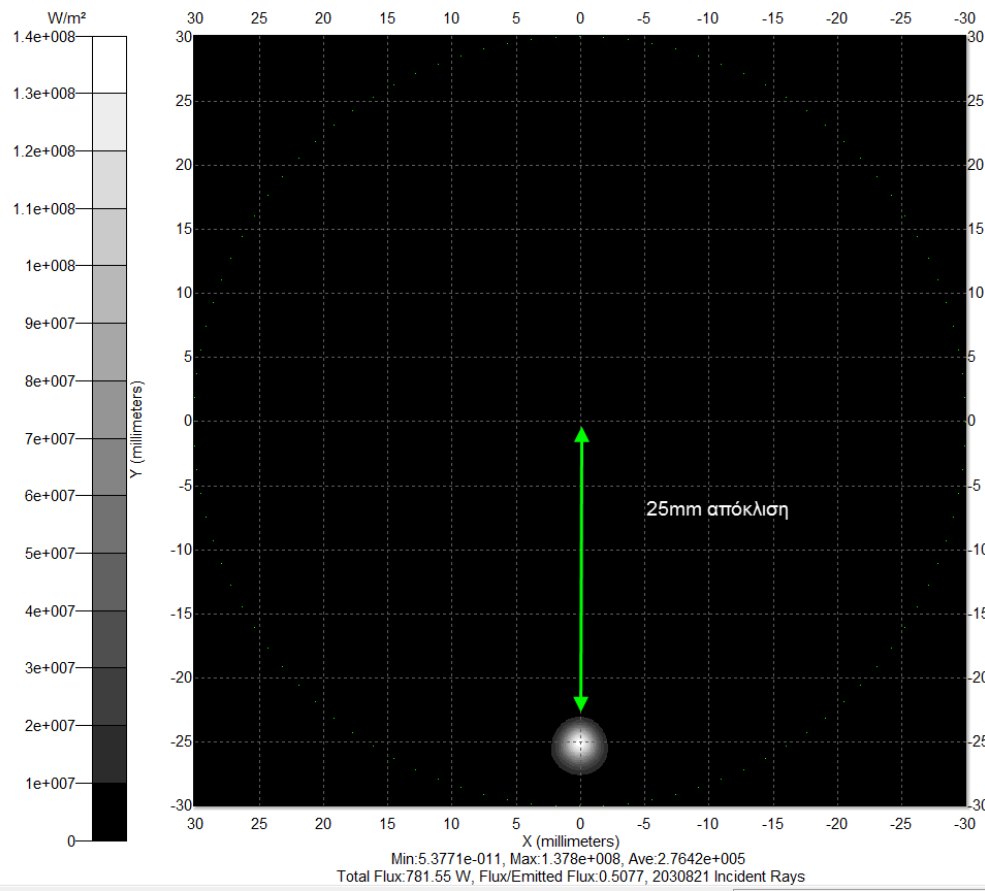




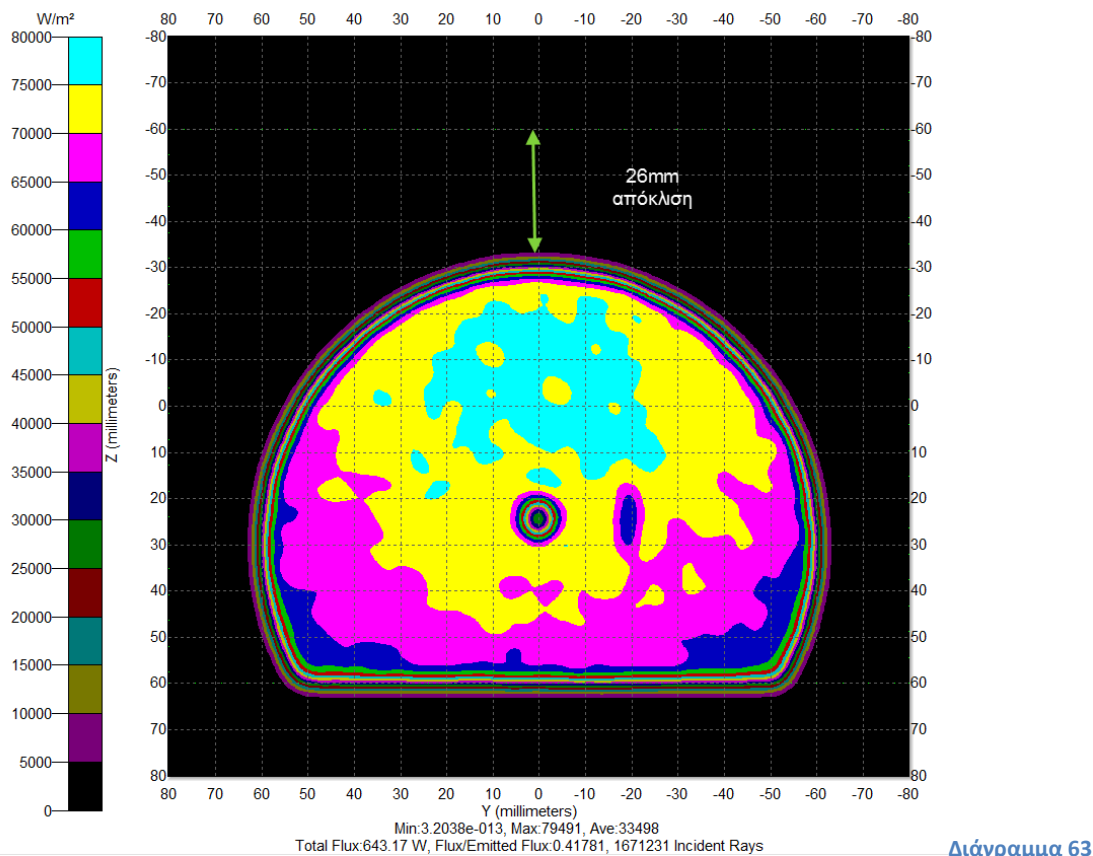
Διάγραμμα 61

Η απόκλιση της ακτινοβολίας πάνω στο PV είναι 5,6mm, ενώ η προσπίπτουσα ισχύς είναι 779,36W. Η ισχύς δηλαδή που χάνεται είναι περίπου 10W και στην πάνω εικόνα φαίνεται η πλευρά από την οποία χάνεται.

# 1<sup>0</sup> μοίρα απόκλιση



Διάγραμμα 62

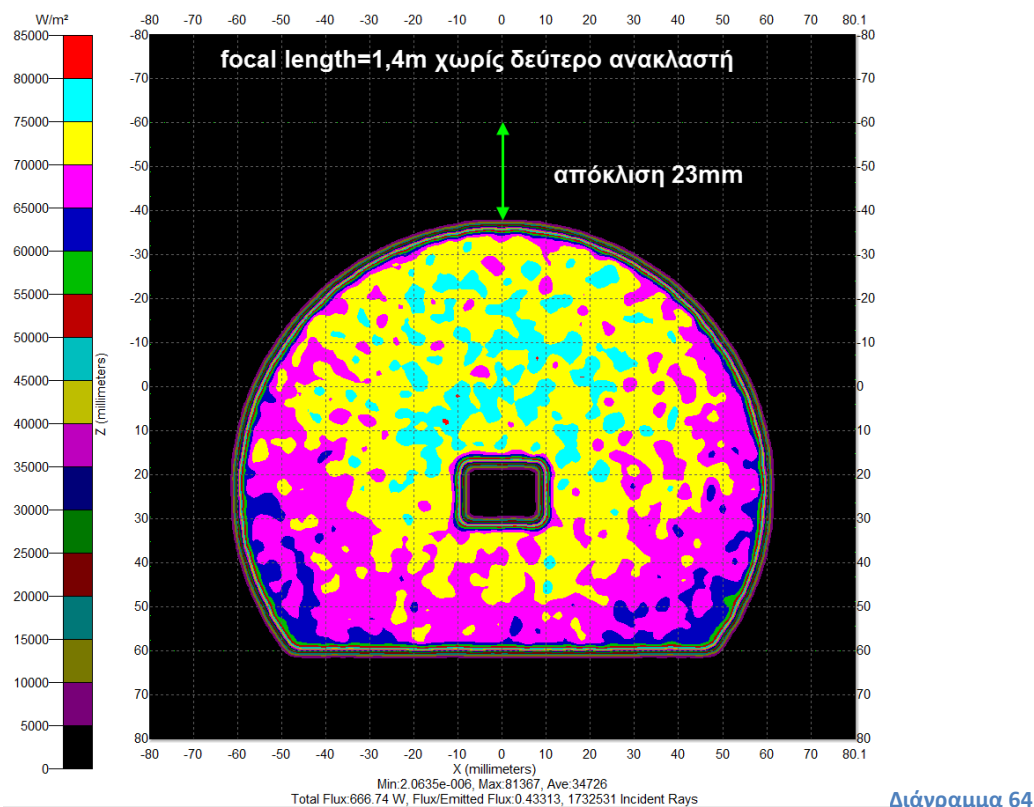


Διάγραμμα 63



Η απόκλιση πάνω στην επιφάνεια του δεύτερου ανακλαστή δε πρέπει να μας ανησυχεί, καθώς μπορούμε να αλλάξουμε τις διαστάσεις του δεύτερου ανακλαστή. Το πρόβλημα είναι η απόκλιση στη διάταξη του PV-εναλλάκτη που οδηγεί σε μείωση της συνολικής ισχύς κατά 140W περίπου.

Ακόμα και στην περίπτωση του παραβολικού πιάτου με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, χωρίς όμως δεύτερο ανακλαστή, η απόκλιση είναι της ίδιας τάξης. Θα χάνονται περίπου 117W. Μετακινείται όμως και η σκίαση. Οπότε αν γίνει επιλογή αυτής της διάταξης χωρίς PV στη μέση, τότε, θα φωτίζεται ένα κενό μέρος και δε θα φωτίζεται ένα μέρος όπου θα υπάρχουν ηλιακά κελιά.



Διάγραμμα 64

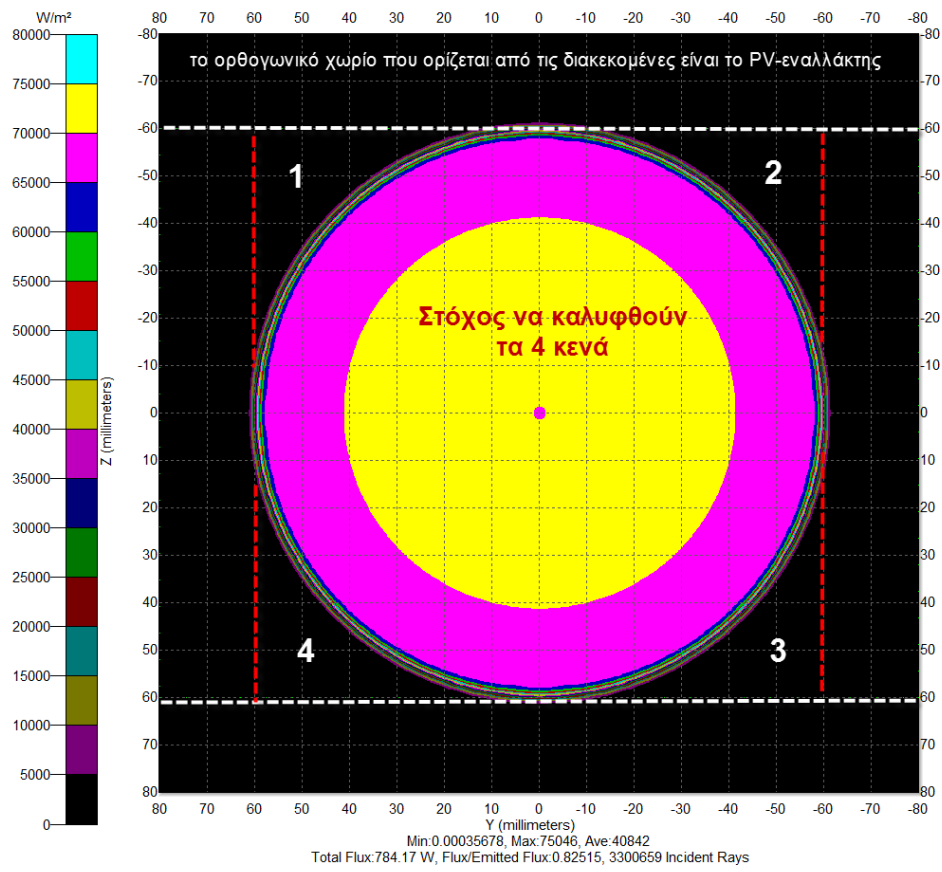
Προσπάθεια να καλυφθεί από ακτινοβολία μία τετραγωνική περιοχή

Έγινε μία προσπάθεια έτσι ώστε να καλυφθεί μία τετραγωνική περιοχή διαστάσεων 12cm\*12cm από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν ηλιακά κελιά σε ένα ορθογώνιο χωρίο και όχι μόνο σε ένα κυκλικό μέρος αυτού με ακτίνα 6cm. Η σκέψη ήταν να κρατηθεί το βασικό παραβολικό πιάτο με focal length 0,9m και  $\psi_{rim}=31^{\circ}$  και απλά να προστεθούν τέσσερα κομμάτια που θα προέκυπταν από ένα άλλο πιάτο μεγαλύτερης διαμέτρου και διαφορετικής  $\psi_{rim}$  αλλά ίδιου focal length. Δηλαδή τα δύο πιάτα θα χαρακτηρίζονταν από την ίδια χαρακτηριστικά εξίσωση

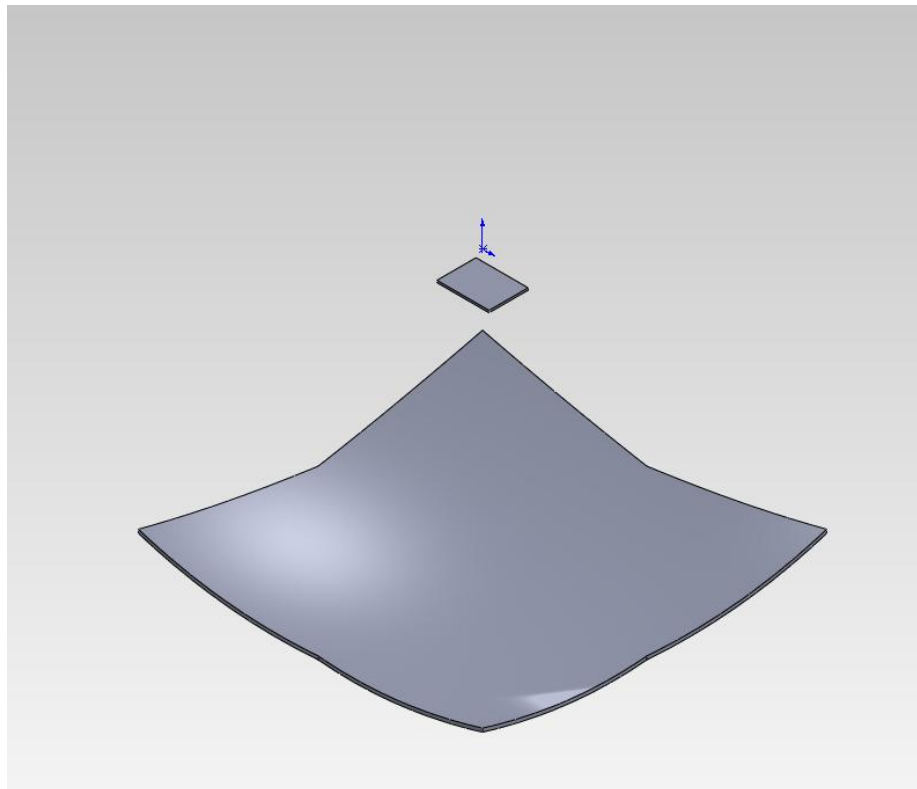
$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (m^2)$$

Υπολογίστηκαν κάποια σημεία με τη βοήθεια ενός προγράμματος Fortran (βλέπε παράρτημα Β), τα οποία στη συνέχεια εισήχθησαν στο Solidworks προς σχεδιασμό και στο tracePro προς ανάλυση ροής.

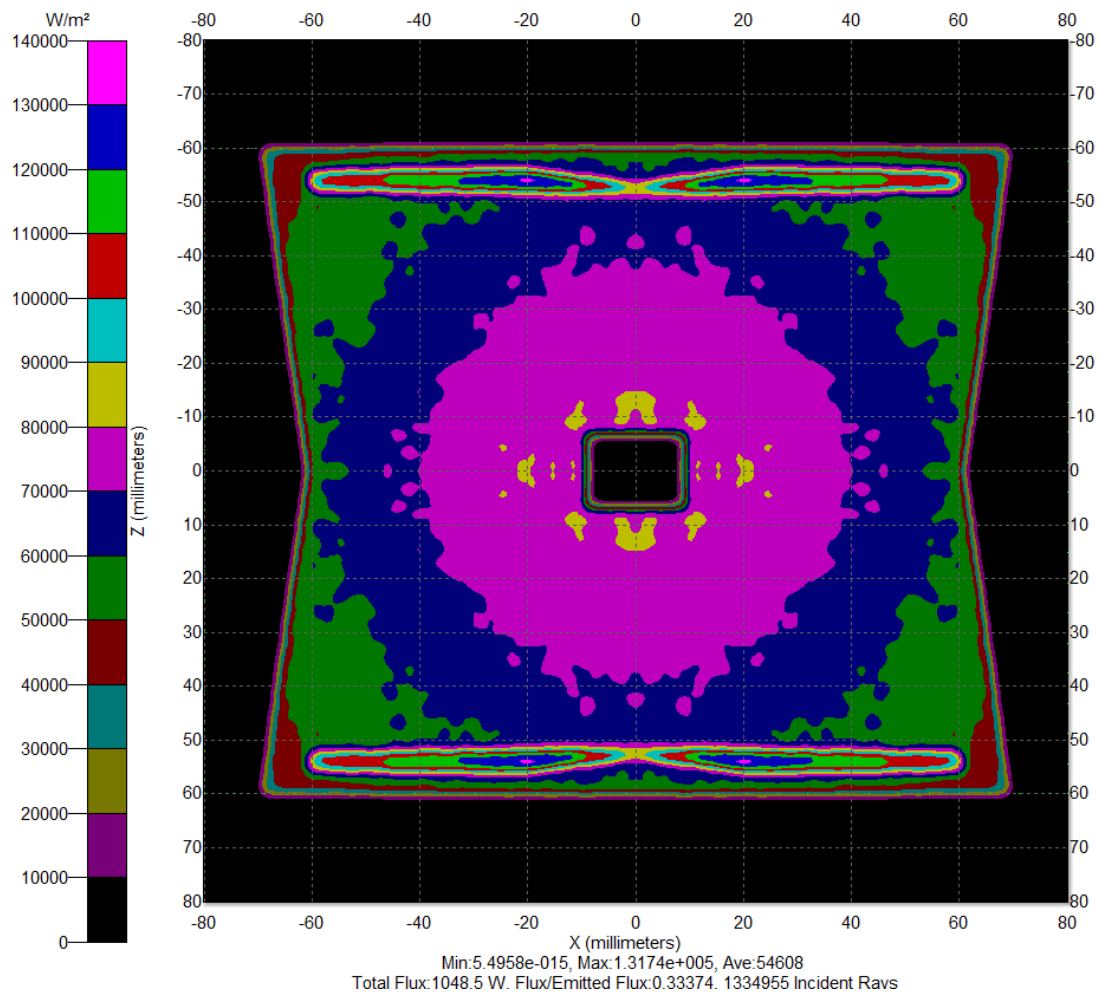
Τα αποτελέσματα δεν κρίθηκαν κατάλληλα και έτσι ο σχεδιασμός απορρίφθηκε. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



Διάγραμμα 65



Εικόνα 50



Διάγραμμα 66

Η ακτινοβολία είναι ανομοιόμορφη κυρίως στην πάνω και κάτω περιοχή.

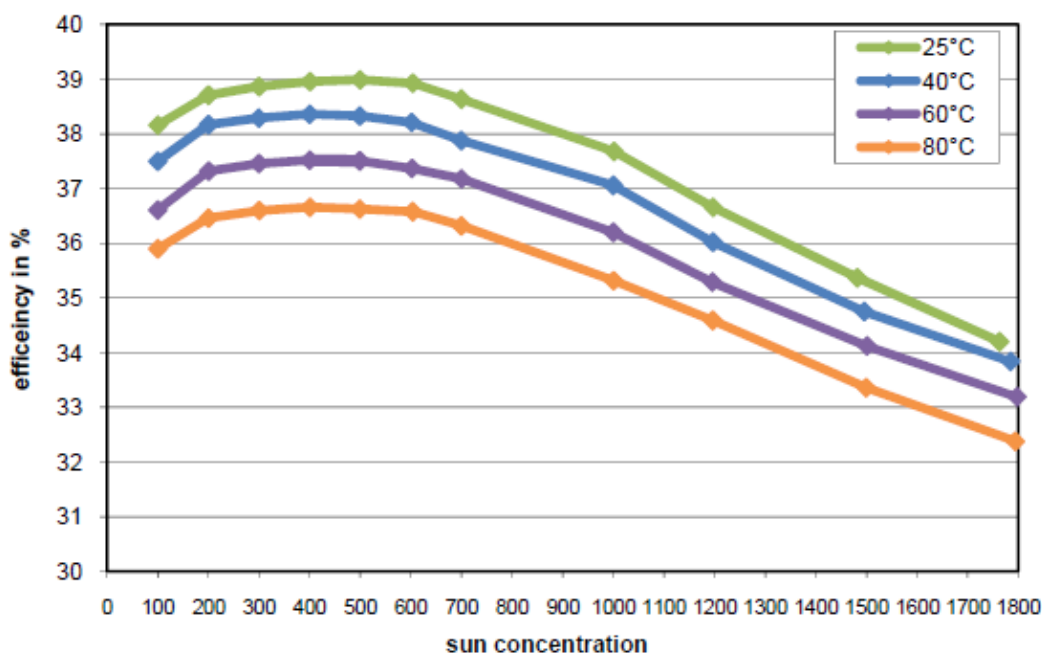


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η ανάλυση ροής της ακτινοβολίας για τη διάταξη. Στην πλευρά του εναλλάκτη που προσπίπτει η ακτινοβολία υπάρχει η διάταξη των ηλιακών κελιών. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, θεωρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών είναι 28% και προς εκμετάλλευση από το ψυκτικό υγρό πηγαίνει το 72% της προσπίπτουσας στο PV ισχύς. Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να βρούμε τον κατάλληλο εναλλάκτη ο οποίος θα απομακρύνει από το PV την περισσευούμενη ισχύ, η οποία σε άλλη περίπτωση θα μετατρέπονταν σε θερμότητα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού, η οποία αύξηση της θερμοκρασίας θα μείωνε και τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνουν δύο κατασκευαστές ηλιακών κελιών τριπλής επίστρωσης (triple junction) για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

Η εταιρία *AZURSPACE* για τον τύπο ηλιακού κελιού 3C40C αναφέρει ότι για κάθε βαθμό κελσίου που αυξάνεται η θερμοκρασία του ηλιακού κελιού πάνω από τους 25<sup>0</sup>C, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μειώνεται 0,106 %/°C με λόγο συγκέντρωσης 500. Δίνεται ακόμα και το παρακάτω διάγραμμα. (azurspace)



Διάγραμμα 67

Η εταιρία *emcore* αναφέρει ότι η αντίστοιχη μείωση είναι 0,06%/°C αλλά σε λόγο συγκέντρωσης 800. Ακόμα για τον τύπο ηλιακού κελιού Part No. 615245 η θερμοκρασία λειτουργίας είναι από -40°C μέχρι 100°C και μέγιστη θερμοκρασία αντοχής 180°C. (emcore)

Θα πρέπει να είμαστε εξοικειωμένοι με τιμές σαν αυτές έτσι ώστε να μπορέσουμε να κρίνουμε την καταλληλότητα του εναλλάκτη.

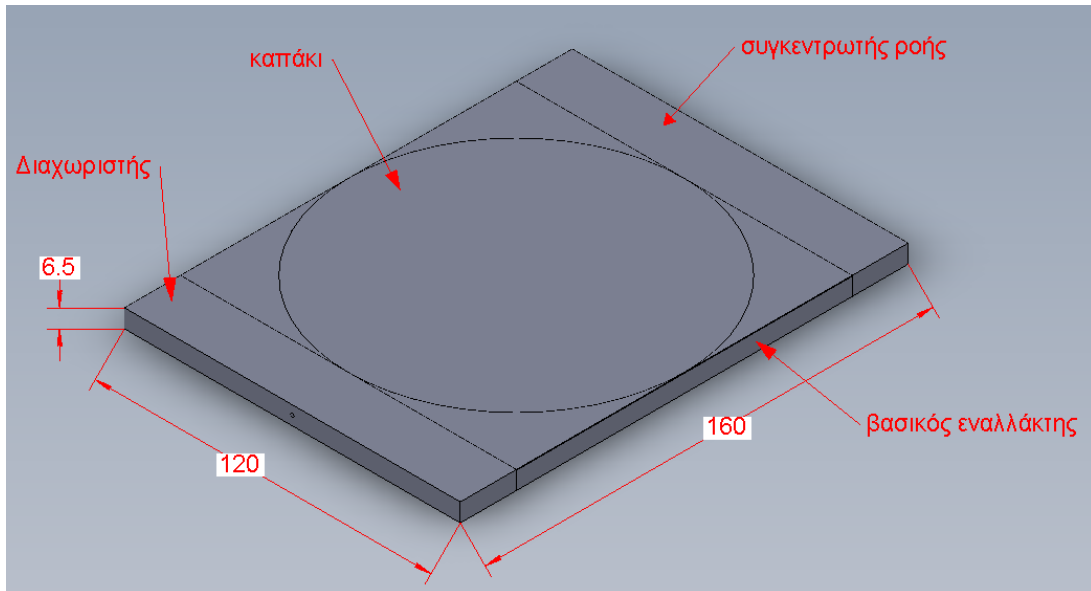
### 5.1 Βασικός σχεδιασμός και διαστάσεις για τον εναλλάκτη

Ο εναλλάκτης σχεδιάστηκε στο Solidworks και οι προσημειώσεις έγιναν στο flow simulation του ίδιου σχεδιαστικού προγράμματος.

Έχουν σχεδιαστεί και έχει γίνει ανάλυση με διάφορα είδη εναλλακτών.

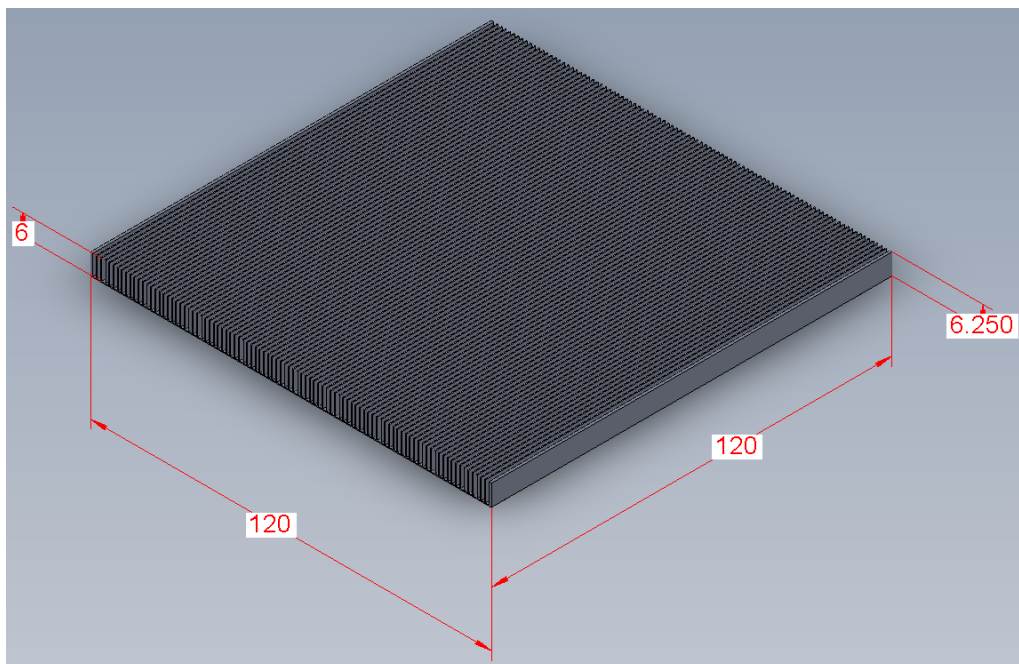
Όμως ο κάθε εναλλάκτης αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα:

- Το κύριο μέρος του εναλλάκτη που αποτελείται από 95 κανάλια πλάτους 1mm και ύψους 6mm και έχει διαστάσεις 12\*12cm, ενώ το πάχος του πατώματός του είναι 250μm .
- Το συγκεντρωτή που σε κάθε ανάλυση είναι ο ίδιος, είναι το τμήμα που συγκεντρώνει τη ροή.
- Το καπάκι που έχει πάχος πάντα 250μm.
- Το διαχωριστή που αλλάζει σε κάθε ανάλυση.



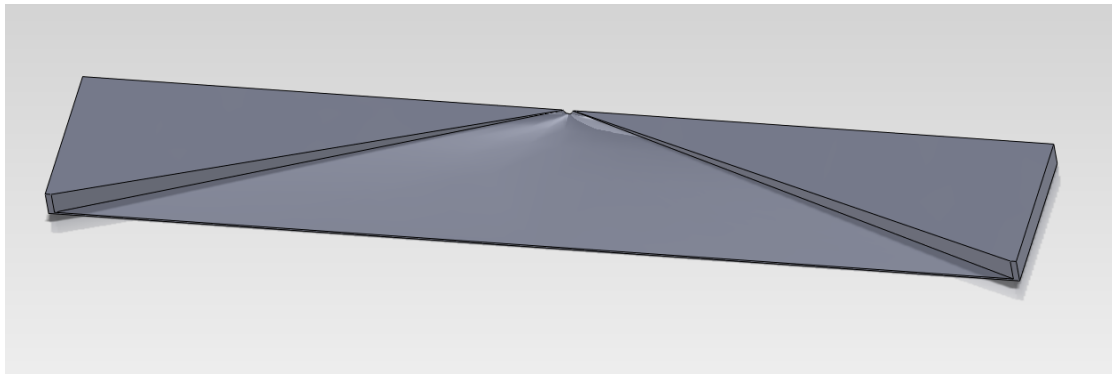
Εικόνα 51

Στην εικόνα 51 φαίνεται η γενική μορφή του εναλλάκτη (όλες οι διαστάσεις είναι σε mm)



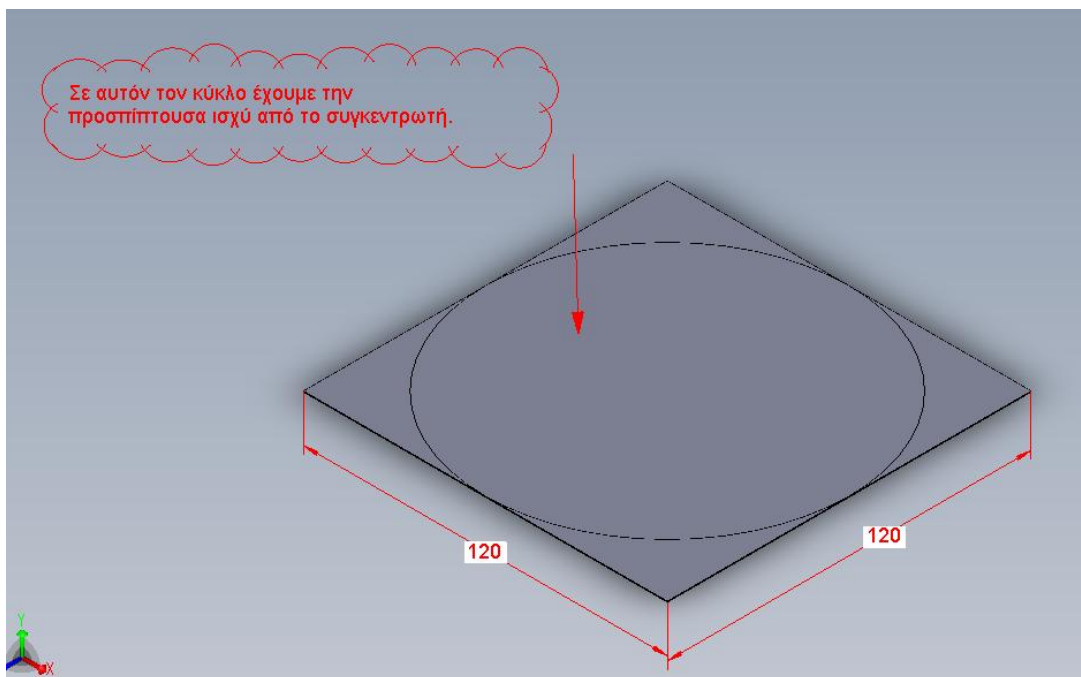
Εικόνα 52

Στην εικόνα 52 φαίνεται το κύριο μέρος του εναλλάκτη.



Εικόνα 53

Στην εικόνα 53 φαίνεται ο συγκεντρωτής σε τομή ως προς το οριζόντιο επίπεδο στο μέσο του πάχους του.

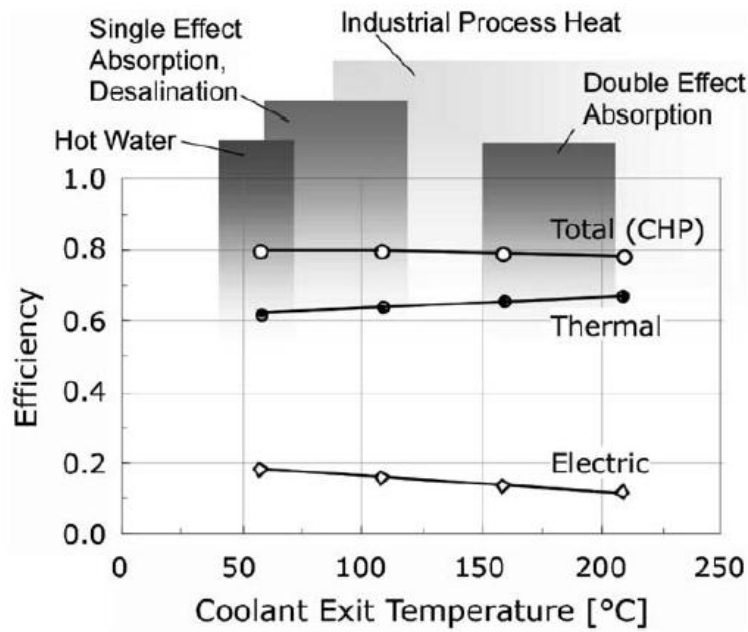


Εικόνα 54

Στην εικόνα 54 φαίνεται το καπάκι.

Στη συνέχεια και πριν κάνουμε την ανάλυση ροής, θα υπολογιστούν βασικά μεγέθη, όπως η παροχή μάζας του ψυκτικού υγρού και η διάμετρος του αγωγού ο οποίος διοχετεύει το ψυκτικό υγρό στο διαχωριστή και το παραλαμβάνει από την έξοδο του συγκεντρωτή.

Για ψυκτικό υγρό θα έχουμε νερό το οποίο θα εισέρχεται με θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$  στον εναλλάκτη και θέλουμε να εξέρχεται στη θερμοκρασία των  $80^{\circ}\text{C}$  έτσι ώστε να υπάρχει ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμική ισχύς που αποκομίζουμε από την ψύξη του φωτοβολταϊκού. (Kribus, Kaftori, Mittelman, Hirshfeld, Flitsanov, & Dajan, 2006)



Εικόνα 55

Οι τύποι για τον υπολογισμό βασικών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι και η επίλυση τους έγινε με τη βοήθεια προγράμματος της Fortran (βλέπε παράρτημα Α).

$P_{ov}$ : η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε  $\text{kW/m}^2$

$q_{th}$ : η θερμική ισχύς που απορροφάται από το ψυκτικό υγρό.

$n_{th}$ : το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε θερμότητα.

$$q_{th} = P_{ov} \times E_{\text{ανοίγματος συλλέκτη}} \times n_{th} \quad [kW]$$

$$\dot{m} = \frac{q_{th}}{[c_p \times (T_{out} - T_{in})]} \quad [kg / s]$$

$$d_{\sigma\omega\lambda} = \sqrt{\frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times u \times \rho}} \quad [m]$$

$$u = \frac{\nu \times Re}{d_{\sigma\omega\lambda}} \quad [m / s]$$

Αρχικά θα υπολογίσουμε τα μεγέθη στην οριακή περίπτωση για Reynolds 2000 και για  $P_{ov}=1000\text{W/m}^2$ , ακτινοβολία που ανήκει στις συνθήκες αναφοράς.

Οπότε έχουμε

- $P_{ov}=1000\text{W/m}^2$
- $n_{th}=0,72$  (θεωρούμε για τους αρχικούς υπολογισμούς ότι 72% τις προσπίπτουσας από τον ήλιο ισχύς, θα απορροφηθεί από το ψυκτικό υγρό)
- $Re=2000$

Και τα αποτελέσματα είναι

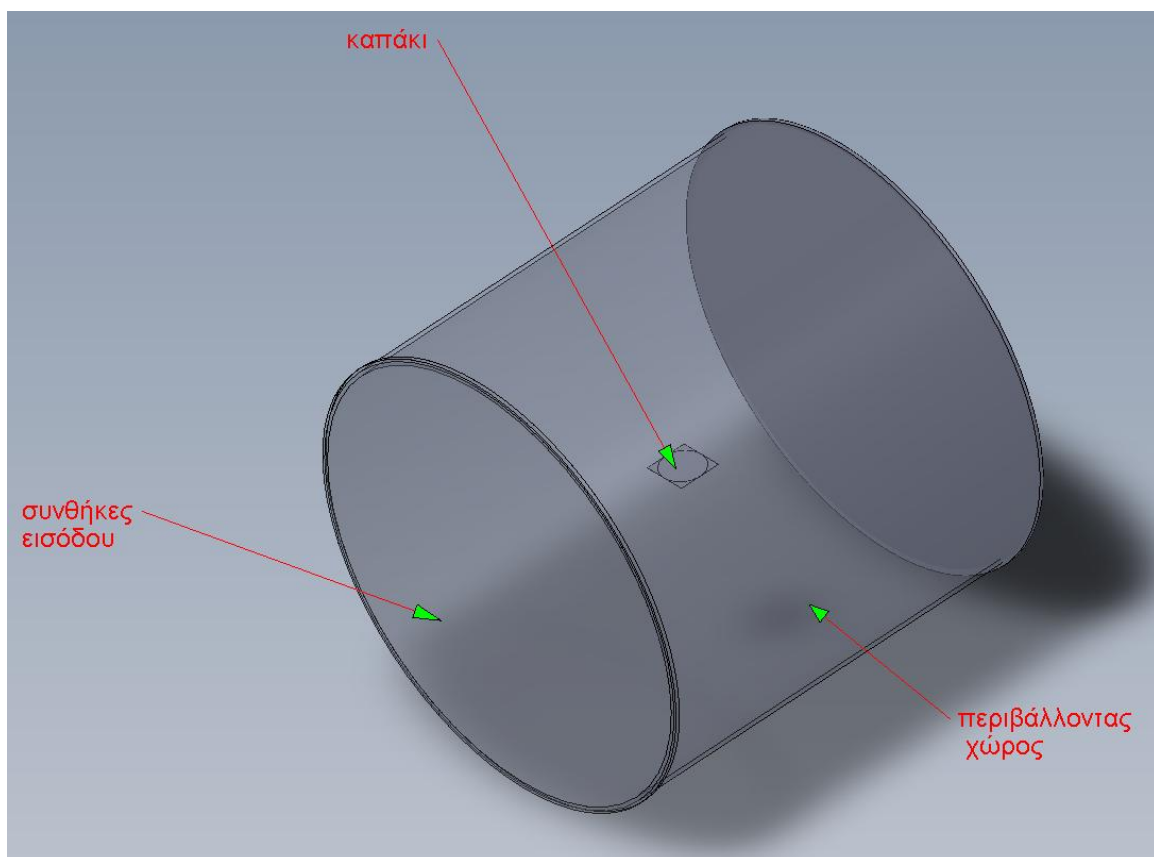


- η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα θα είναι 1,4383mm
- $q_{th}=565,3W(\approx 564,61W$  που προκύπτει από το TracePro)
- η ολική παροχή μάζας στον εναλλάκτη θα είναι  $2,25 \cdot 10^{-3} kg/sec$
- η ταχύτητα του ψυκτικού υγρού στον κεντρικό (εξωτερικό) σωλήνα 1,3905m/sec.

Η διάμετρος τελικά θα επιλεγθεί να είναι 2mm. Οπότε τα τελικά μεγέθη είναι:

- η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα θα είναι 2mm
- η ολική παροχή μάζας στον εναλλάκτη θα είναι  $2,25 \cdot 10^{-3} kg/sec$
- η ταχύτητα του ψυκτικού υγρού στον κεντρικό (εξωτερικό) σωλήνα 0,7161m/sec
- $Re=1435,26$

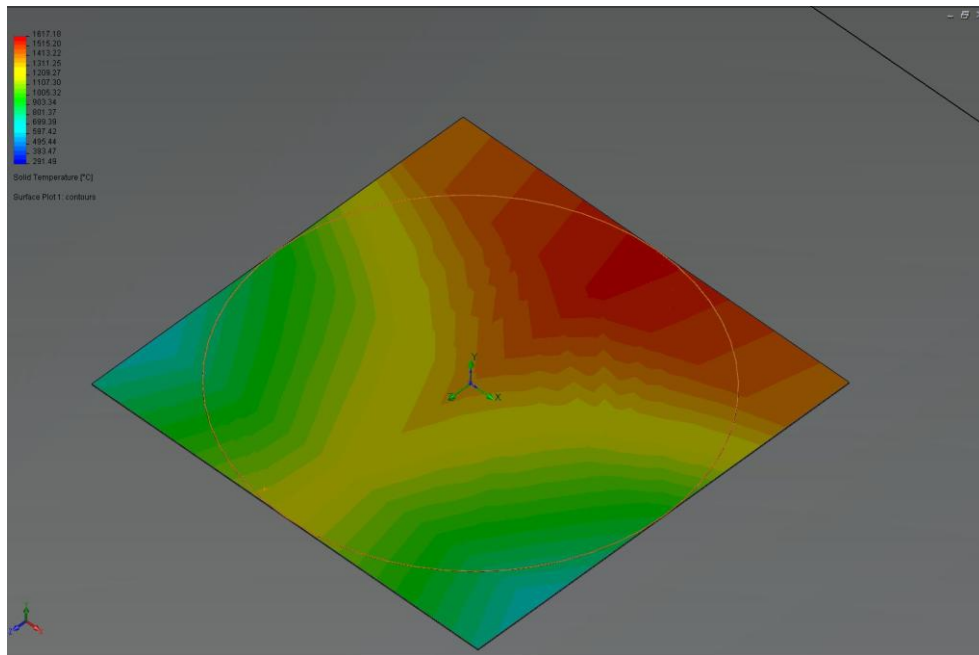
Πριν προχωρήσουμε στα διάφορα είδη διαχωριστών παρουσιάζεται μία ανάλυση για το καπάκι μόνο.



Εικόνα 56

Στη συγκεκριμένη ανάλυση προσιπτεί ισχύς  $45000W/m^2$ , θεωρώντας ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών είναι 28% στο εμβαδό του κύκλου και σαν συνθήκες εισόδου έχουμε αέρα με θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20^{\circ}C$  και ταχύτητα 3m/s και 15m/s. Το καπάκι είναι από αλουμίνιο.

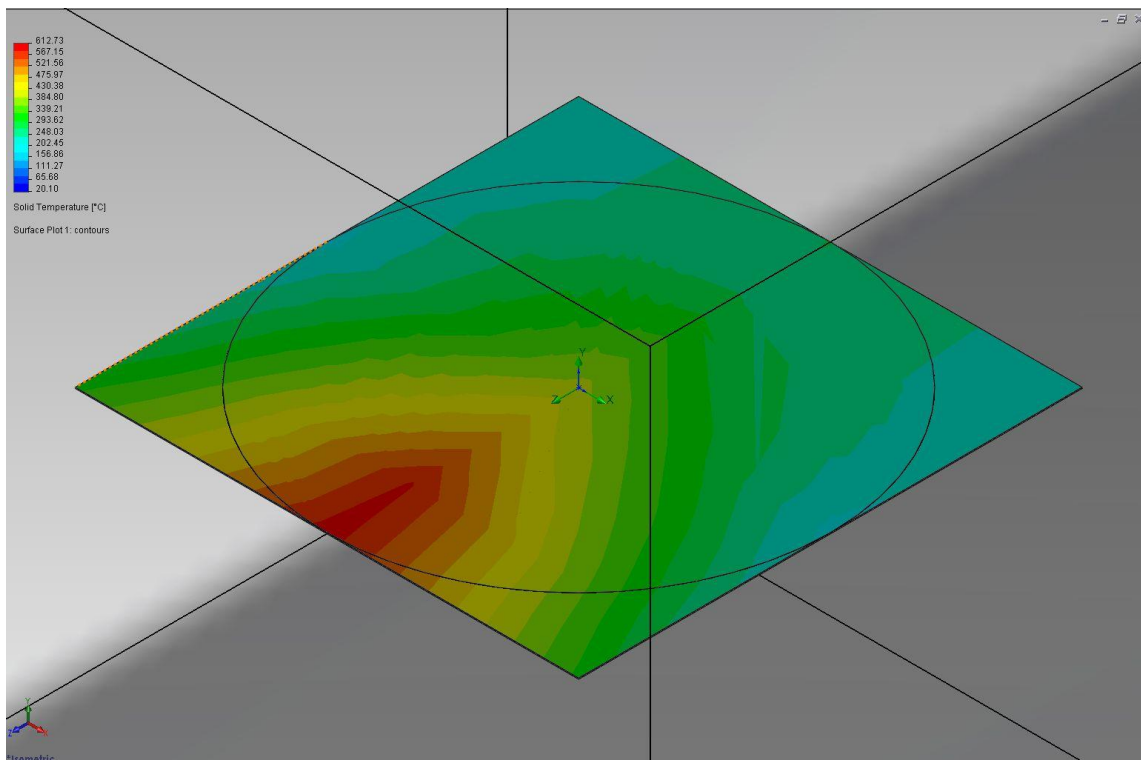
- Περίπτωση 1<sup>η</sup> με αέρα 3m/s



Εικόνα 57

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται είναι 1617,18<sup>0</sup>C.

- Περίπτωση 2<sup>η</sup> με αέρα 15m/s



Εικόνα 58

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται 612,73<sup>0</sup>C.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι είναι επιβεβλημένη η ανάγκη ψύξης του φωτοβολταϊκού.

## 5.2 Προσομοίωση και επιλογή εναλλάκτη ψύξης του PV πάνελ

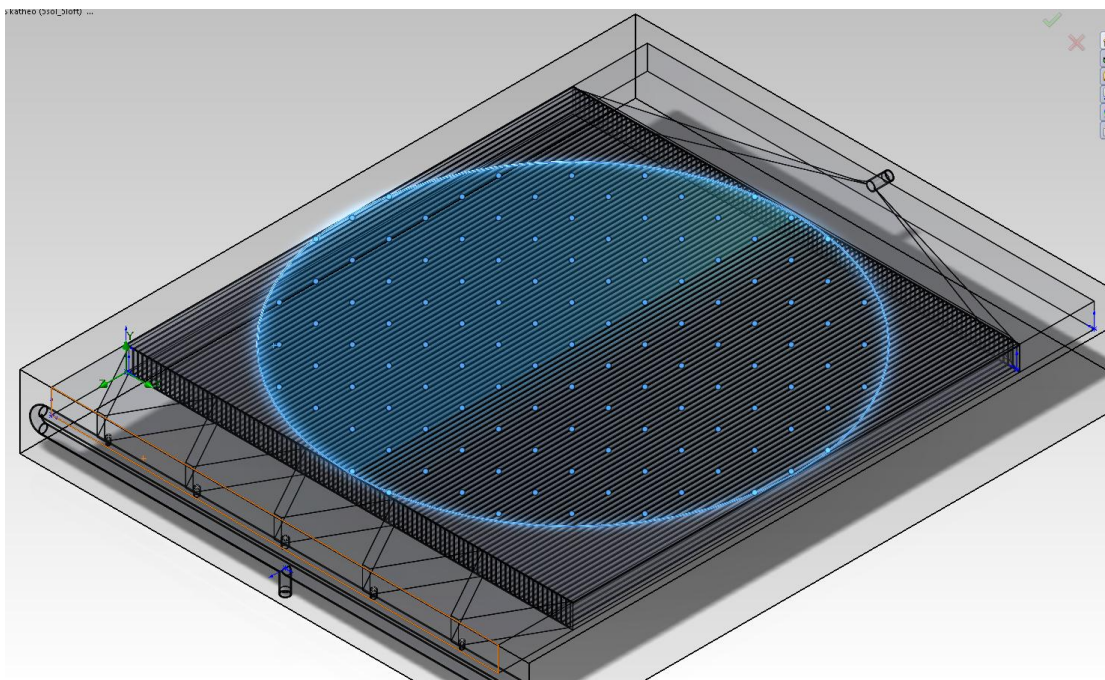
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια είδη εναλλακτών καθώς και τα αποτελέσματά τους από το flow simulation του Solidworks.

Οι συνθήκες που εισήχθησαν για την ανάλυση είναι:

- Η παροχή μάζας  $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ kg/sec}$  με θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$  στην είσοδο.
- Στατική πίεση στην έξοδο
- η προσπίπτουσα ισχύ σε W ανά ομόκεντρο κύκλο από την ανάλυση που προέκυψε από το TracePro.
- ψυκτικό μέσο το νερό
- το αλουμίνιο είναι το υλικό του στερεού
- ανάλυση με αδιαβατικά τοιχώματα για να προσομοιάσουμε τη μόνωση γύρω από τον εναλλάκτη

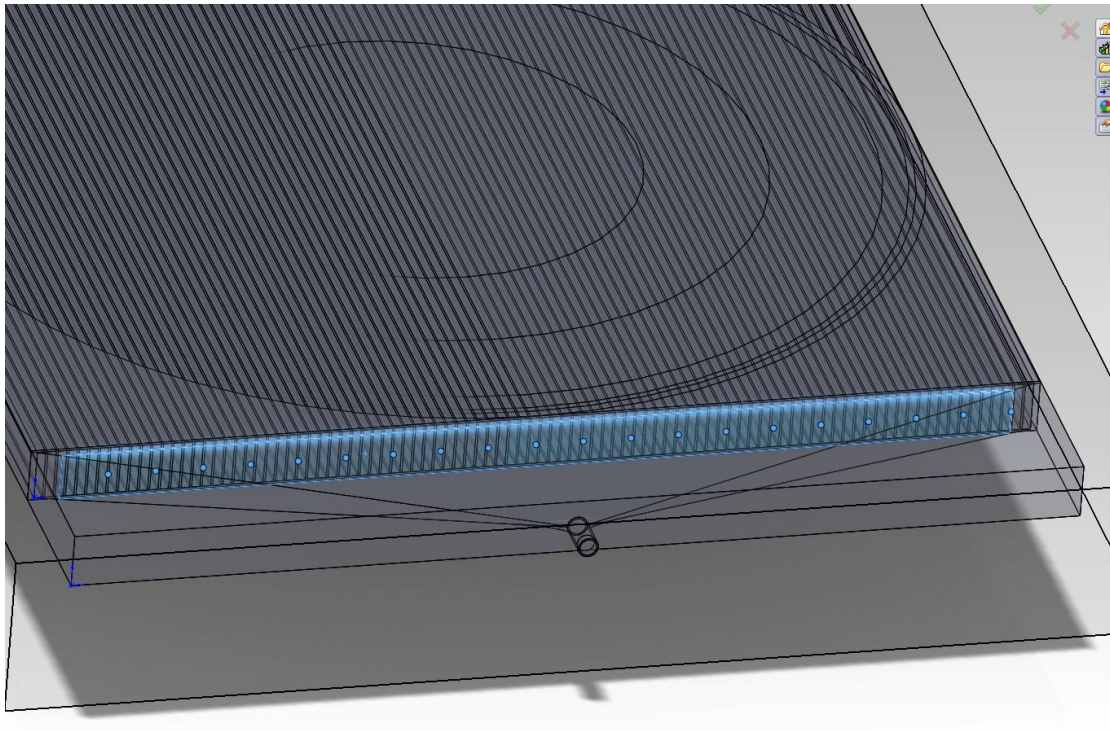
Για κάθε εναλλάκτη βρίσκουμε:

- την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή που είναι τοποθετημένα τα ηλιακά κελιά όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 59

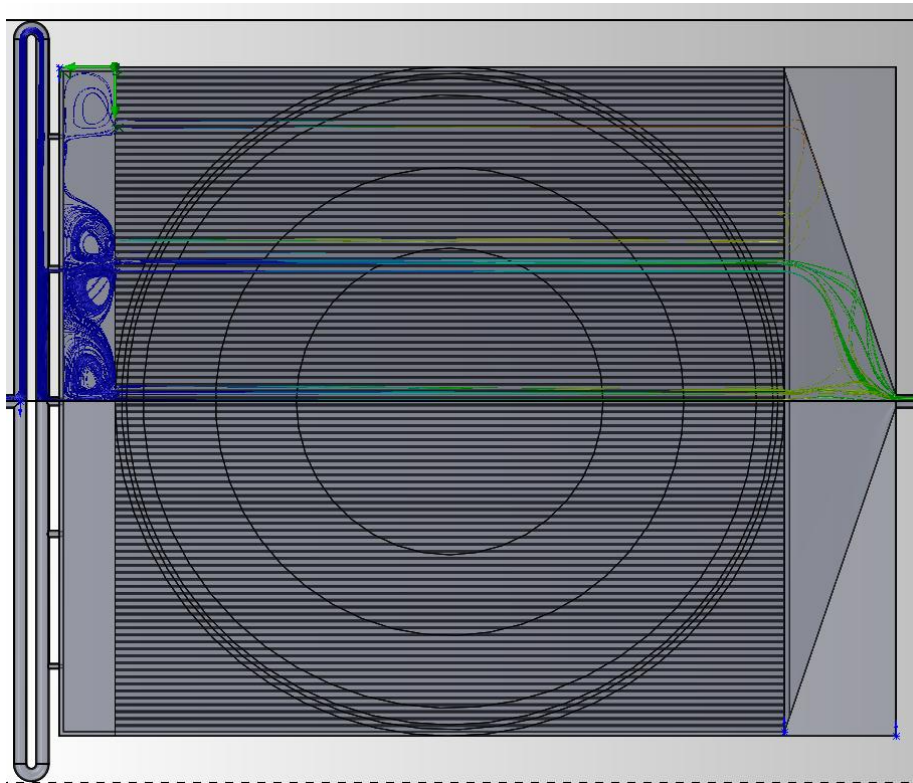
- την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού σε μία επιφάνεια λίγο μετά την έξοδο του ψυκτικού υγρού από τα κανάλια, στην περιοχή του συγκεντρωτή, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Από το συγκεκριμένο υπολογισμό μπορούμε να συμπεράνουμε αν μπαίνει η κατάλληλη παροχή σε όλα τα κανάλια για να απάγει τη θερμότητα που αντιστοιχεί σε κάθε κανάλι.



Εικόνα 60

Για τον υπολογισμό των δύο αποκλίσεων έχει ληφθεί ένα δείγμα 1000 σημείων στην κάθε περίπτωση.

Πριν προχωρήσουμε αξίζει να σημειωθεί ότι έγιναν κάποιες προσομοιώσεις με τη ροή να εισέρχεται παράλληλα με τον εναλλάκτη. Απορρίφθηκαν όμως γιατί παρέχονταν νερό μόνο στα απέναντι από τον αγωγό αυλάκια, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα. Έτσι αποφασίστηκε η ροή να εισέρχεται κάθετα.

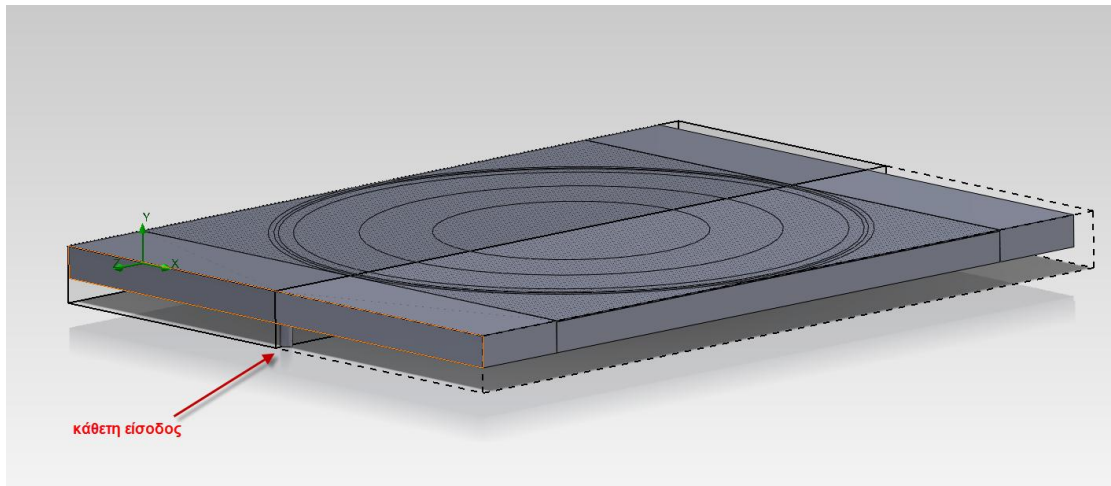


Εικόνα 61



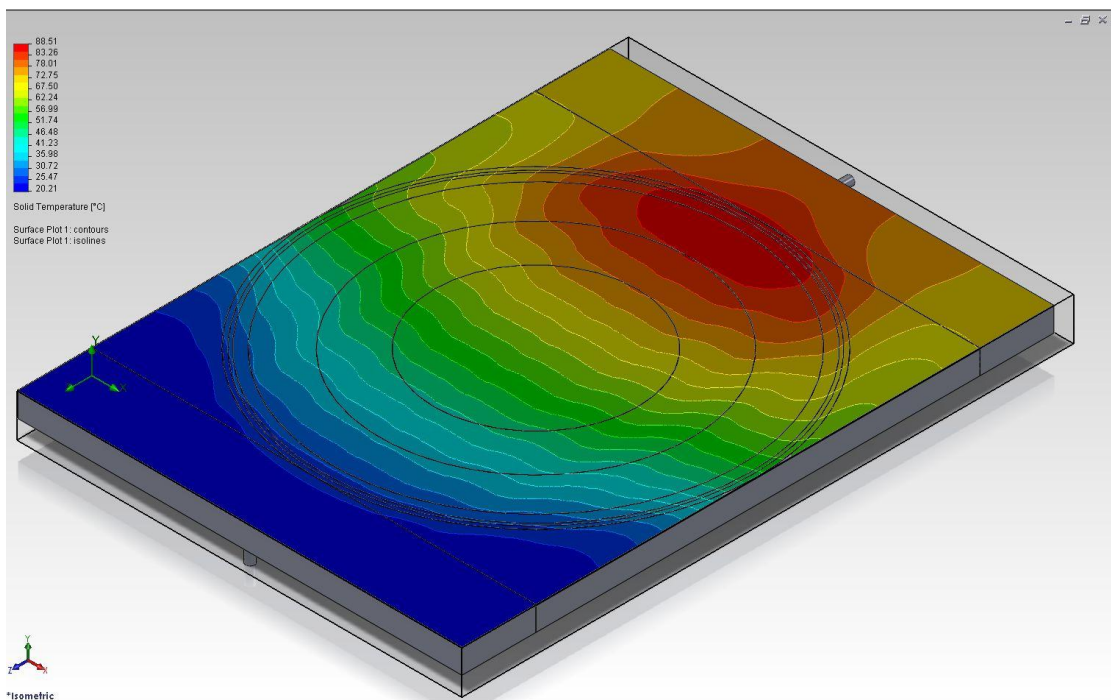
Ανάλυση για τη 2<sup>η</sup> διάταξη με focal length 0,9m και  $\psi_{rim}=31^{\circ}$ .

● Περίπτωση 1<sup>η</sup>

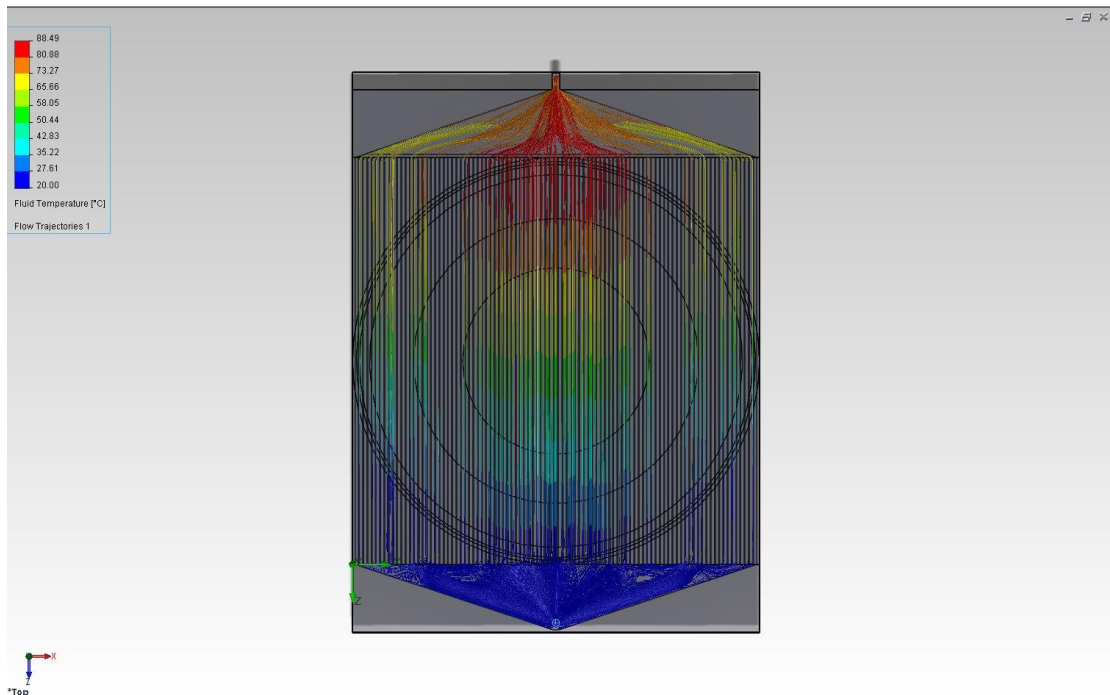


Εικόνα 62

Ο αγωγός εισόδου έχει διάμετρο 2mm και εισέρχεται παροχή μάζας  $2,25 \cdot 10^{-3} \text{kg/sec}$ . Η είσοδος είναι κάθετη.



Εικόνα 63



Εικόνα 64

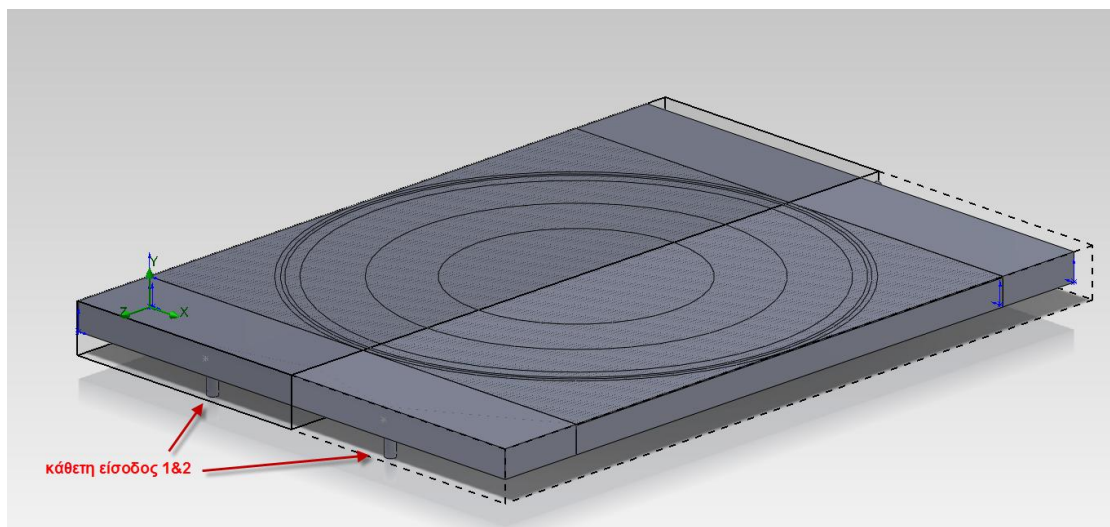
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 17,7102

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 6,082416

Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 88,42185<sup>0</sup>C

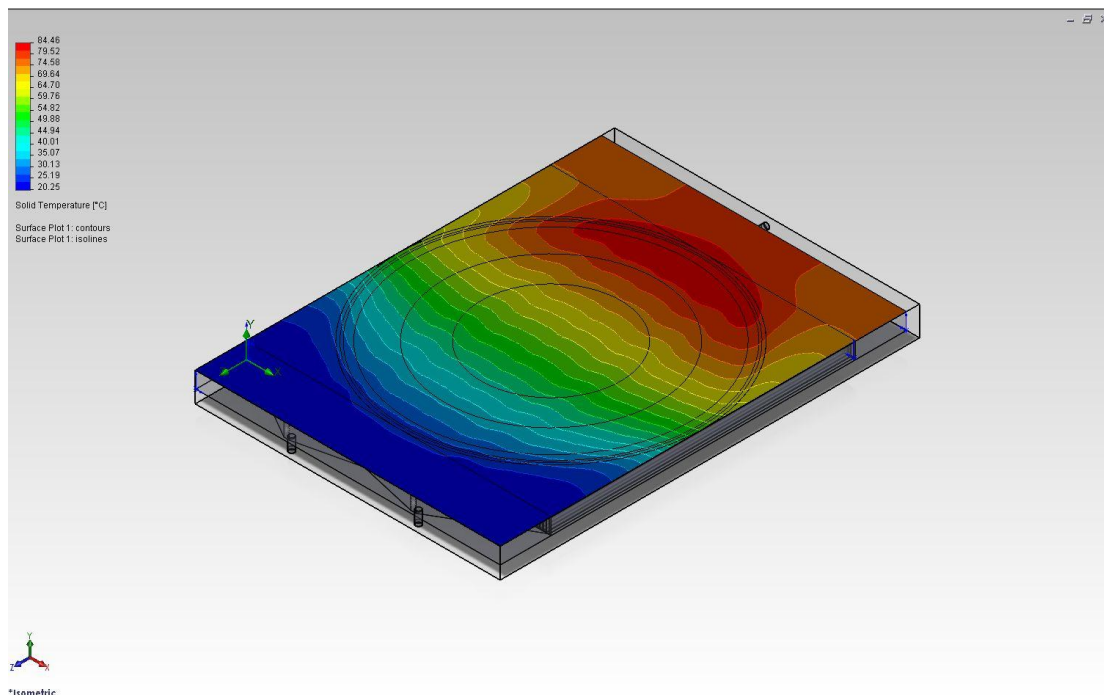
Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 80,127<sup>0</sup>C

● Περίπτωση 2<sup>η</sup>

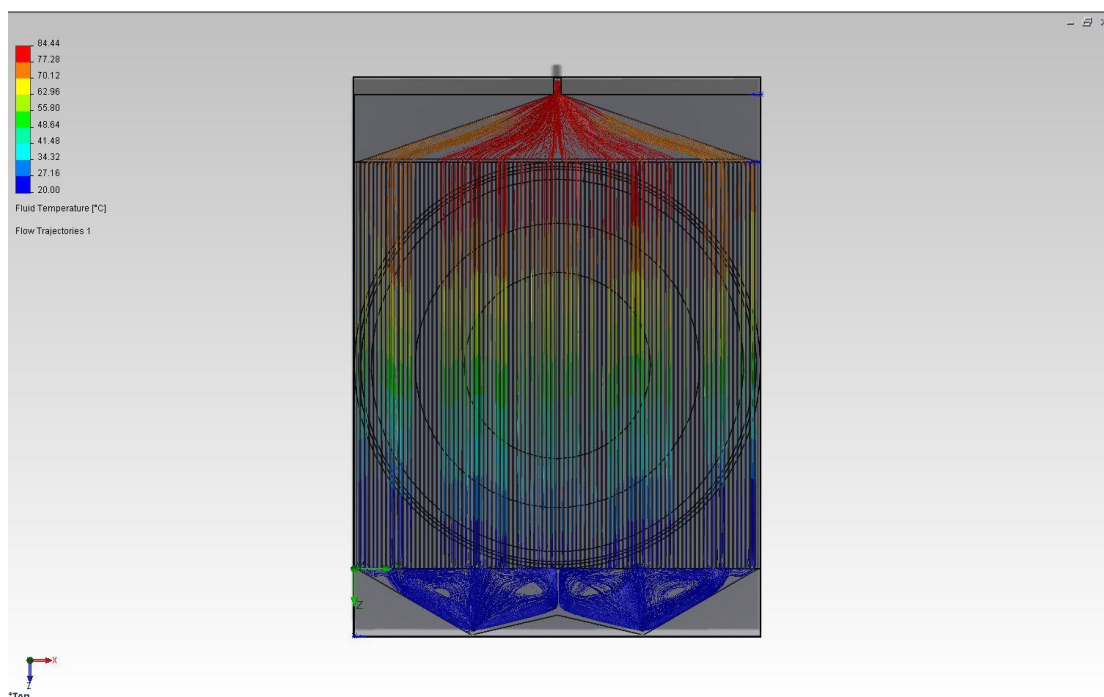


Εικόνα 65

Δύο σωλήνες εισόδου με διάμετρο 2mm και παροχή μάζας  $1,125 \cdot 10^{-3} \text{kg/sec}$  για τον καθένα. Τα κέντρα των οπών απέχουν μεταξύ τους 50mm και είναι συμμετρικά ως προς το κέντρο. Η απόσταση των κέντρων από την άκρη του εναλλάκτη είναι 2,75mm.



Εικόνα 66



Εικόνα 67

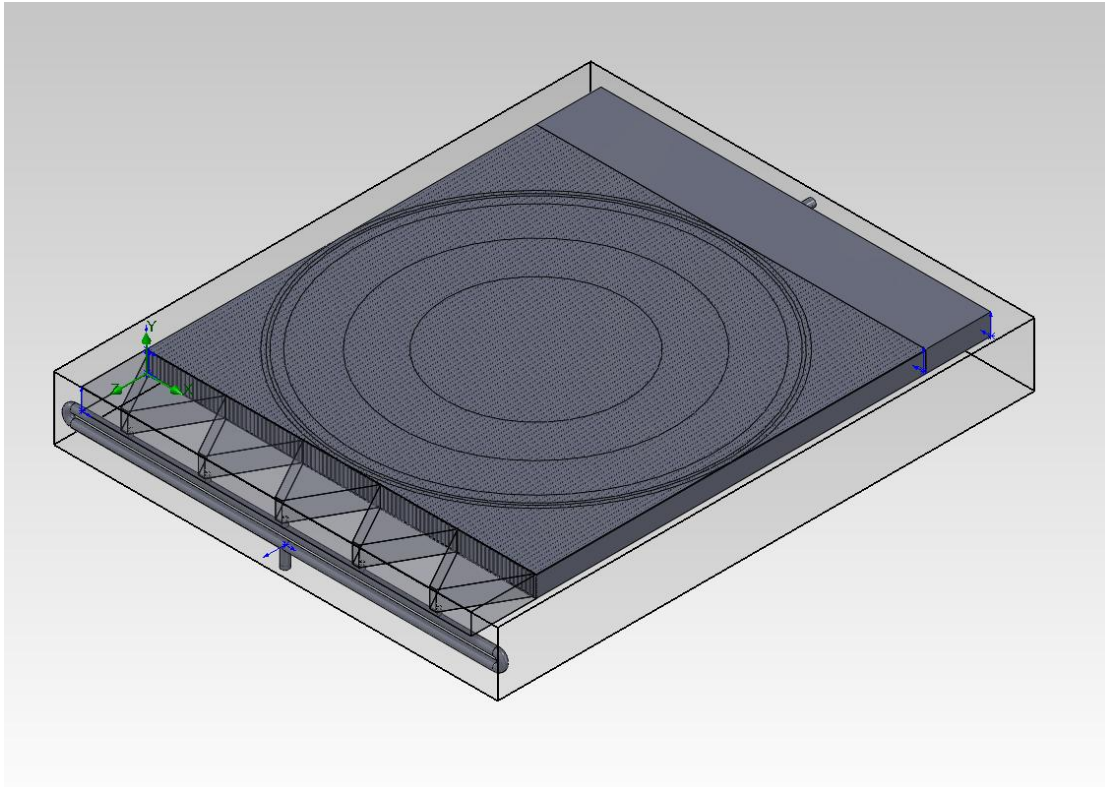
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 17,13983

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 3,318217

Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 84,33187<sup>0</sup>C

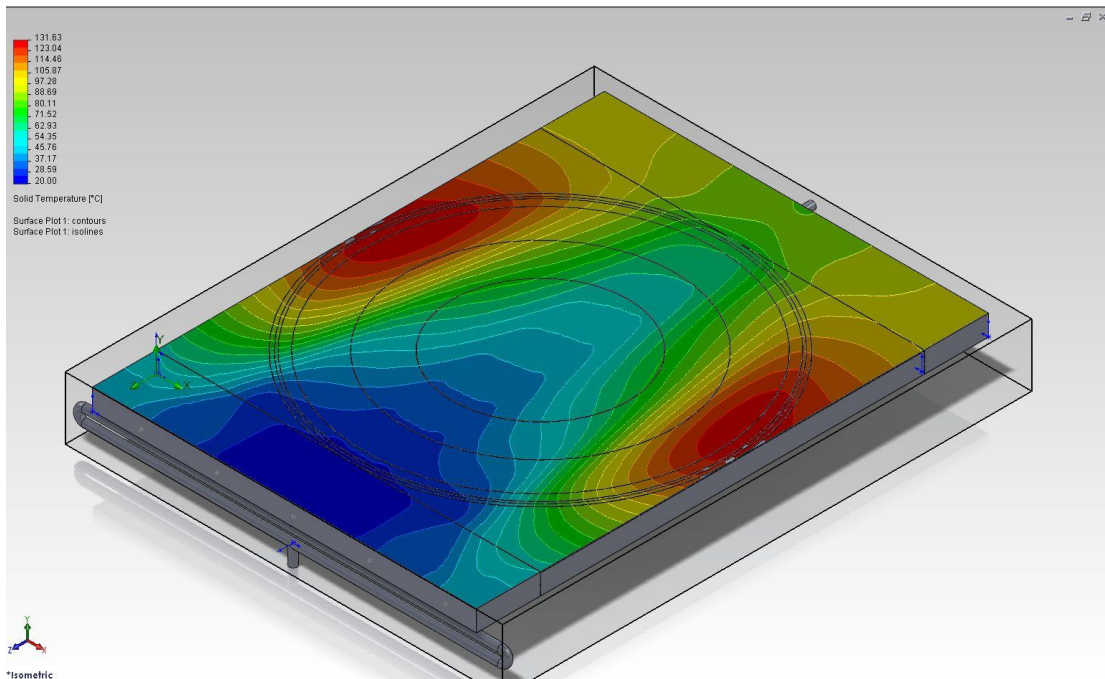
Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 79,7229<sup>0</sup>C

● Περίπτωση 3<sup>η</sup>



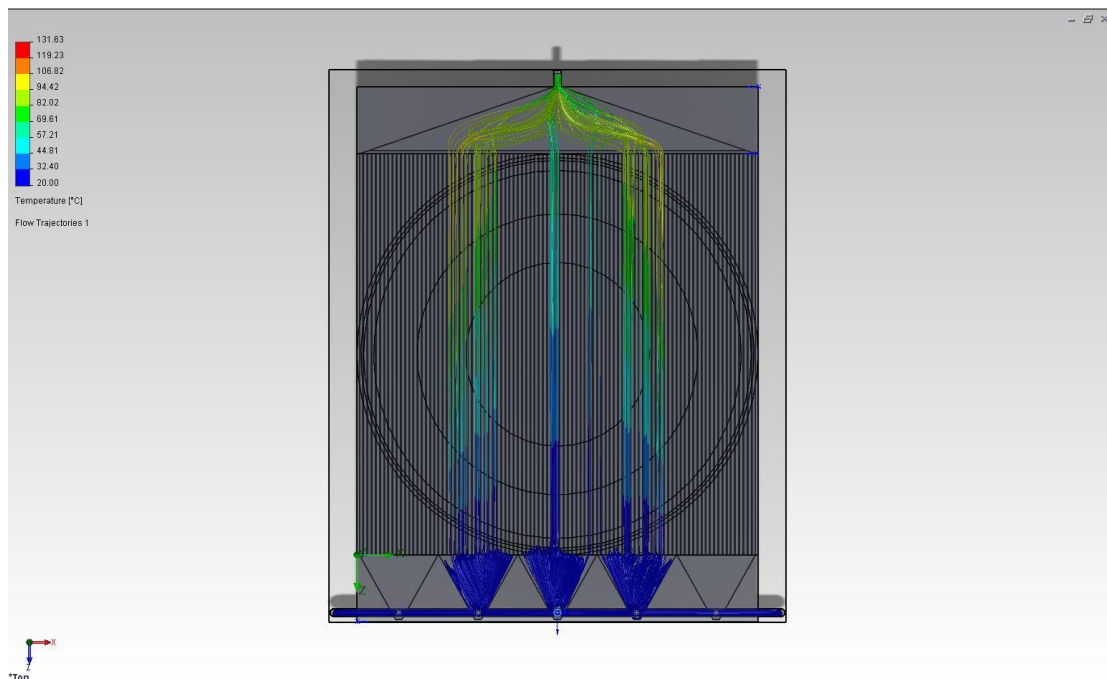
Εικόνα 68

Μία κεντρική είσοδος διαμέτρου 2mm με παροχή  $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ kg/sec}$ . Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό υπάρχουν 5 οδηγοί που εισάγουν το νερό σε 19 αυλάκια ο καθένας. Οι διάμετροι των 5 αγωγών εισόδου είναι από αριστερά προς το κέντρο 600μm, 900μm και ο κεντρικός 1200μm. Οι δύο δεξιά είναι συμμετρικοί. Η μεταξύ απόσταση του κέντρου των αγωγών είναι 23,75mm.



Εικόνα 69





Εικόνα 70

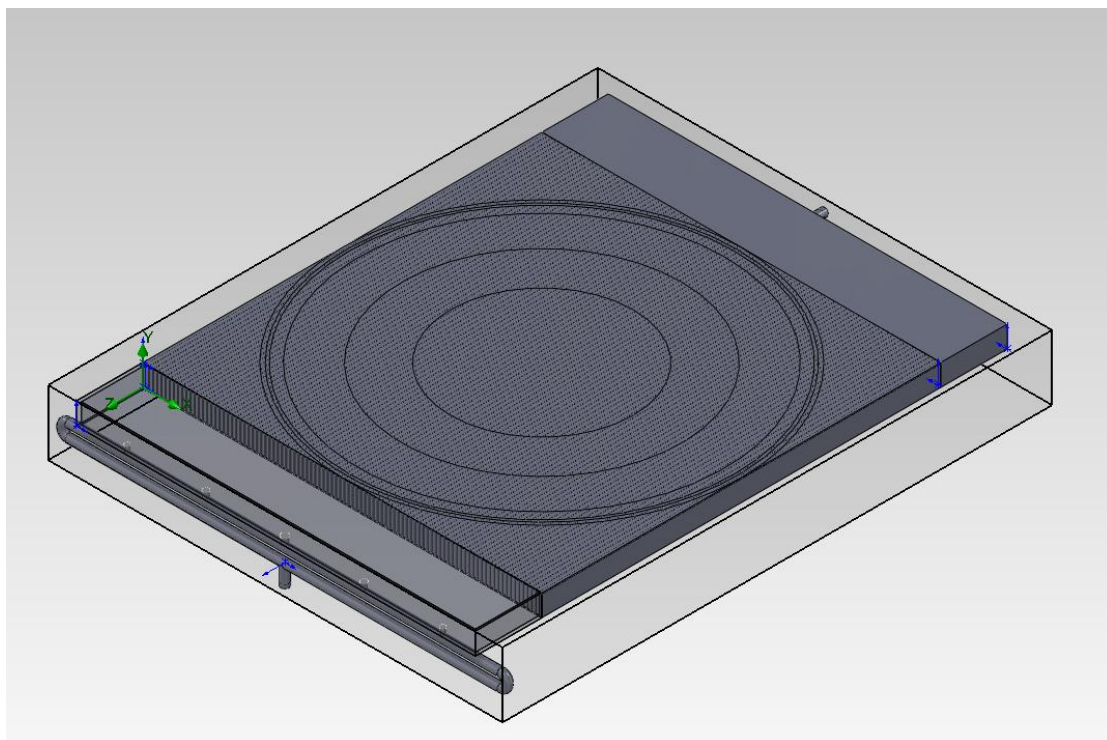
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 30,69417

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 12,89441

Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 131,4213<sup>0</sup>C

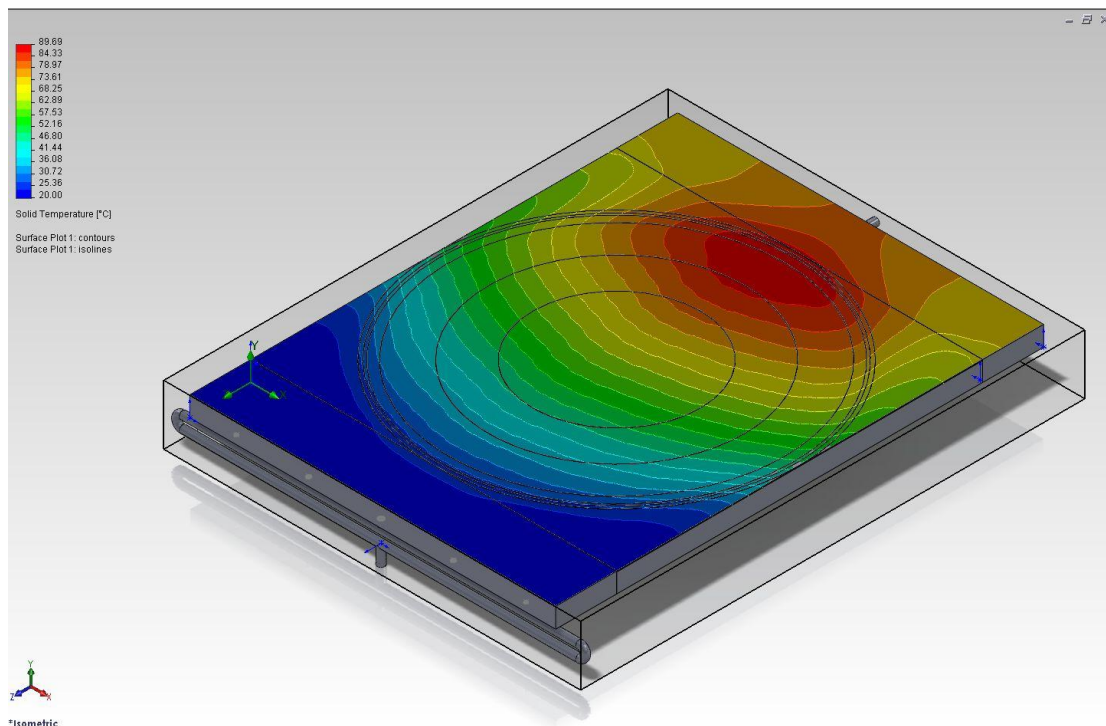
Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 77,9948<sup>0</sup>C

● Περίπτωση 4<sup>η</sup>

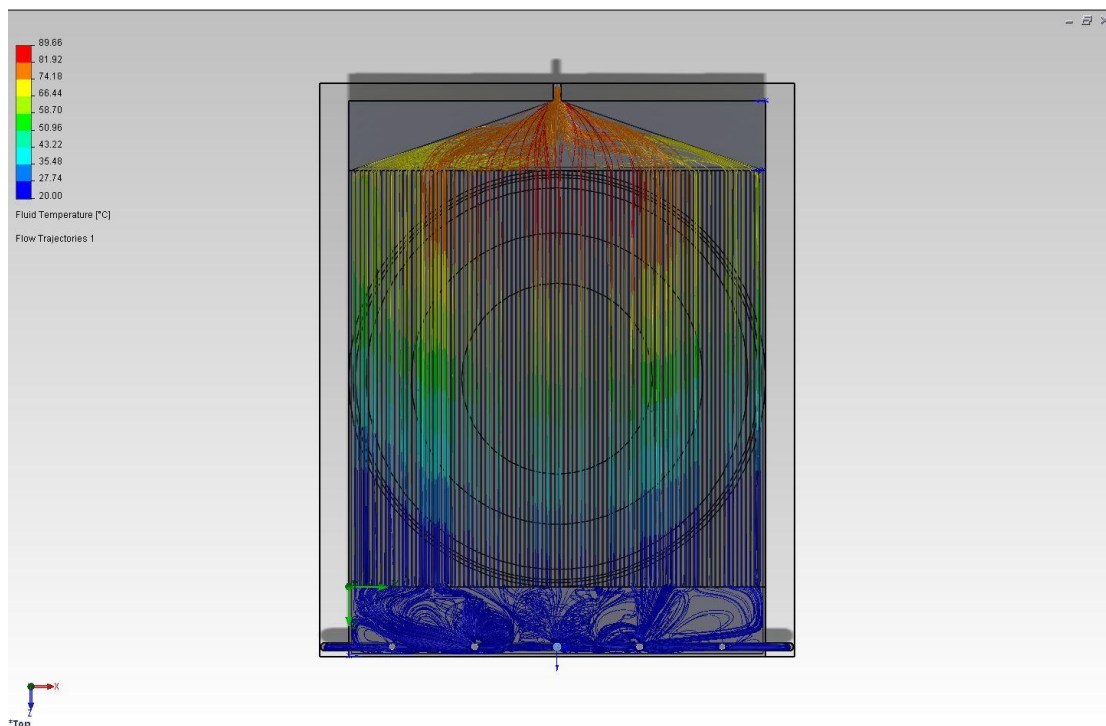


Εικόνα 71

Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είναι ίδιος με τον προηγούμενο χωρίς να υπάρχουν οι οδηγοί.



Εικόνα 72



Εικόνα 73

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 18,08264

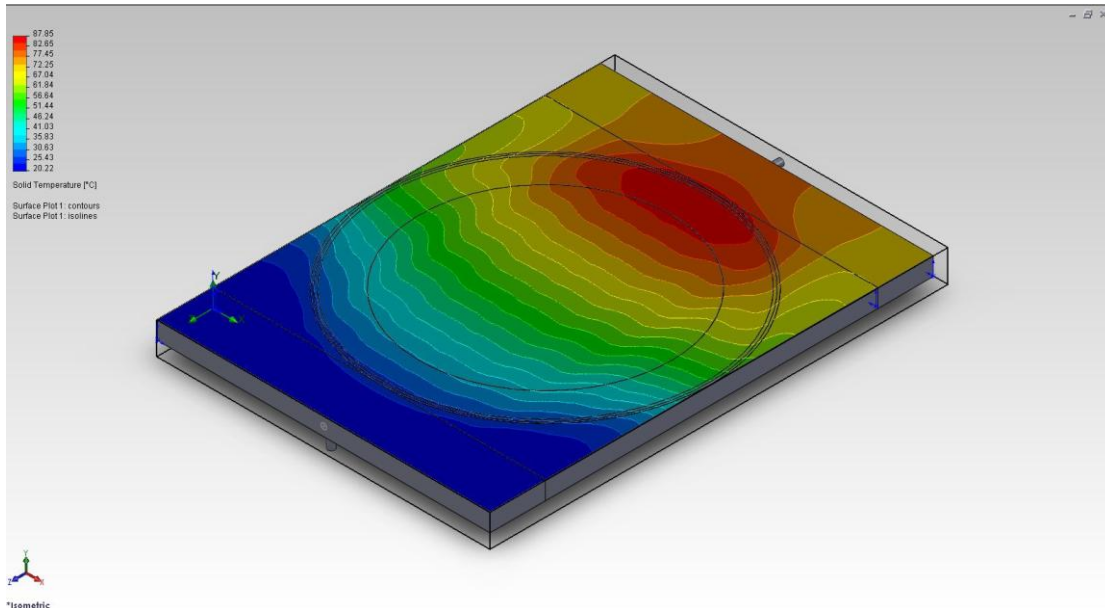
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 5,713469

Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 89,49195<sup>0</sup>C

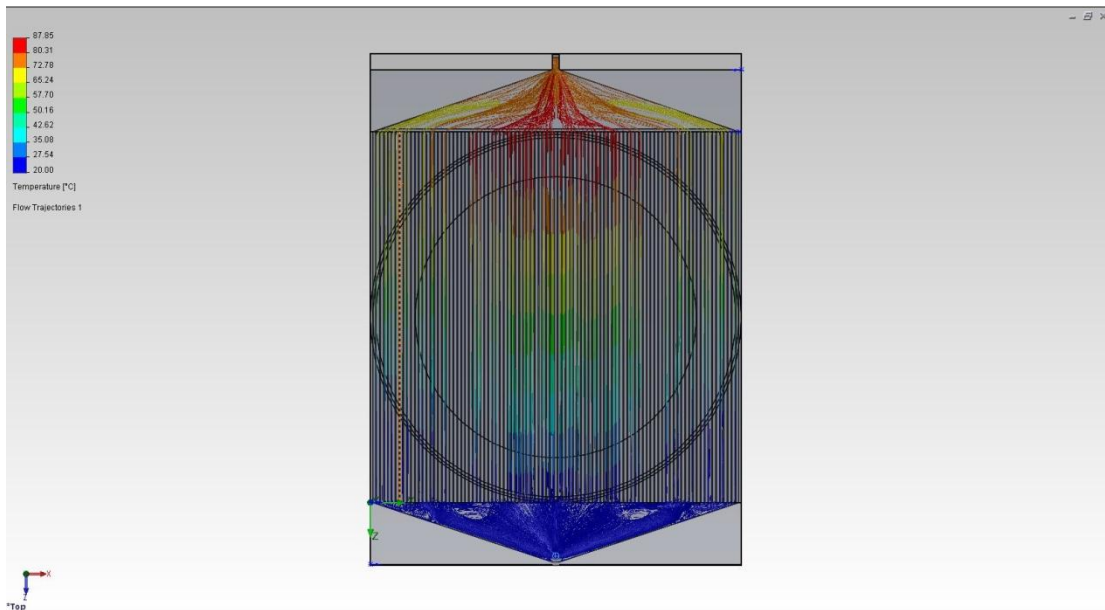
Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 79,9<sup>0</sup>C

Ανάλυση για την 3<sup>η</sup> διάταξη με focal length 1,4m και  $\psi_{rim}=20,25^{\circ}$ .

● Περίπτωση 1<sup>η</sup>



Εικόνα 74



Εικόνα 75

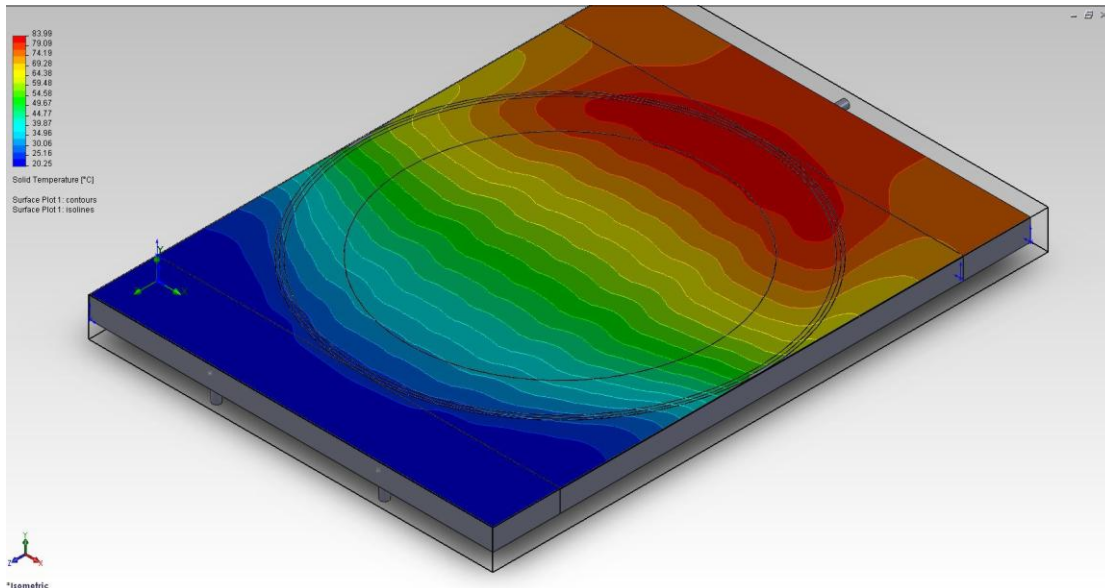
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 17,33826

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 5,873738

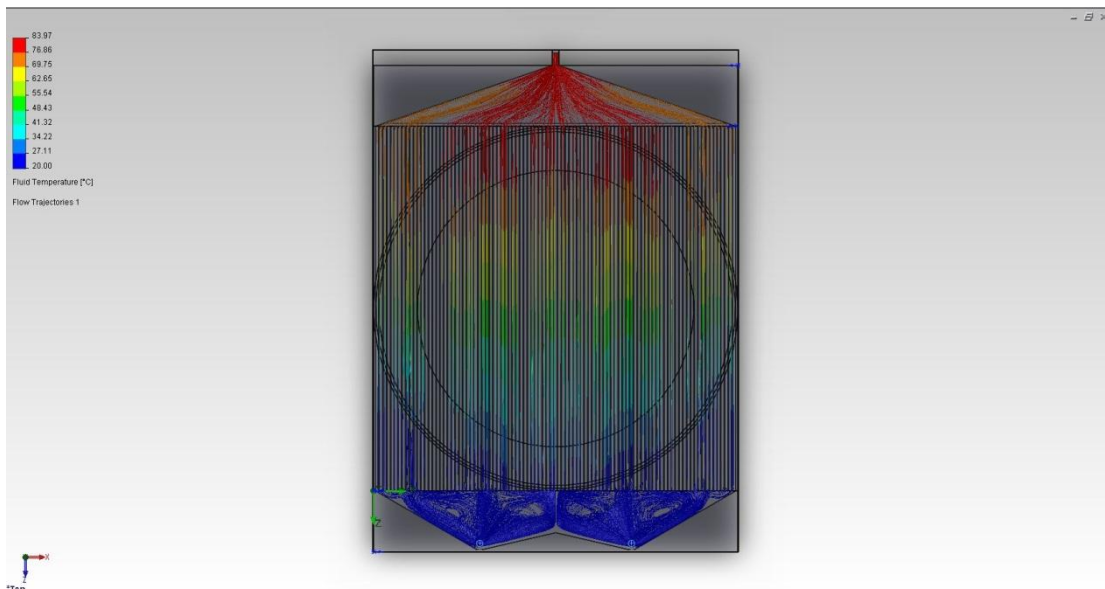
Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 87,74903<sup>0</sup>C

Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 79,0675<sup>0</sup>C

● Περίπτωση 2<sup>η</sup>



Εικόνα 76



Εικόνα 77

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 16,82224

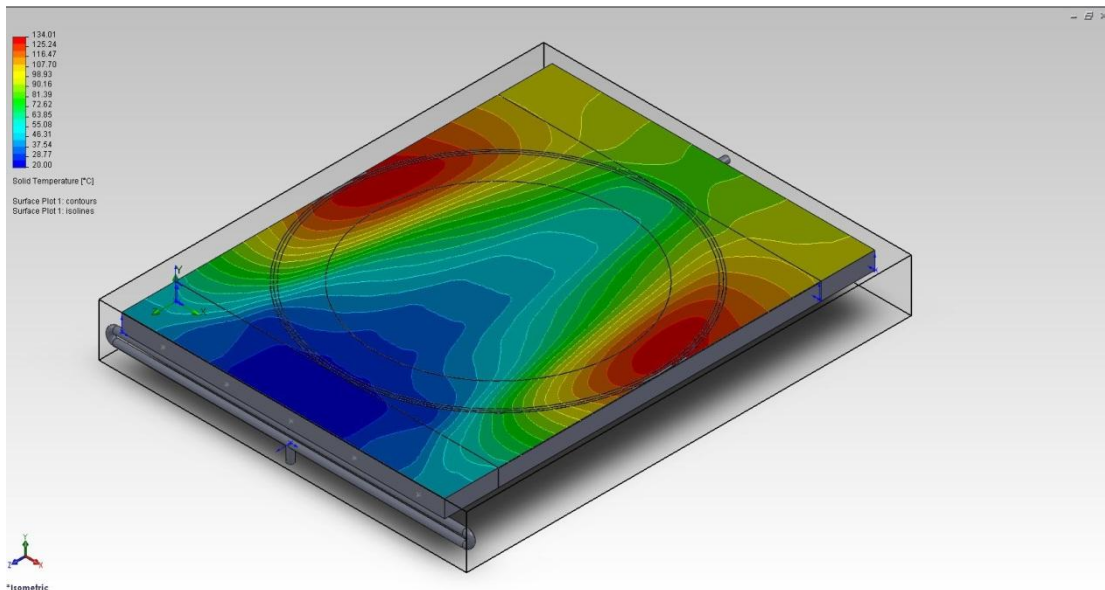
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 3,163837

Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 83,79364<sup>0</sup>C

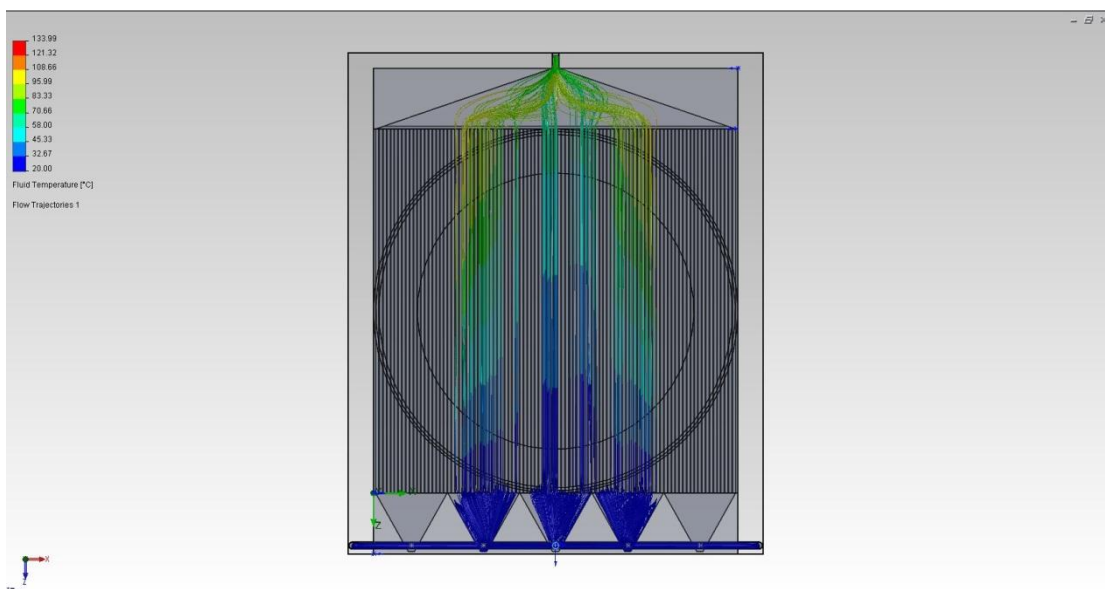
Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 79,3881<sup>0</sup>C



● Περίπτωση 3<sup>η</sup>



Εικόνα 78



Εικόνα 79

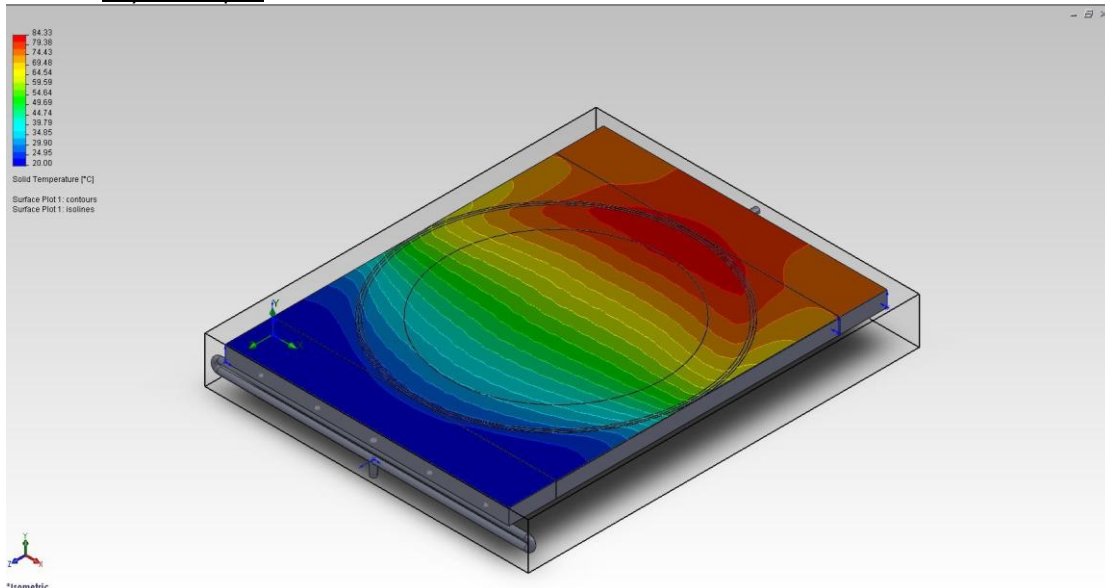
Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 31,43487

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 13,3579

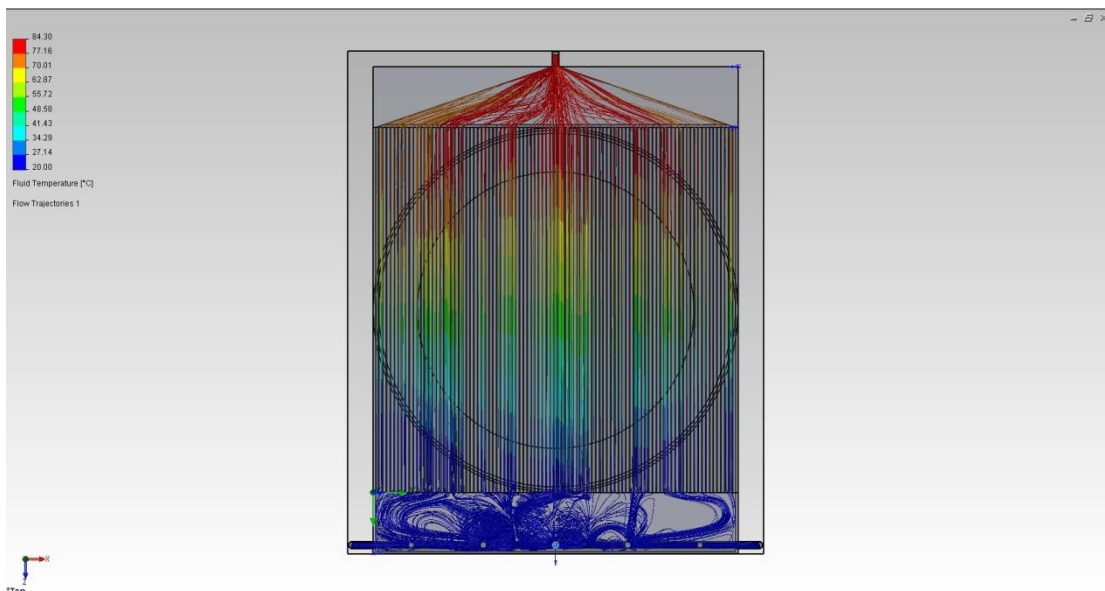
Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 133,8028<sup>0</sup>C

Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 77,7962<sup>0</sup>C

Περίπτωση 4<sup>η</sup>



Εικόνα 80



Εικόνα 81

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του στερεού στην κυκλική περιοχή: 16,89666

Τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο: 2,845329

Μέγιστη θερμοκρασία στερεού στην περιοχή των PV: 84,13449<sup>0</sup>C

Θερμοκρασία εξόδου του νερού: 79,4287<sup>0</sup>C

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα περιπτώσεων και για τις δύο διατάξεις

	περιπτώσεις σχεδιασμού	τυπική απόκλιση θερμοκρασίας πλάκας	τυπική απόκλιση θερμοκρασίας του ρευστού	μέγιστη θερμοκρασία πλακας PV	θερμοκρασία εξοδου του ρευστού
διάταξη 2	1	17,7102	6,082416	88,42185	80,127
	2	17,13983	3,318217	84,33187	79,7229
	3	30,69417	12,8944	131,4213	77,9948
	4	18,08264	5,713469	89,49195	79,9
διάταξη 3	1	17,33826	5,873738	87,74903	79,0675
	2	16,82224	3,163837	83,79364	79,3881
	3	31,43487	13,3579	133,8028	77,7962
	4	16,89666	2,845329	84,13449	79,4287

Το κριτήριο επιλογής είναι, οι τυπικές αποκλίσεις καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία της πλάκας όπου είναι τοποθετημένη η διάταξη του φωτοβολταϊκού, να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Η διατάξεις 2 και 3 εξηγούνται αναλυτικά στο κεφάλαιο για την ανάλυση ροής.

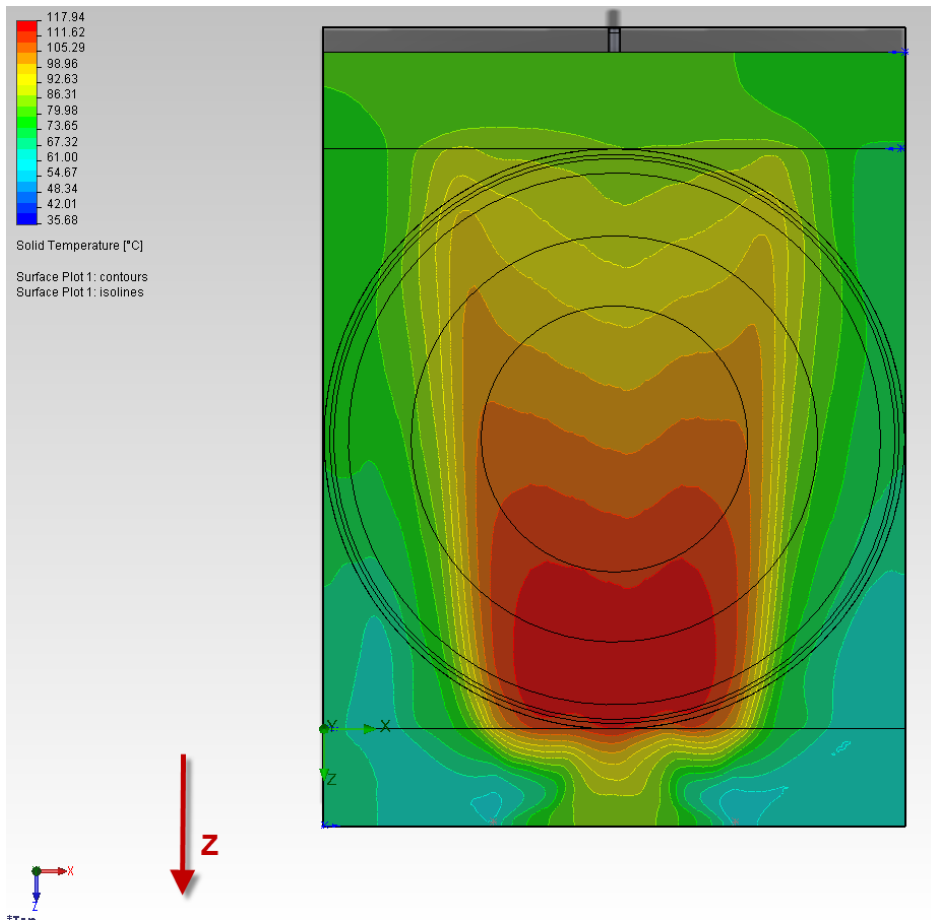
Στον παραπάνω πίνακα είναι σημειωμένες οι τιμές που είναι μικρότερες ανά διάταξη και επίσης η μέγιστη θερμοκρασία.

Με βάση λοιπόν τον παραπάνω πίνακα επιλέγεται ο εναλλάκτης του σχεδιασμού δύο και για τις δύο διατάξεις. Ακόμα όπως φαίνεται και από τις εικόνες ο συγκεκριμένος εναλλάκτης εμφανίζει τη μικρότερη μέγιστη θερμοκρασία σε όλη την επιφάνεια του στερεού. Ο συγκεκριμένος εναλλάκτης θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια.

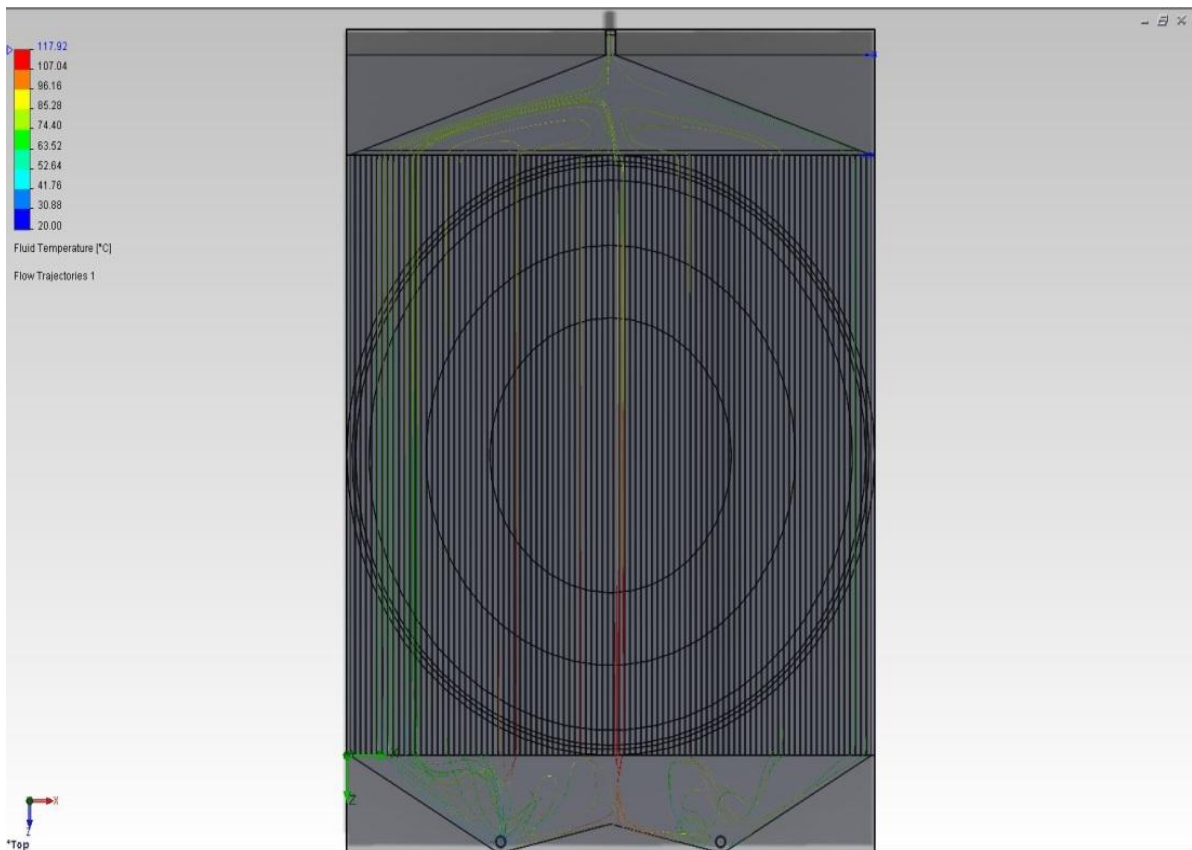
Επίδραση της βαρύτητας

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι για την ανάλυση ροής λάβαμε υπόψη τη βαρύτητα κατά τον άξονα Z, αφού ο εναλλάκτης έχει τοποθετηθεί κάθετα. Όταν ορίσουμε στον άξονα Z την επιτάχυνση της βαρύτητα  $-9,81\text{m/s}^2$  (δηλαδή η είσοδος του εναλλάκτη να είναι από πάνω) τότε εμφανίζεται ανακυκλοφορία λόγω του ότι το θερμό νερό είναι ελαφρύτερο και τείνει να ανέβει πάλι προς τα πάνω. Έτσι το PV δεν ψύχεται σωστά. Άρα θα πρέπει η είσοδος στον εναλλάκτη να γίνεται από κάτω και το θερμό νερό να βγαίνει από την πάνω πλευρά του εναλλάκτη (όρισμα  $9,81\text{m/s}^2$  στον άξονα Z). Ακολουθούν αποτελέσματα με τη λάθος φορά. Τα σωστά έχουν ήδη προαναφερθεί.

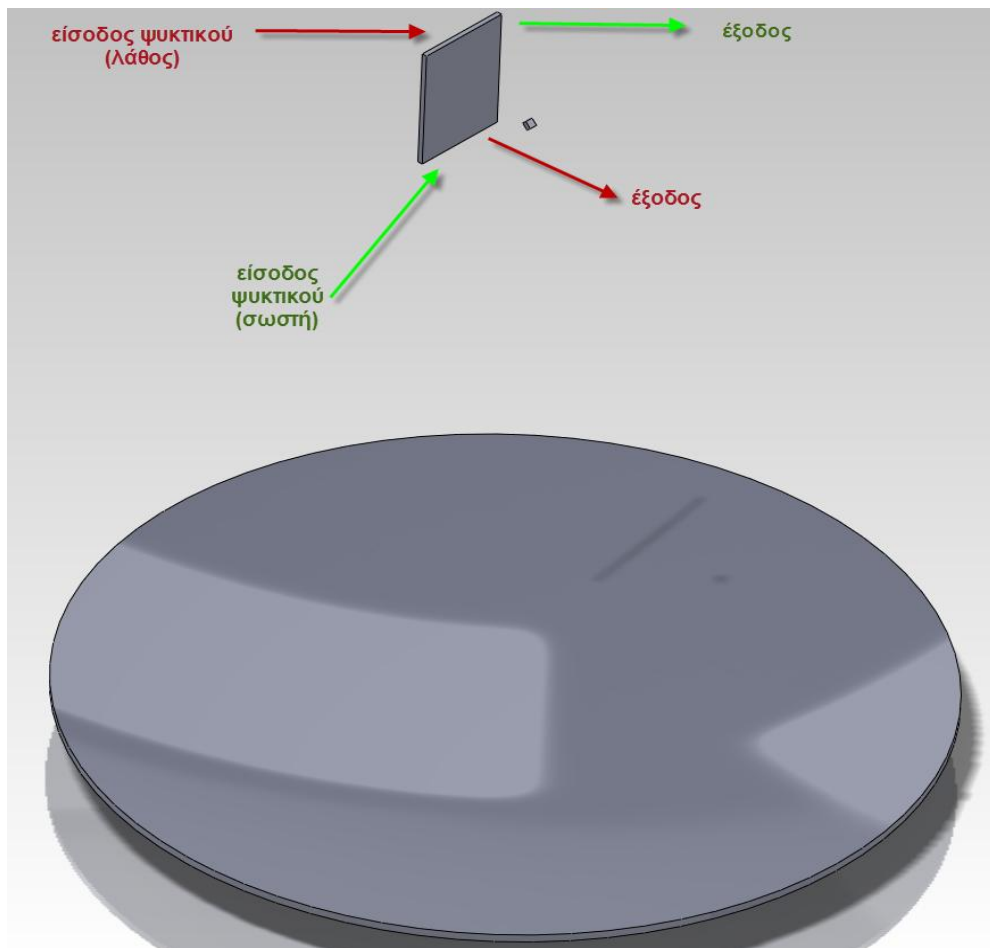




Εικόνα 82



Εικόνα 83



Εικόνα 84

### 5.3 Ανάλυση επιλεγμένου εναλλάκτη

Η ανάλυση του επιλεγμένου εναλλάκτη θα γίνει για τη διάταξη 3, με παραβολικό συλλέκτη που έχει focal length 1,4m και  $\Psi_{rim}=20,25^{\circ}$  και για προσπίπτουσα ακτινοβολία  $1000W/m^2$ . Είναι η περίπτωση που η κατανομή της ακτινοβολίας εμφανίζεται πιο ομοιόμορφη. Ουσιαστικά θα έχουμε τις οριακές συνθήκες που φαίνονται στο παράρτημα Γ.

Τα αποτελέσματα είναι με ανάλυση μεγαλύτερης ακρίβειας. Επιλέχθηκε για το πλέγμα, από την κλίμακα που παρέχει το flow simulation του Solidworks, το επίπεδο 5. Δίνονται στο παράρτημα Δ κάποιες πληροφορίες για το πώς σχηματίζει το πλέγμα στο Solidworks.

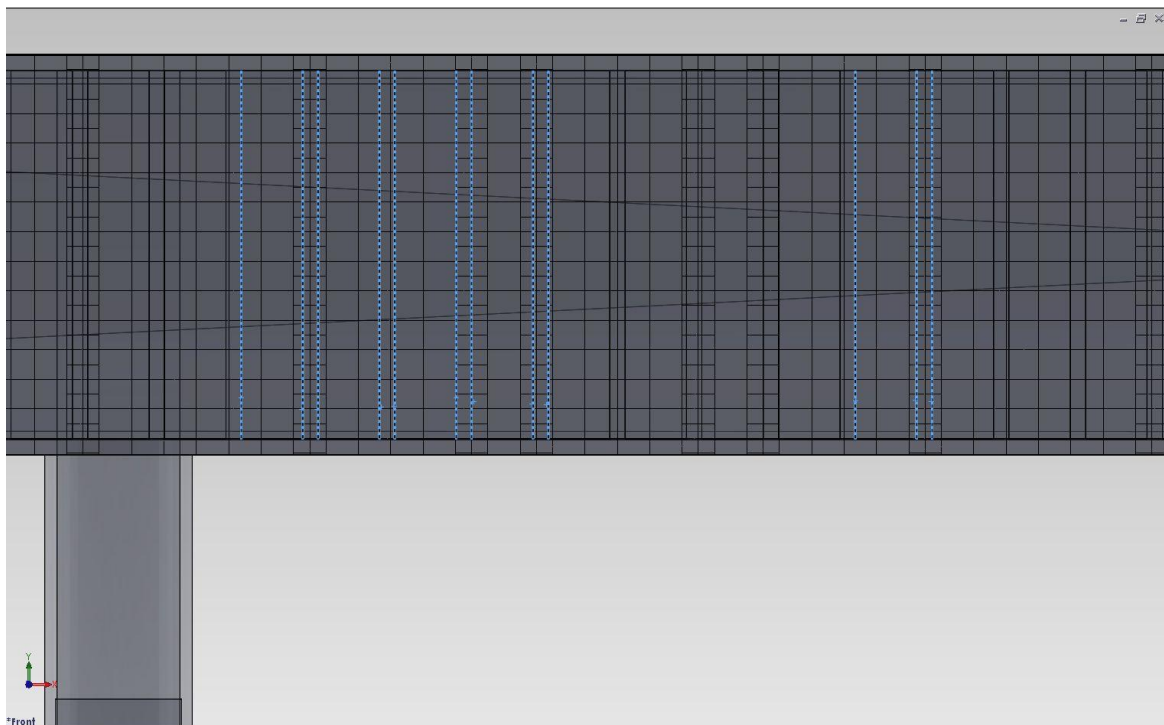
Έτσι έχουμε τα αντίστοιχα «κελιά».

- Κελιά ρευστού: 300.004
- Κελιά στερεού: 33.462
- Κελιά ρευστού-στερεού: 537.270

Τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης είναι:

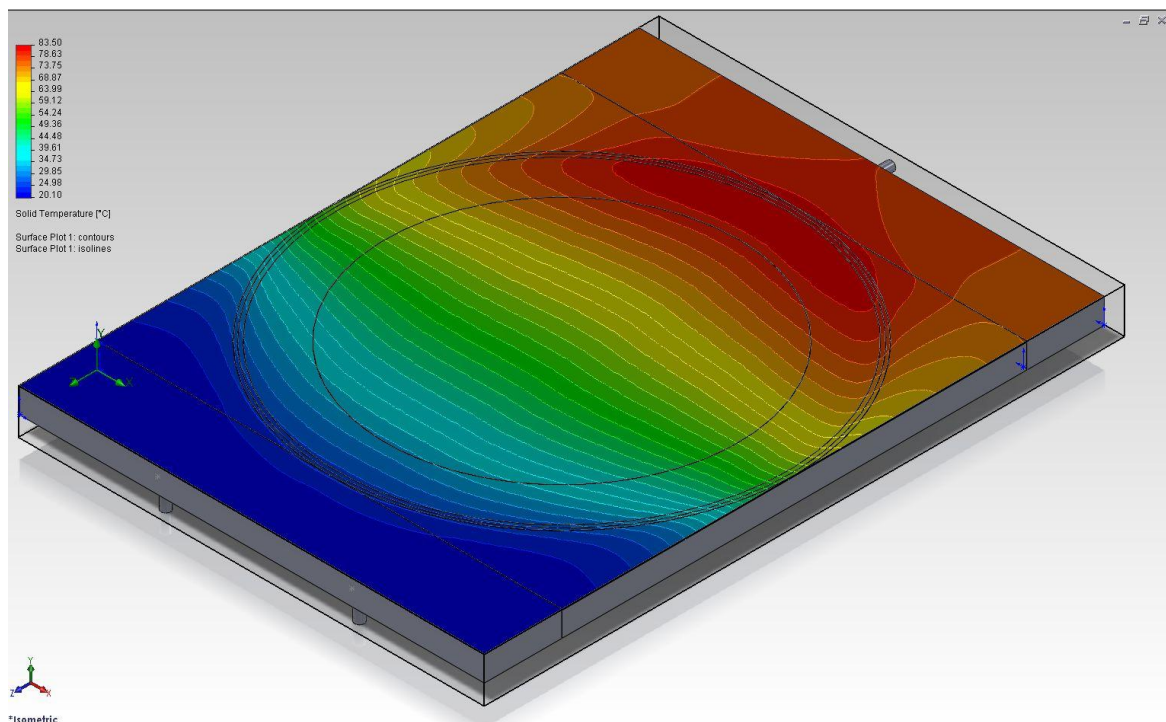
- Μέγιστη θερμοκρασία του στερεού:  $83,4782^{\circ}C$
- Μέγιστη θερμοκρασία του ρευστού:  $83,5043^{\circ}C$

- Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού:  $79,4793^{\circ}\text{C}$  (σε προηγούμενη ανάλυση με λίγο μικρότερη ακρίβεια στους υπολογισμούς είχε τιμή  $79,3881^{\circ}\text{C}$ )



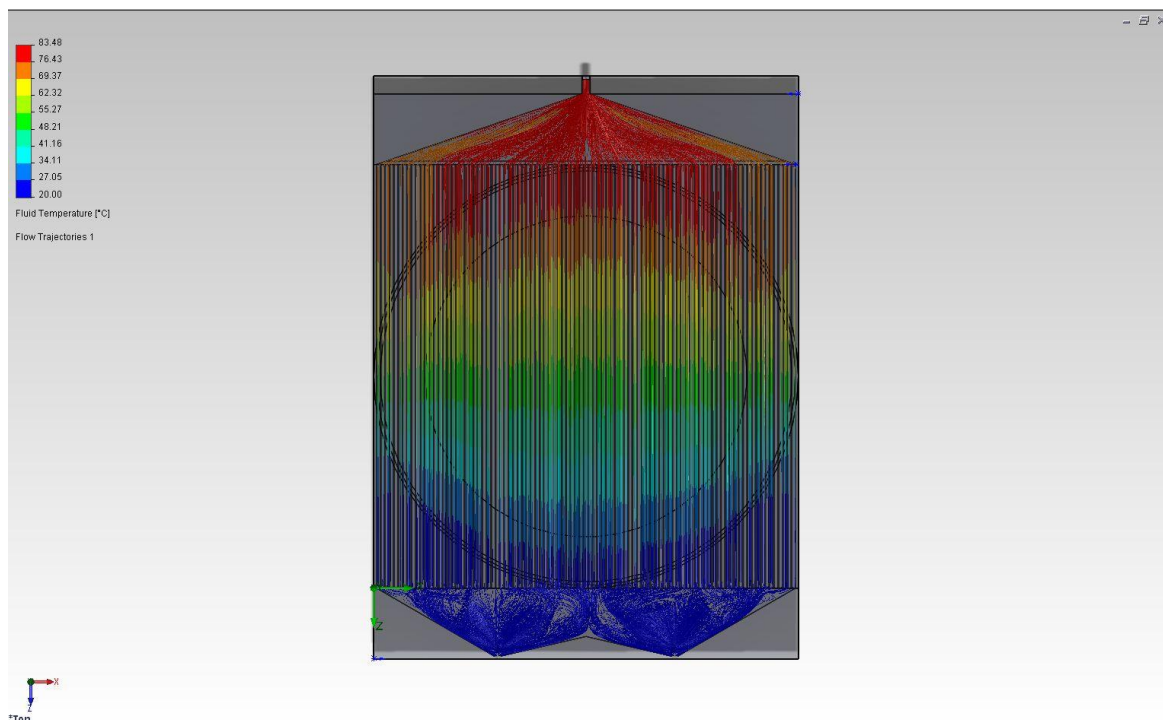
Εικόνα 85

Στην πάνω εικόνα φαίνεται το πλέγμα στην είσοδο των αγωγών. Με διακεκομμένο μπλε είναι επιλεγμένα μερικά τοιχώματα των αγωγών. Όπως διακρίνουμε στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε τρεις κόμβους ανάμεσα στα τοιχώματα, έτσι ώστε να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα. Κανονικά θα έπρεπε να επιλεγεί πυκνότερο πλέγμα αλλά αυτό απαιτούσε πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ από τον υπολογιστή.



Εικόνα 86

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην πάνω πλάκα του εναλλάκτη που είναι σε επαφή με την κάτω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πάνελ, ενώ στην παρακάτω για 800 γραμμές ροής του ρευστού, φαίνεται η πορεία του ρευστού μέσα στον εναλλάκτη και η αντίστοιχη θερμοκρασία του ρευστού κατά μήκος του εναλλάκτη.

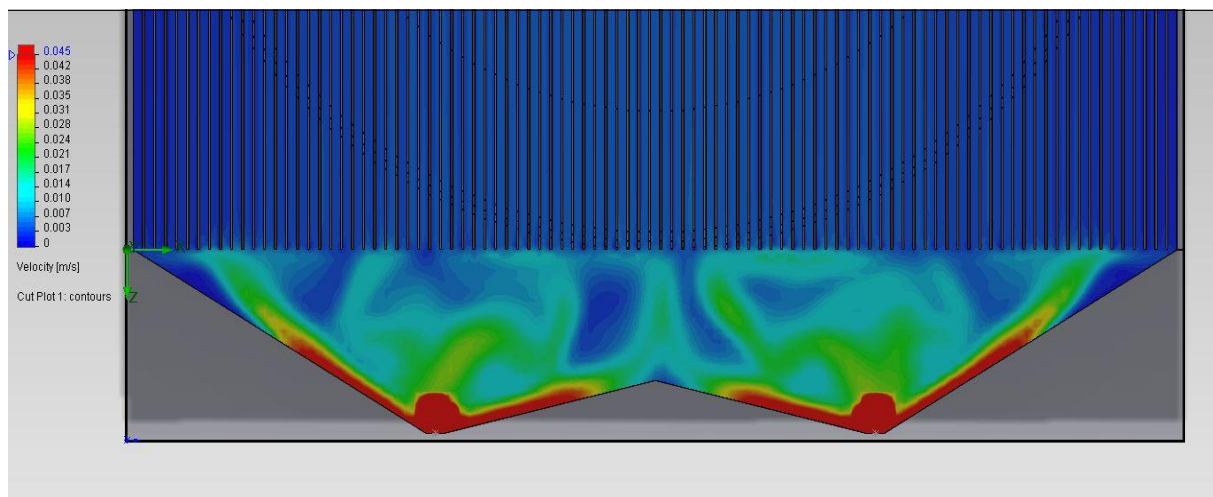


Εικόνα 87

### Η ταχύτητα του ρευστού:

- στους δύο αγωγούς εισόδου είναι 0,371m/s
- στον αγωγό εξόδου έχει μέση τιμή 0,753m/s, μέγιστη τιμή 0,846m/s, ελάχιστη τιμή 0,590m/s.

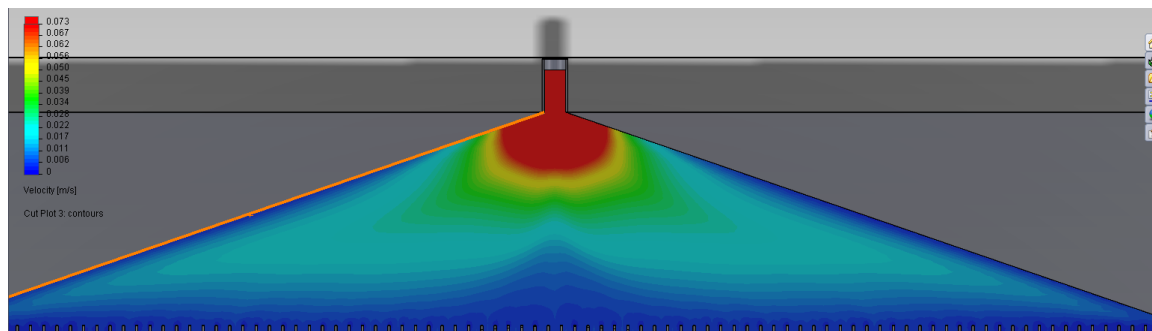
Τα ρευστά κατά την είσοδό του από τους δύο αγωγούς με βάση την ταχύτητα, σε ένα επίπεδο στη μέση του ύψους των καναλιών.



Εικόνα 88

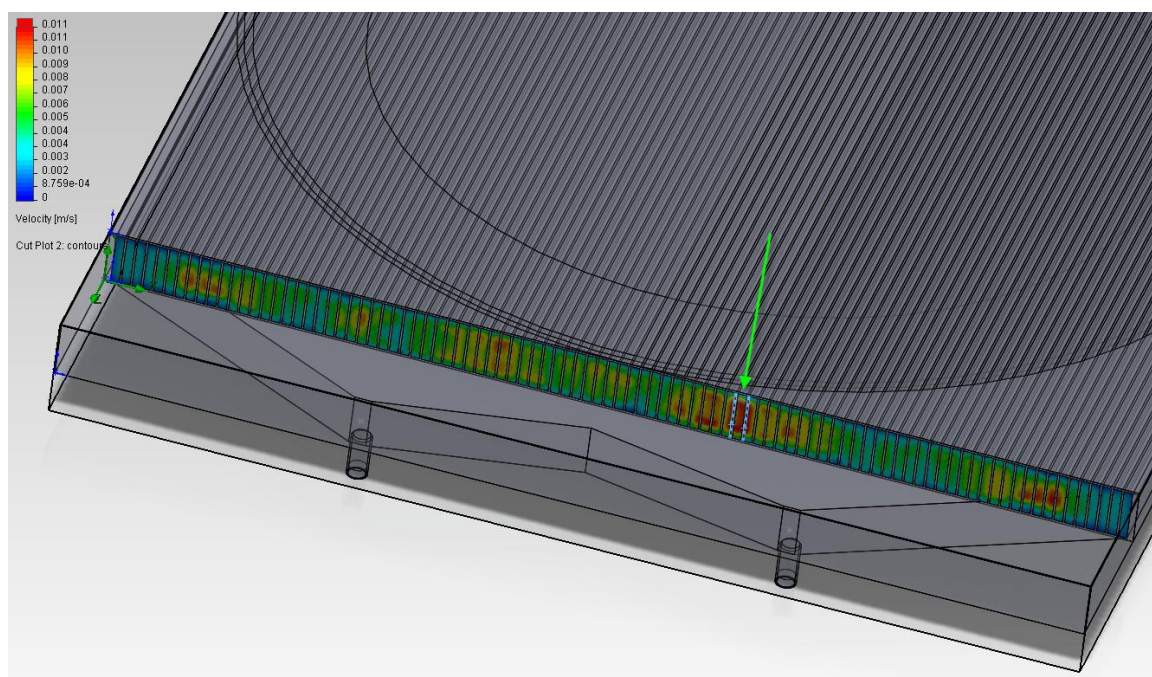


Ομοίως για την έξοδο



Εικόνα 89

Η ταχύτητα του ρευστού στην είσοδο κάθε αγωγού-καναλιού.



Εικόνα 90

Θα υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds για το αλάκι που φαίνεται ότι εμφανίζει τη μέγιστη ταχύτητα και είναι σημειωμένο στην πάνω εικόνα.

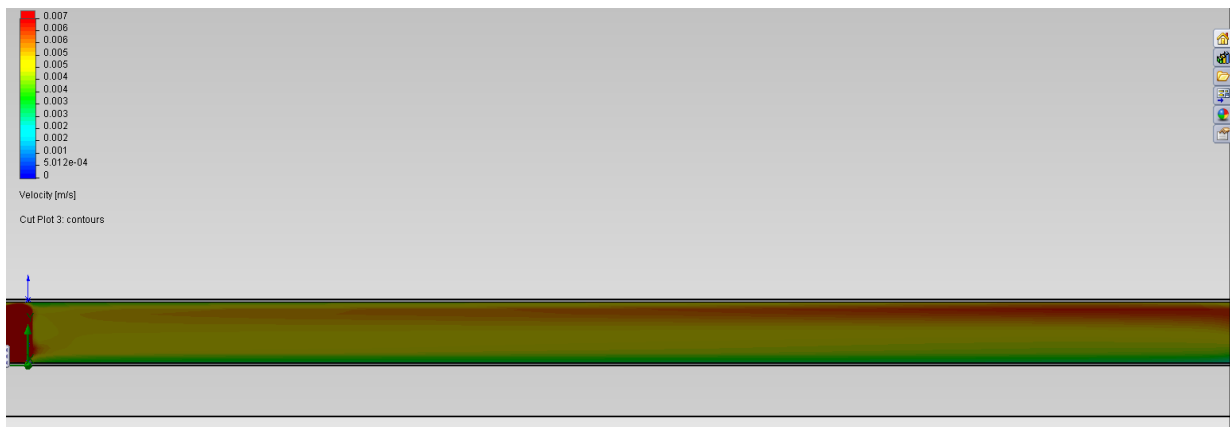
Το ρευστό εισέρχεται στον αγωγό με μέση ταχύτητα 0,006m/s και μέγιστη ταχύτητα 0,010m/s.

$$Re = \frac{uD_h}{\nu}$$

$$D_h = \frac{4A}{\Pi}$$

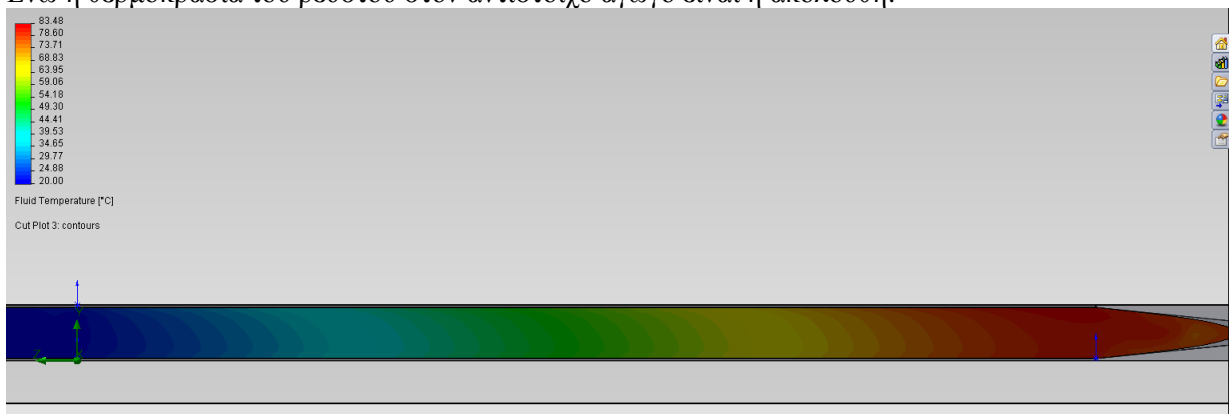
Το Reynolds για τη μέγιστη ταχύτητα είναι  $Re=17,14$ .

Η ταχύτητα κατά μήκος αυτού του αγωγού φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Είναι μία τομή στο κέντρο του αγωγού.



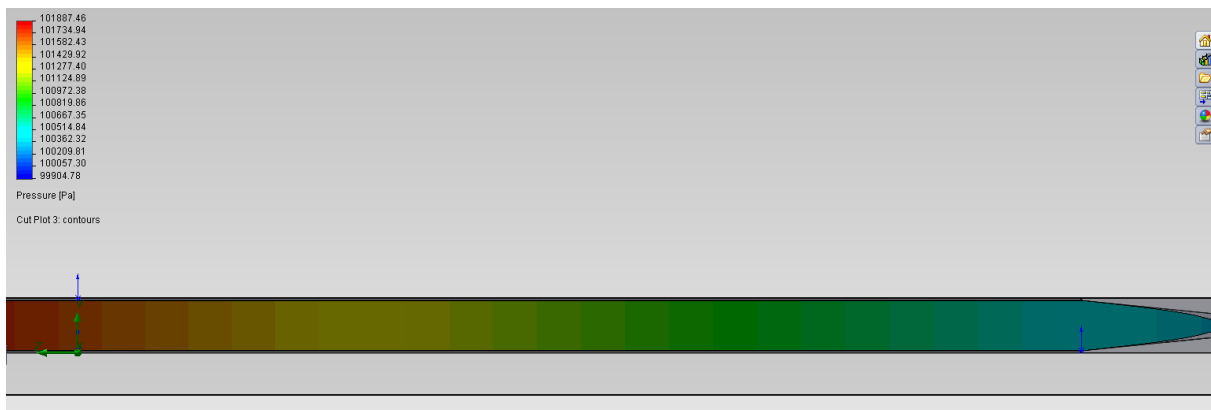
Εικόνα 91

Ενώ η θερμοκρασία του ρευστού στον αντίστοιχο αγωγό είναι η ακόλουθη:



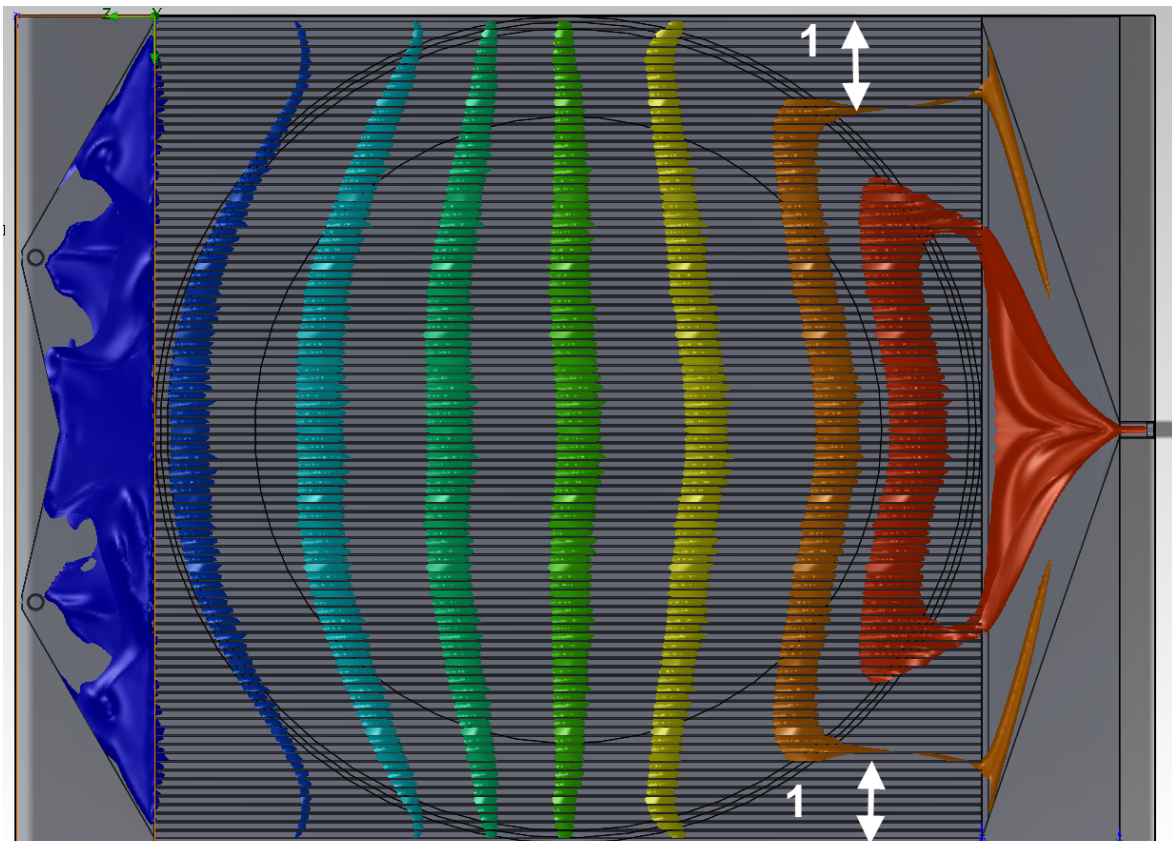
Εικόνα 92

Και η πτώση πίεσης από 101887Pa στα 99904,78Pa στην έξοδο του εναλλάκτη.



Εικόνα 93

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι ισοθερμοκρασιακές του ρευστού, από αριστερά προς δεξιά κατά χρωματισμό, των 20,5°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C, 75°C, 80°C.



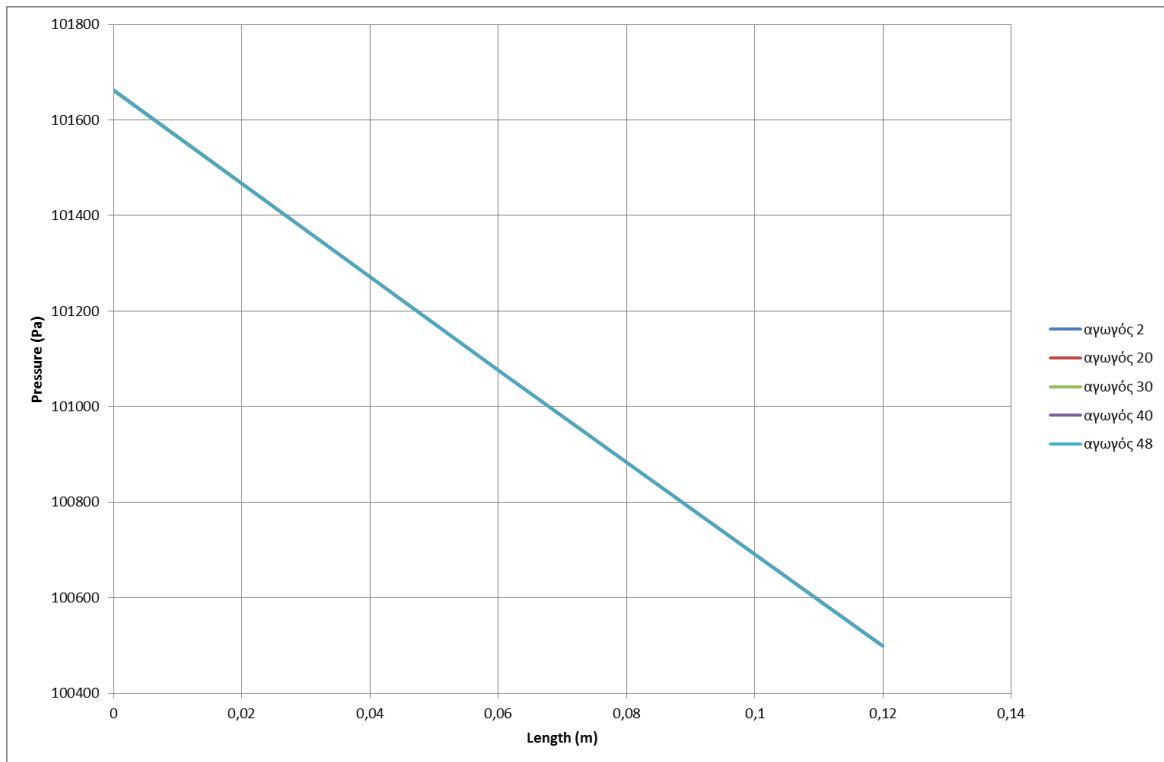
Εικόνα 94

Από το αποτέλεσμα συμπεραίνουμε ότι ίσως θα ήταν καλύτερα να υπήρχε μία διαφορετική κατανομή παροχών νερού ανά αγωγό. Δηλαδή:

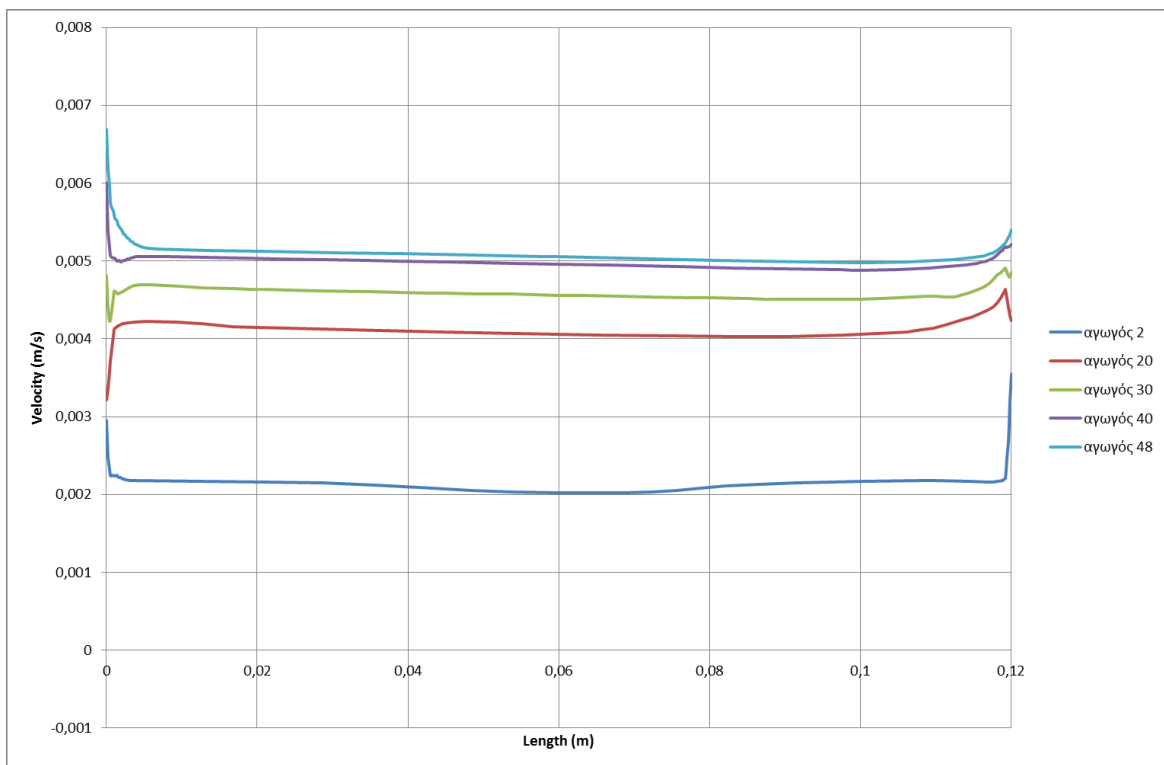
Από της περιοχές που χαρακτηρίζονται «1» να είχαμε μικρότερη παροχή και η διαφορά να διοχετεύονταν στους κεντρικούς αγωγούς. Και πάλι όμως μπορεί να υπήρχε ανομοιομορφία εξαιτίας τις ιδιομορφίας να προσπίπτει πάνω στον εναλλάκτη θερμότητα υπό τη μορφή ομόκεντρων κύκλων.

Στη συνέχεια θα δούμε τη θερμοκρασία, την πτώση πίεσης, την ταχύτητα και την πυκνότητα κατά μήκος των αγωγών 2,20,30,40,48(στο μέσω αυτών των αγωγών).

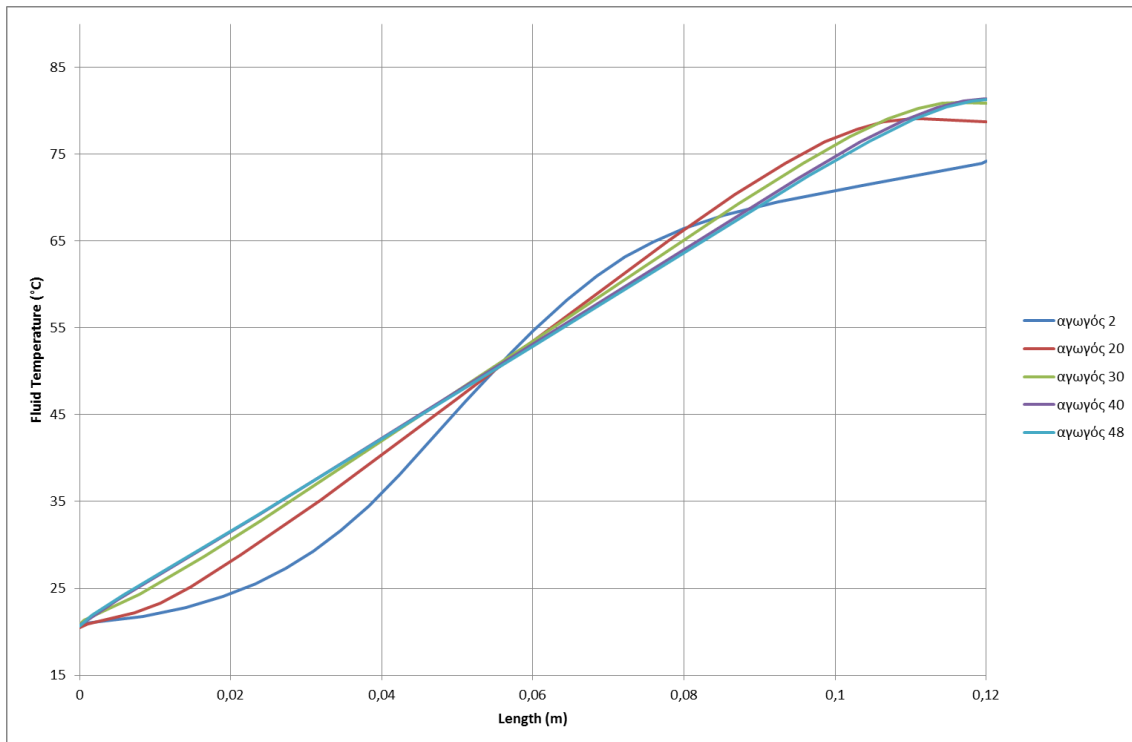




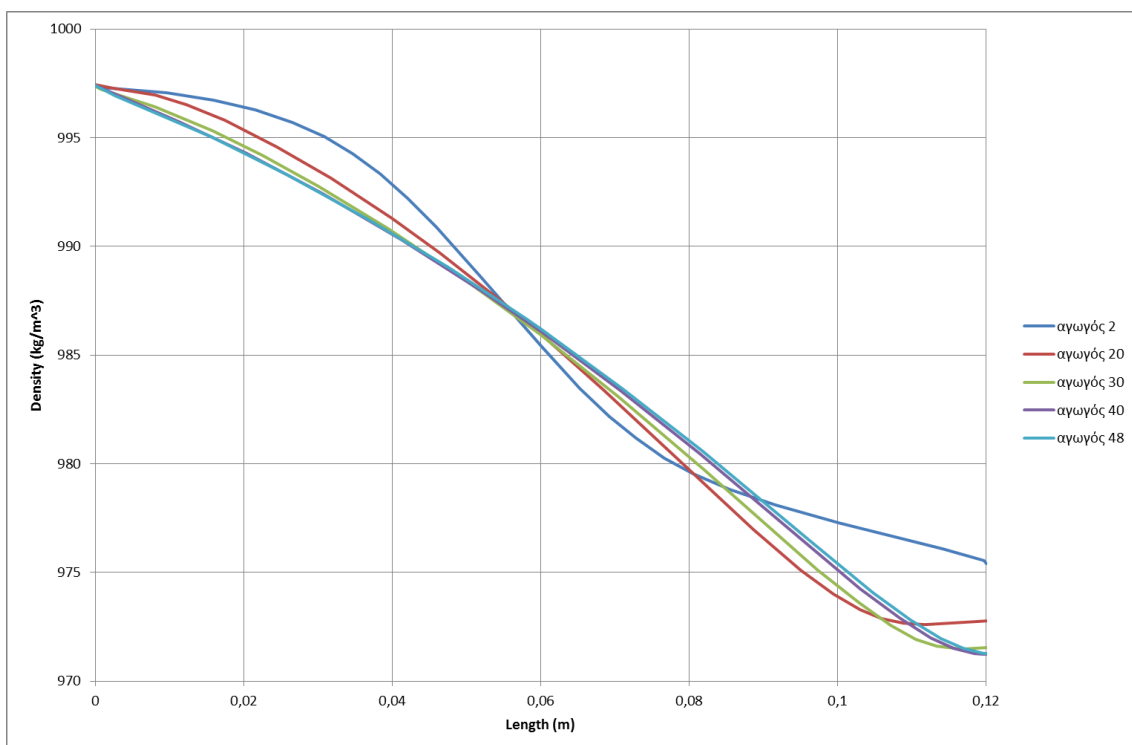
Διάγραμμα 68



Διάγραμμα 69

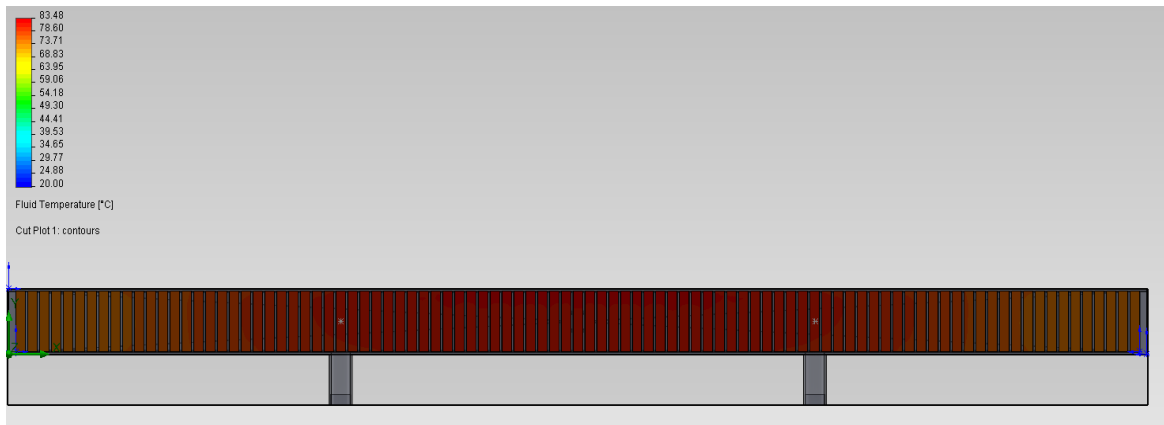


Διάγραμμα 70

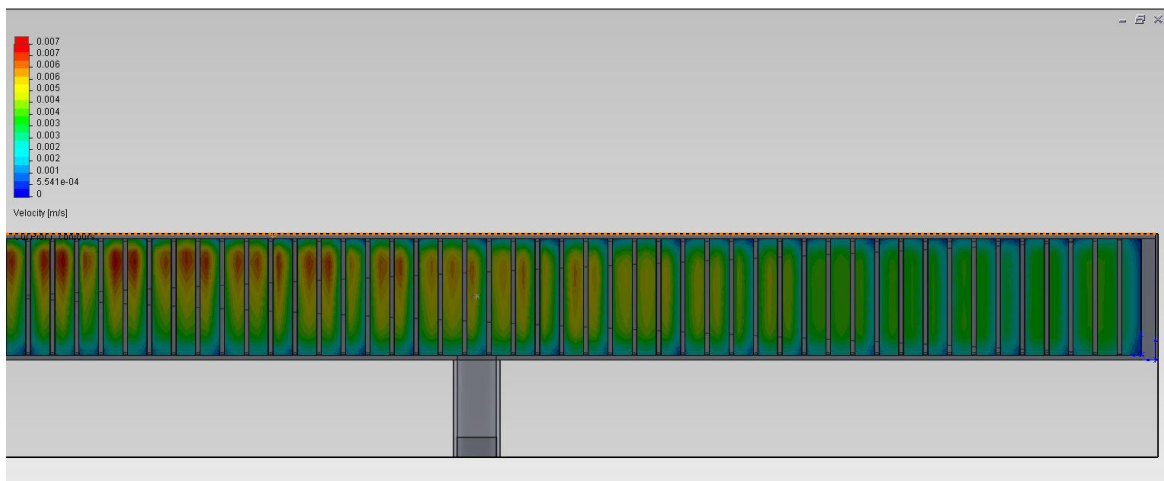


Διάγραμμα 71

Η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο από κάθε αυλάκι φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

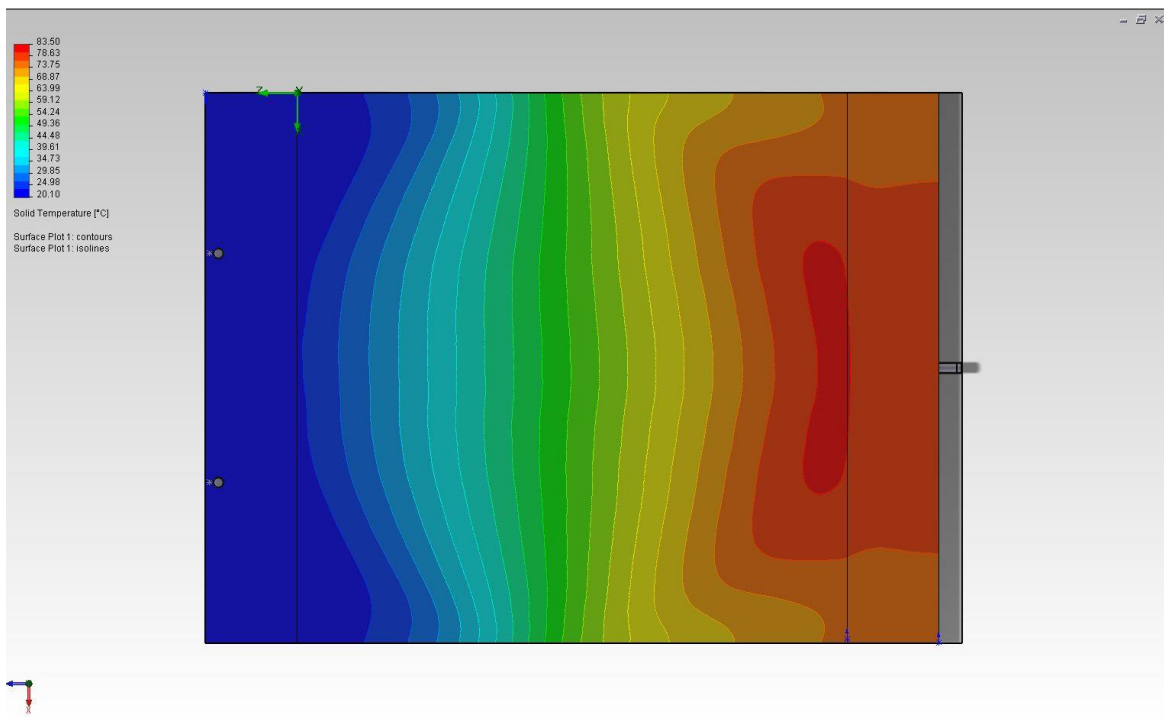


Εικόνα 95



Εικόνα 96

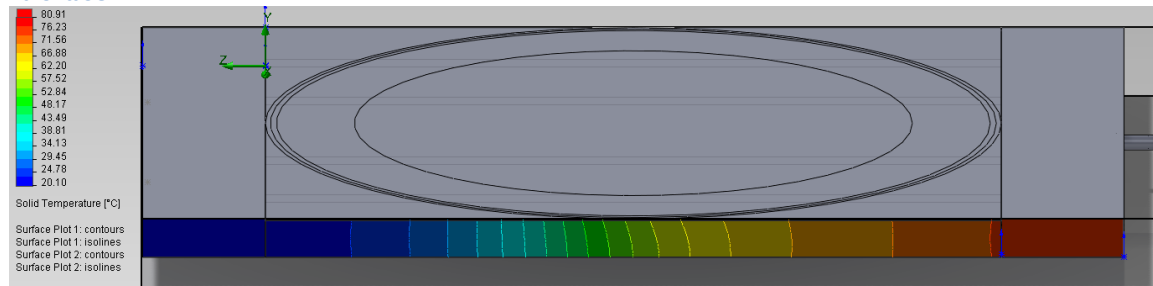
Στην πάνω εικόνα φαίνεται για τους μισούς αγωγούς η ταχύτητα στην έξοδο. Όπως παρατηρούμε η ταχύτητα στην έξοδο των αγωγών δεν ξεπερνάει τα  $0,007\text{m/s}^2$ .



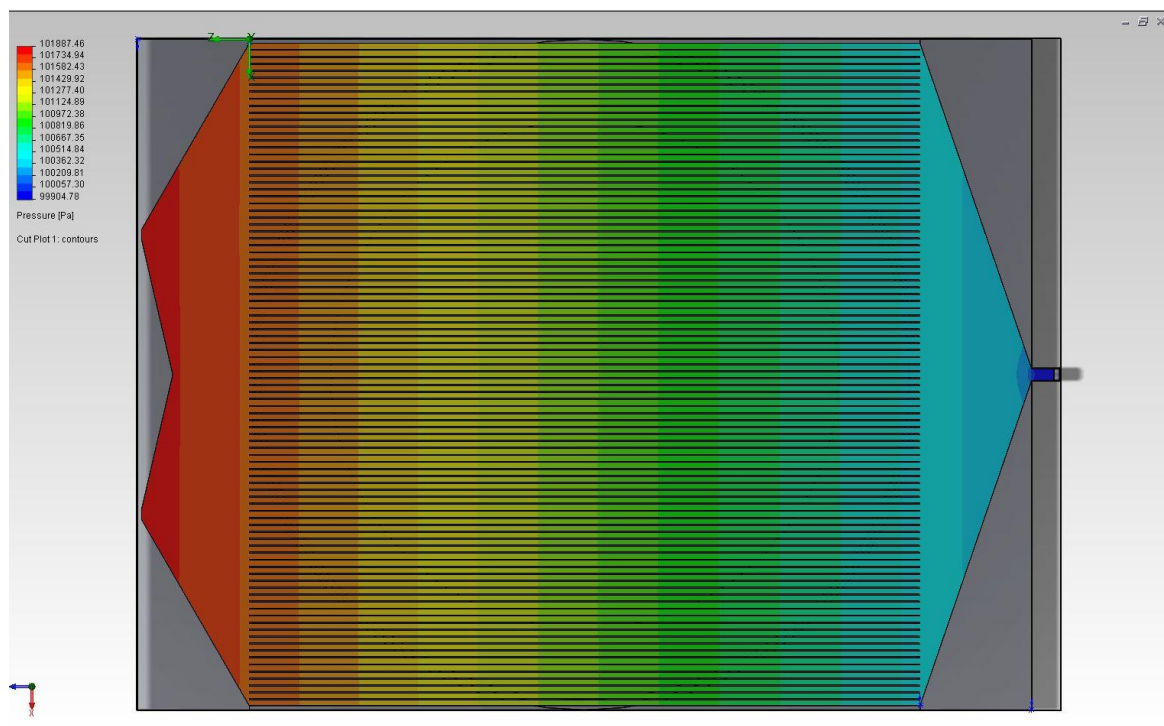
Εικόνα 97

Η θερμοκρασία του στερεού στην κάτω επιφάνεια του εναλλάκτη, φαίνεται στην πιο πάνω εικόνα. Στην κάτω επιφάνεια έχουμε θεωρήσει ότι υπάρχει μόνωση, οπότε απώλειες προς το περιβάλλον θα είναι ελάχιστες. Ομοίως και για τις πλαϊνές επιφάνειες που η θερμοκρασία τους δεν ξεπερνά τους 80,9°C.

Εικόνα 98



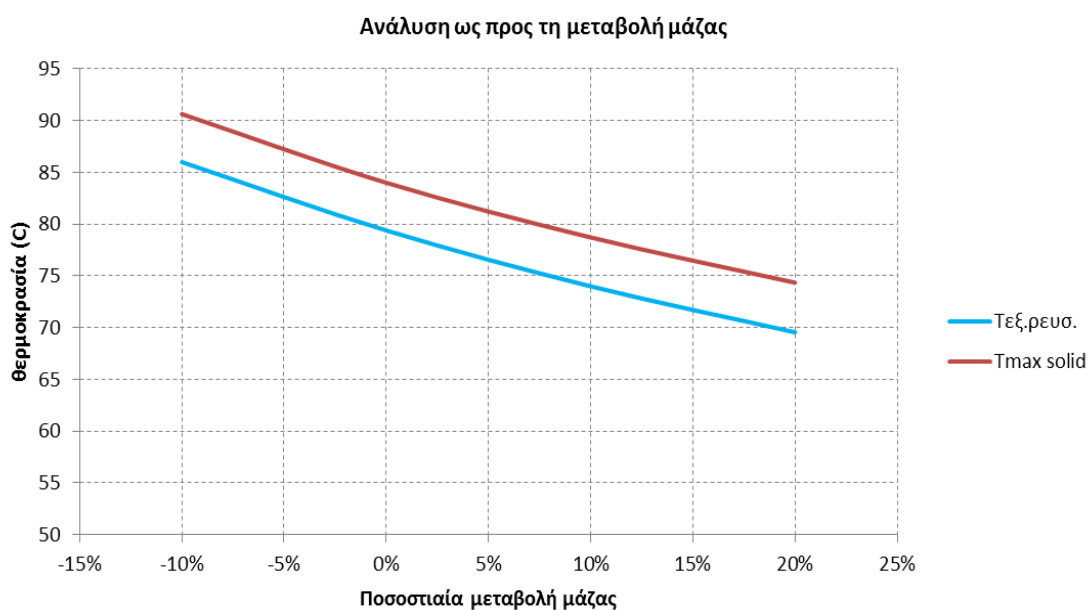
Η πτώση πίεσης στον εναλλάκτη είναι 1982,68 Pa και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 99

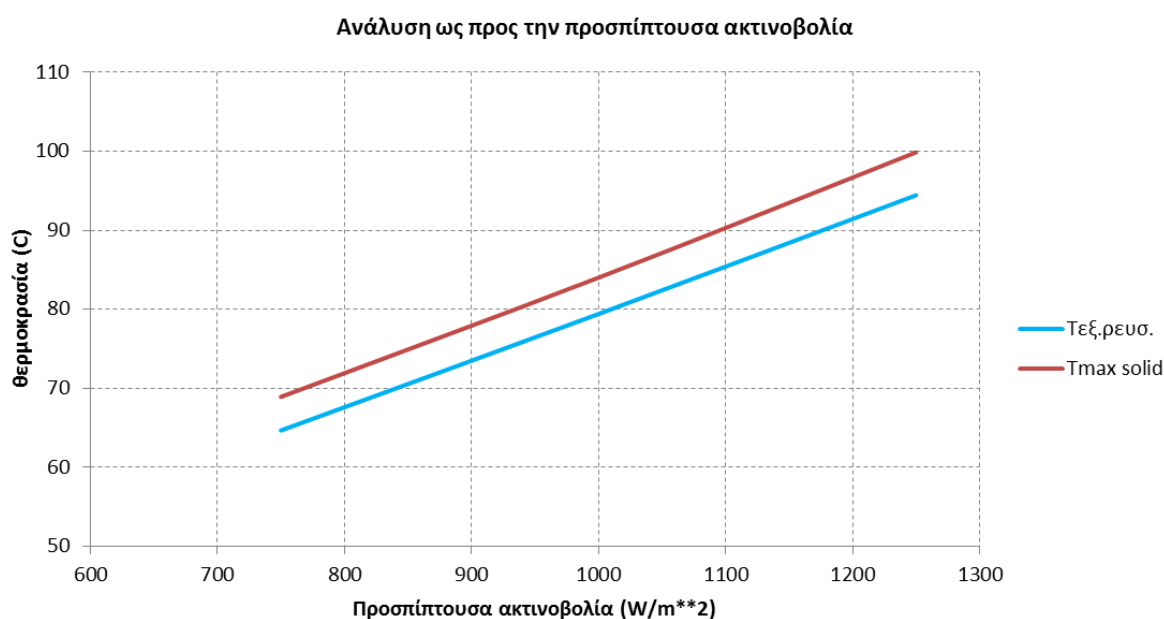
### 5.3.1 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις συνθήκες λειτουργίας

Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την μεταβολή της συνολικής μάζας του νερού που εισέρχεται στον εναλλάκτη. Ο εναλλάκτης δέχεται σταθερά τη συγκεντρωμένη ακτινοβολία από το κάτοπτρο για  $1000\text{W/m}^2$ . Η παροχή μάζας μεταβάλλεται κατά  $-10\%$ ,  $0\%$ ,  $+10\%$  και  $+20\%$  σε σχέση με την αρχική των  $2,25 \cdot 10^{-3}\text{kg/sec}$ . Έτσι μετά από προσομοιώσεις στο Solidworks, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 72

Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Έχουν ληφθεί δεδομένα για ακτινοβολία  $750\text{W/m}^2$ ,  $1000\text{W/m}^2$  και  $1250\text{W/m}^2$ , υπό σταθερή παροχή μάζας  $2,25 \cdot 10^{-3}\text{kg/sec}$ . Οπότε το διάγραμμα που προκύπτει σε αυτήν την περίπτωση είναι:



Διάγραμμα 73

Τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι προσεγγίζουν με αρκετή ακρίβεια την αναμενόμενη μορφή. Η απόκλιση που παρουσιάζει το δεύτερο διάγραμμα οφείλεται στην έλλειψη περισσότερων σημείων. Για την πλήρη χάραξη όλης της καμπύλης απαιτούνται περισσότερες προσομοιώσεις.

Τα ακριβή αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις στο Solidworks φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες.

ποσοστιαία μεταβολή μάζας	Τεξ.ρρευτού	Tmax solid
-10%	86	90,64
0%	79,4	84
10%	74	78,72
20%	69,56	74,35

ακτινοβολία W/m**2	Τεξ.ρρευτού	Tmax solid
750	64,66	68,91
1000	79,4	84
1250	94,44	99,87

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 Προτεινόμενο design για τη διάταξη

Έχει σχεδιαστεί ένα μοντέλο για τη διάταξη 3. Αναφέρουμε επιγραμματικά τις βασικές διαστάσεις της:

Χρησιμοποιείται πιάτο με:

- διάμετρο 1m
- $\Psi_{rim}=20,25^{\circ}$
- Focal length  $f=1,4m$
- $X=162,64mm$ (απόσταση του PV-εναλλάκτη από το δεύτερο ανακλαστές)
- Εμβαδό ανακλαστικής επιφάνειας  $e_{anakl}=0,7916m^2$
- Άνοιγμα συλλέκτη που δέχεται την ακτινοβολία  $e_{con}=0,7854 m^2$
- Το ύψος της παραβολής είναι  $h=46,428mm$
- Ο λόγος συγκέντρωσης  $CR=69,44$

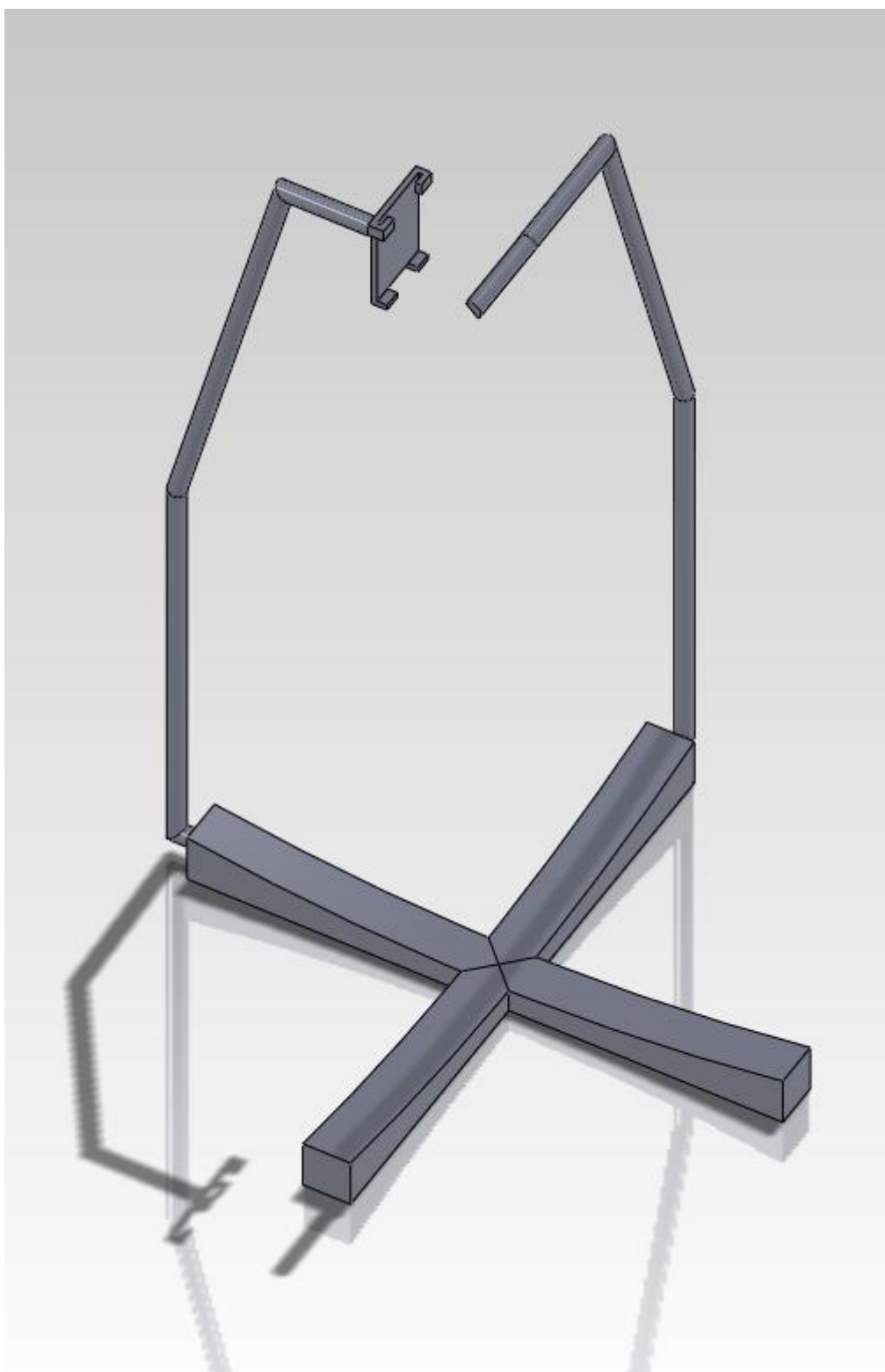


Εικόνα 100



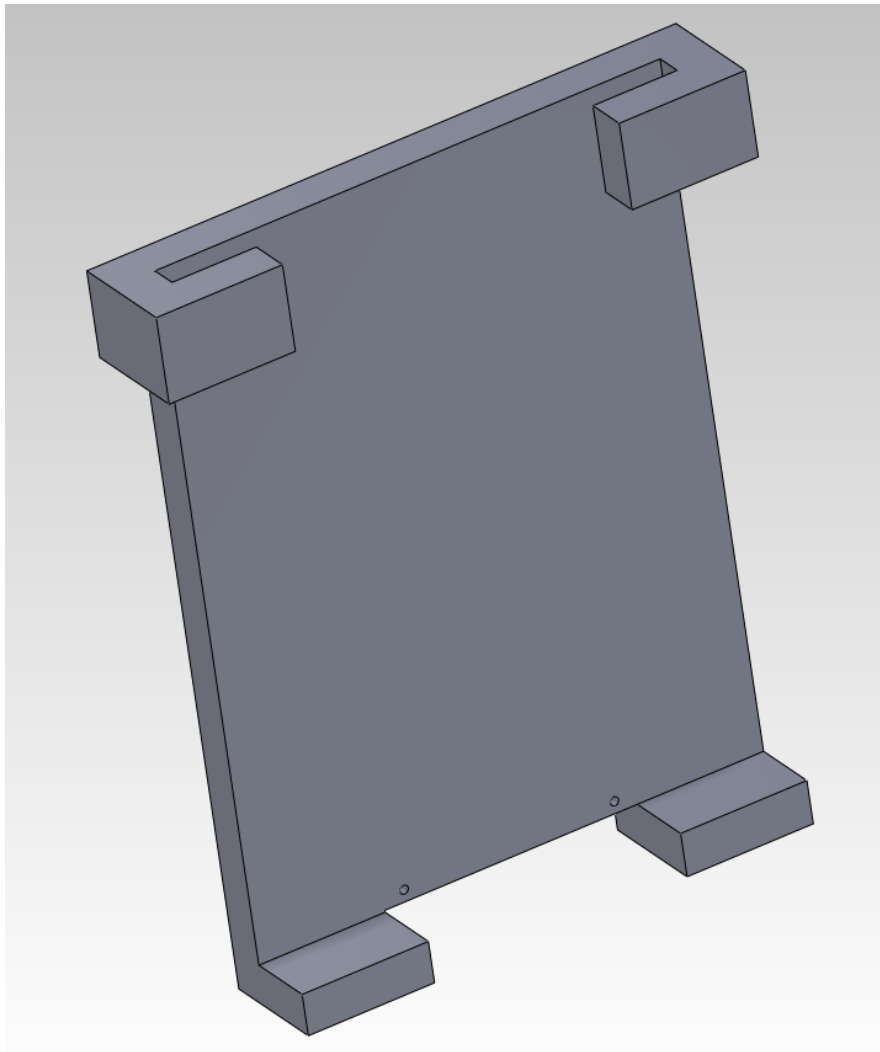
### Κύρια μέρη μοντέλου

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η βάση της διάταξης με τους δύο βραχίονες. Ο «σταυρός» είναι η βάση όπου θα τοποθετηθεί ο παραβολικός συλλέκτης. Αυτή η βάση θα στηριχθεί πάνω στο μηχανισμό για την παρακολούθηση της τροχιάς του ηλίου.



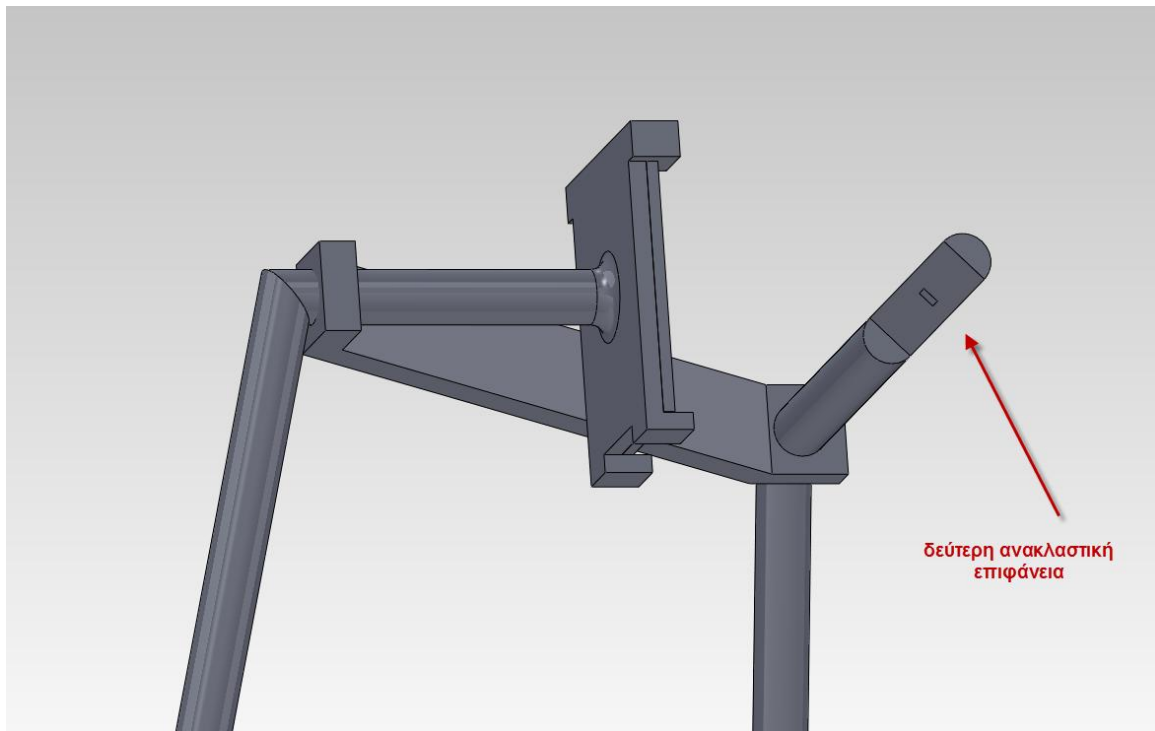
Εικόνα 101

Η βάση όπου θα τοποθετηθεί ο εναλλάκτης-PV διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα και σταθερά ο εναλλάκτης-PV, χωρίς να προκαλείται σκίαση στα ηλιακά κελιά. Οι διαστάσεις του μπορεί να ποικίλουν, ανάλογα με το πάχος της μόνωσης που θα επιλεγεί.



Εικόνα 102

Ο βραχίονας που στηρίζει τον εναλλάκτη θα ενώνεται με το δεύτερο βραχίονα με ένα «νεύρο» για λόγους στατικότητας. Η προέκταση του δεύτερου βραχίονα μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα στην άκρη της, όπου είναι και το focal point, έτσι ώστε να προσδίδει στις ανακλώμενες ακτίνες από το παραβολικό κάτοπτρο, την επιθυμητή κλίση των  $45^{\circ}$ .



Εικόνα 103

Η είσοδος του ψυκτικού υγρού στον εναλλάκτη θα γίνεται από κάτω προς τα πάνω όπως έχουμε προαναφέρει σε προηγούμενη ενότητα.

## Βιβλιογραφία

- azurspace. (n.d.). Ανάκτηση από <http://azurspace.de/>
- Chow, T. T. (2009). *A review on photovoltaic/thermal solar technology*.
- emcore. (n.d.). Ανάκτηση από [http://www.emcore.com/solar\\_photovoltaics/](http://www.emcore.com/solar_photovoltaics/)
- EPIA. (n.d.). *EPIA SET for 2020*.
- EPIA. (n.d.). *Global Market Outlook for photovoltaics*.
- EWEA. (n.d.). *EU Energy policy to 2050*.
- Gordon, J., & Feuermann, D. (2005). *Optical performance at the thermodynamic limit with tailored imaging designs*.
- Hebrink, T. J., & 3M Company. (2009). *Infra-red transmissive mirrors for concentrated photovoltaics*.
- Kribus, A., Kaftori, D., Mittelman, G., Hirshfeld, A., Flitsanov, Y., & Dajan, A. (2006). *A miniature concentrating photovoltaic and thermal system*.
- Luque, A., & Andreev, V. (n.d.). *Concentrator Photovoltaics*. Springer.
- Markvart, T. (2003). *Ηλεκτρισμός από Ηλιακή Ενέργεια*. ΙΩΝ.
- Mittelman, G., Kribus, A., & Dayan, A. (2007). *Solar cooling concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems*.
- Mittelman, G., Kribus, A., Mouchtar, O., & Dayan, A. (2009). *Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems*.
- Nishioka, K., Takamoto, T., Agui, T., Kaneiwa, M., Uraoka, Y., & Fuyuki, T. (2005). *Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell's characteristics and field-test meteorological data*.
- Padovani, S., Del Negro, A., Antonipieri, M., Sinesi, S., Campesato, R., Casale, M., και συν. (2010).
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. (2008). *Operating temperature of photovoltaic modulew: A survey of pertinent correlations*.
- Stine, W. B., & Geyer, M. (n.d.). *Power from the sun*. Ανάκτηση από <http://www.powerfromthesun.net/book.html>
- Αντωνόπουλος, Κ. (2004). *Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα*. Ε.Μ.Π.
- Ζευγώλης, Δ. (n.d.). *Εφαρμοσμένη Οπτική*. Τζιόλα.
- Φραγκιαδάκης, Ι. Ε. (2009). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. ΖΗΤΗ.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```
program upologismoi
implicit doubleprecision(a-h,o-z)

write(*,*) 'an ksereis focal length, grapse 1'
write(*,*) 'an ksereis yrim, grapse 2'
read(*,*) kleidi
write(*,*) 'ola ta input se m'
write(*,*) 'give diametro'
read(*,*) xd
write(*,*) 'give dimension of pv panel' !pv tetragwnikis morfis
read(*,*) xa
if(kleidi.eq.1)then
call focal_length(xd,xa)
else
call yrimis(xd,xa)
endif
end

subroutine focal_length(d,a)
implicit doubleprecision (a-h,o-z)

open(1,file='dedomena_fl.dat')

c real*8 nth
c real*8 m

pi=4.d0*atan(1.d0)
```

```

write(*,*) 'give focal lenght'

read(*,*) f

h=(d**2.d0)/(16.d0*f) !to upsos tis paravolis

b=(d/(8.d0*h))-(2.d0*h/d) !paronomastis tupou (8.9)

yrim=atan(1.d0/b)      !se rad

yrim_deg=yrim*180.d0/pi  !se moires

x=(a/2.d0)/tan(yrim) !h apostasi tou panel apo to FP(focal point)

epv=a*a      !to emvado tou pv panel

econc=(pi*d**2.d0)/4.d0 !to emvado tis epifaneias tou concentrator pou dexetai thn
aktinobolia(concentretor aperture area)

eanakl=((8.d0*pi*f**2.d0)/3.d0)*(((d/(4.d0*f))**2.d0+1.d0)**(3.d0 !to emvado tis
anaklastikis epifaneias typos(8.23)

&/2.d0)-1)

ap=pi*(xa/2.d0)**2.d0

cr=econc/ap

write(1,*) 'gia diametro tou sugkentrwti = ', d

write(1,*) 'gia dimension of pv = ', a

write(1,*) 'gia focal length f = ', f

write(1,*) 'ta gewmetrika xarakteristika einai:'

write(1,*)

write(1,*) 'to upsos tis paravolis einai h = ', h

write(1,*) 'to yrim = ', yrim_deg

write(1,*) 'h apostasi tou panel apo to FP einai x = ', x

write(1,*) 'to emvado tou pv einai epv=', epv

write(1,*) 'to embado tis epifaneias tou concentrator einai

&econc=', econc

write(1,*) 'to emvado tis anaklastikis epifaneias einai eanakl=',

&eanakl

```



```

write(1,*) 'o logos sygkentrwsis einai CR=', cr
write(1,*) '-----' !ü "® " !-x « "©«

write(*,*) 'give Pon se kW/m**2' !- !- « | Cp εε © (4,18)kJ/Kg*K
read(*,*) pon

write(*,*) 'give pososto ekmataleusis isxios apo to psiktiko ygro'
read(*,*) fnth

write(*,*) 'dwse thermokrasia eisodou tou psiktikou'
read(*,*) tin

write(*,*) 'dwse thermokrasia eksodou tou psiktikou'
read(*,*) tout

write(*,*) 'give Reynolds'
read(*,*) re

!-----

qth=pon*econc*fnth
fm=qth/(4.18d0*(tout-tin))

!Re=u*d/μ " m=u*A" ζ$ !- €=§/4*D**2
!« ! " εεε« "ζ ¥υεε εεε ε=10**-6 m**2/s " §- "εζ«« " =998kg/m**3
dsol=4.d0*fm/(pi*re*10.d0**(-6.d0)*998.d0)
u=10**(-6.d0)*re/dsol

write(1,*) ' gia Pon = ', pon, '(kW/m**2)'
write(1,*) 'gia pososto ekmataleusis apo psiktiko ugro = ', fnth

```

```

write(1,*) 'gia thermokrasia eisodou tou psiktikou = ', tin
write(1,*) 'gia thermokrasia eksodou tou psiktikou = ', tout
write(1,*) 'gia Reynolds = ', re
write(1,*)
write(1,*) 'to qth=', qth
write(1,*) 'h paroxh mazas einai m=', fm
write(1,*) 'h eswterikh diametros tou swlhna einai dsol=', dsol
write(1,*) 'h taxithta tou reustou sto swlhna einai u=', u
qpros=qth/(pi*(a/2.d0)**2.d0)
write(1,*)'h anigmeni se kyklo prospitousa isxis einai se kW/m*2'
&, qpros

close(1)

return
end

subroutine yrim(d,a)
implicit doubleprecision (a-h,o-z)

open(2,file='dedomena_yr.dat')
c  real*8 nth
c  real*8 m
pi=4.d0*atan(1.d0)

write(*,*) 'give yrim'
read(*,*) yrim
yrim_rad=yrim*pi/180.d0

f=d*(1+cos(yrim_rad))/(4.d0*sin(yrim_rad)) !typos (8.14)

```

```

h=(d**2.d0)/(16.d0*f) !to upsos tis paravolis
x=(a/2.d0)/tan(yrim_rad) !h apostasi tou panel apo to FP
epv=a*a      !to envado tou pv panel
econc=(pi*d**2.d0)/4.d0 !to envado tis epifaneias tou concentrator
eanakl=((8.d0*pi*f**2.d0)/3.d0)*(((d/(4.d0*f))**2.d0+1.d0)**(3.d0
&/2.d0)-1)          !to envado tis anaklastikis epifaneias typos (8.23)
ap=pi*(xa/2.d0)**2.d0
cr=econc/ap

write(2,*) 'gia diametro tou sugkentrwti = ', d
write(2,*) 'gia dimension of pv = ', a
write(2,*) 'gia yrim = ', yrim
write(2,*) 'ta gewmetrika xarakteristika einai:'
write(2,*)
write(2,*) 'to upsos tis paravolis einai h = ', h
write(2,*) 'to focal length einai f= ',f
write(2,*) 'h apostasi tou panel apo to FP einai x = ', x
write(2,*) 'to envado tou pv einai epv=', epv
write(2,*) 'to embado tis epifaneias tou concentrator einai
&econc=', econc
write(2,*) 'to envado tis anaklastikis epifaneias einai eanakl=',
&eanakl
write(2,*) 'o logos sygkentrwsis einai CR=', cr
write(2,*) '-----'
write(*,*) 'give Pon se kW/m**2' ![-] - « | Cp [ε][α] 4,18kJ/Kg*K
read(*,*) pon

write(*,*) 'give pososto ekmataleusis isxios apo to psiktiko ygro'
read(*,*) xnth

```

```

write(*,*) 'dwse thermokrasia eisodou tou psiktikou'
read(*,*) tin

write(*,*) 'dwse thermokrasia eksodou tou psiktikou'
read(*,*) tout

write(*,*) 'give taxythta u'
read(*,*) u

qth=pon*econc*xnth
ym=qth/(4.18d0*(tout-tin))
dsol=sqrt(ym*4.d0/(pi*u*998.d0))
re=u*dsol/(10**(-6.d0))

write(2,*) ' gia Pon = ', pon, '(kW/m**2)'
write(2,*) ' gia pososto ekmetaleusis apo psiktiko ugro = ', xnth
write(2,*) ' gia thermokrasia eisodou tou psiktikou = ', tin
write(2,*) ' gia thermokrasia eksodou tou psiktikou = ', tout
write(2,*) ' gia taxutita u = ', u
write(2,*)
write(2,*) 'to qth=', qth
write(2,*) 'h paroxh mazas einai m=', ym
write(2,*) 'h eswterikh diametros tou swlhna einai dsol=', dsol
write(2,*) 'to Reynolds einai Re=', re

close(2)

return

end

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

```
program gewmwtria
implicit doubleprecision (a-h,o-z)

open(2,file='syntetagmenes.txt')

pi=4.d0*atan(1.d0)
write(*,*) 'ola ta input se m'
write(*,*) 'give focal length'
read(*,*) f

write(*,*) 'give apostasi tou panel apo to focal point'
read(*,*) x
  write(2,*)

do 100 a=0.06,0.1,0.001

w=a/x

yrim=atan(a/x)
yrim_deg=yrim*180.d0/pi

e=1.d0
b=8.d0*f/w
c=-16.d0*f**2.d0

Dia=b**2.d0-4.d0*e*c
x1=(-b+sqrt(Dia))/2.d0*e
x2=(-b-sqrt(Dia))/2.d0*e
if(x1.ge.0.d0)then
d=x1
```

```

else
d=x2
endif

h=(d**2.d0)/(16.d0*f)
dmm=d*1000.d0

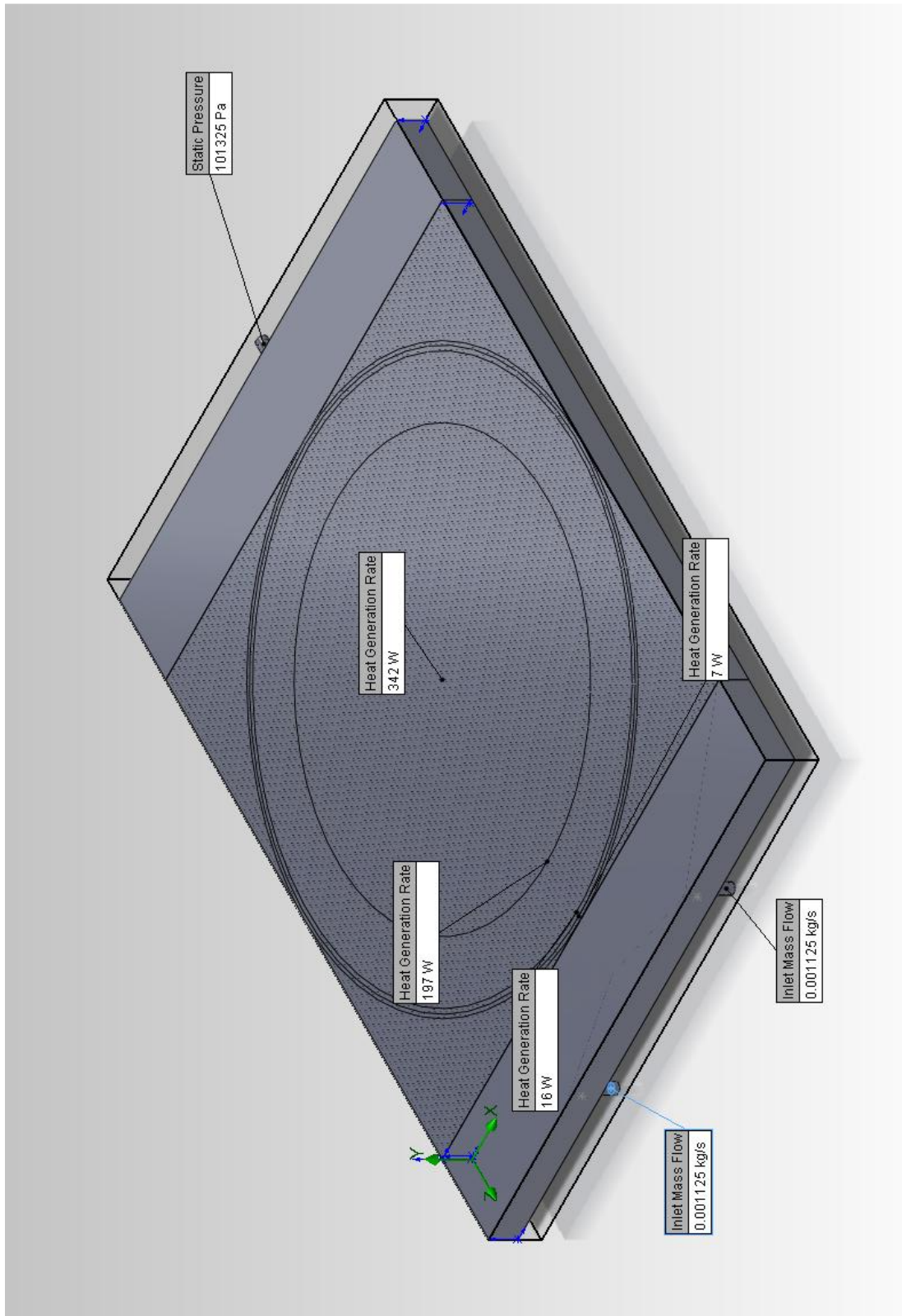
p=acos(0.06/a) !gwnia pou vgainei panw apo ton enallakti
p_deg=p*180.d0/pi
ux=dmm/2.d0*(0.06/a)
uy=dmm/2.d0*sin(p)

write(2,20)ux,uy
20  Format (F6.1 ,3x, F10.1,3x, F6.2,3x, F10.6, 3x, F10.3)
100 continue

pause
end

```

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ







## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

### Refining mesh κατά τη διάρκεια του υπολογισμού

Η διαδικασία αυτή σου επιτρέπει να αλλάξεις τις παραμέτρους της πυκνότητας τους πλέγματος κατά τη διάρκεια του υπολογισμού του Flow Simulation στο SolidWorks. Τα κελιά χωρίζονται σε περιοχές που η ροή είναι πιο περίπλοκη και απαιτεί περισσότερους υπολογισμούς, ενώ συνενώνονται στα μέρη με χαμηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις. Αυτό δεν μπορεί να γίνει πριν την έναρξη επίλυσης του προβλήματος, γιατί δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις περιοχές με αυτά τα χαρακτηριστικά. Το κριτήριο για αύξηση των κελιών σε περιοχές με πιο δύσκολη ροή είναι το ακόλουθο:

**Refinement criterion:** συμβολίζεται με  $\epsilon_{spl}$ . Αν η σχέση  $\alpha \cdot K_{spl} \geq \epsilon_{spl}$  ικανοποιείται μετά από τη στιγμή που ορίζει το κριτήριο, τότε το κελί χωρίζεται στα οχτώ. Το  $\alpha$  είναι ο συντελεστής του διπλανού κελιού, ο οποίος είναι 1 για τις περιοχές του στερεού ή αν όλα τα γειτονικά κελιά βρίσκονται μόνο σε περιοχή ρευστού ή στερεού, ενώ το  $K_{spl}$  είναι το χαρακτηριστικό επίλυσης του κελιού.

Στην περιοχή του ρευστού το  $K_{spl}$  ορίζεται ως εξής:

- Για ρευστό

$$K_{spl} = \sum_{i=1}^{Nnb} \max \left( \frac{|\vec{V}_o - \vec{V}_i|}{\max(|\vec{V}_o|, |\vec{V}_i|)}, 4 \cdot \frac{|T_o - T_i|}{\Delta T_{global}} \right)$$

- Για αέριο, σταθερή ροή

$$K_{spl} = \sum_{i=1}^{Nnb} \max \left( \frac{|\vec{V}_o - \vec{V}_i|}{\max(|\vec{V}_o|, |\vec{V}_i|)}, 0.5 \cdot \left( \frac{|P_o - P_i|}{\max(P_o, P_i)} + \frac{|\rho_o - \rho_i|}{\max(\rho_o, \rho_i)} \right) \right)$$

- Για αέριο, χρονικά μεταβαλλόμενη ροή

$$K_{spl} = \sum_{i=1}^{Nnb} \max \left( \frac{|\rho \vec{V}_o - \rho \vec{V}_i|}{\max(|\rho_{o \text{ sound}} \vec{V}_{o \text{ sound}}|, |\rho_{i \text{ sound}} \vec{V}_{i \text{ sound}}|)}, 0.5 \cdot \left( \frac{|P_o - P_i|}{\max(P_o, P_i)} + \frac{|\rho_o - \rho_i|}{\max(\rho_o, \rho_i)} \right) \right)$$

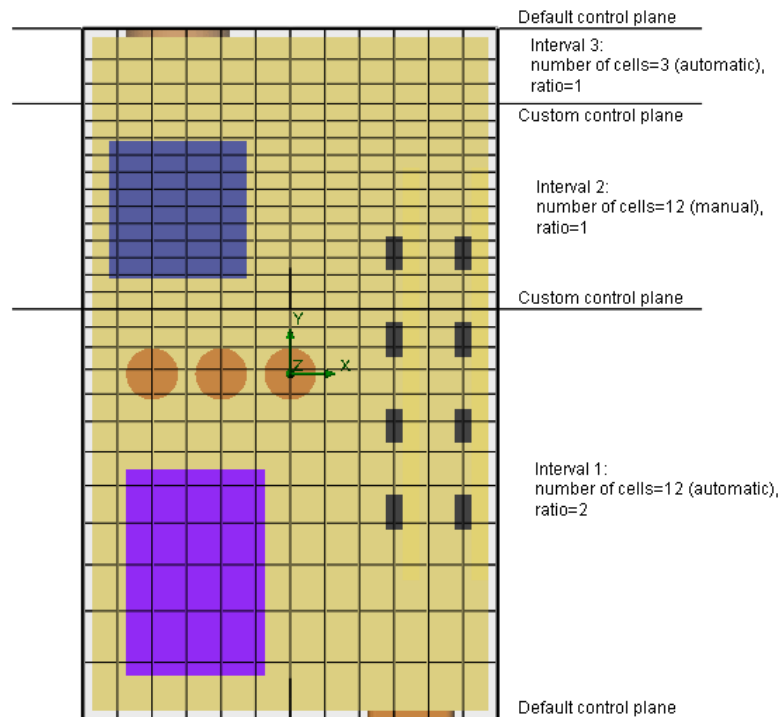
- Στην περιοχή του στερεού

$$K_{spl} = \frac{20}{\Delta T_{global}} \left| \sum_{j=1}^3 \left( \frac{T_j(+)-T_o}{x_j(+)-x_{jo}} - \frac{T_o-T_j(-)}{x_{jo}-x_j(-)} \right) \cdot \left( \frac{x_j(+)-x_j(-)}{2} \right) \right|$$

Όπου  $v$  είναι η ταχύτητα του ρευστού,  $P$  είναι η πίεση,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $T$  η θερμοκρασία,  $x$  η συντεταγμένη,  $Nnb$  ο αριθμός των γειτονικών κελιών (από 6 έως 24), ο δείκτης 0 δείχνει το κελί που εξετάζεται, ενώ ο δείκτης  $i$  δείχνει το ισοστό κελί που έχει μια πλευρά κοινή με το κελί που εξετάζεται, ο δείκτης  $sound$  δείχνει ηχητικές παραμέτρους, το  $\Delta T_{global}$  είναι η θερμοκρασιακή διαφορά σε όλο το πλέγμα,  $j$  είναι ο  $j$ -th άξονας του συστήματος συντεταγμένων, ενώ το (+) και (-) συμβολίζουν τις δυο αντίθετες κατευθύνσεις του άξονα. Όλες οι τιμές έχουν υπολογισθεί στο κέντρο των κελιών.

**Unrefinement criterion:** συμβολίζεται με  $\epsilon_{mer}$ . Είναι το κριτήριο που ακολουθείται κατά τη συνένωση κελιών. Αν η σχέση  $\kappa_{mer} < \epsilon_{mer}$ , (όπου  $\kappa_{mer}$  είναι το χαρακτηριστικό επίλυσης των οχτώ κελιών που γεννιούνται) ικανοποιείται μετά από κάθε επανάληψη μετά από το τελευταίο mesh refinement, τότε τα οχτώ κελιά ενώνονται και πάλι στο αρχικό.

Πριν την έναρξη επίλυσης της ροής, υπάρχει και η δυνατότητα από το χρήστη να αλλάξει ορισμένες από τις ρυθμίσεις του αρχικού πλέγματος, σε περιοχές όπου θεωρεί ότι η ροή θα είναι πιο απαιτητική και θα χρειάζεται πιο πυκνό πλέγμα. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας κι άλλα επίπεδα στο πλέγμα. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα.



Επίσης σημαντικό κατά τον ορισμό του πλέγματος, είναι η πυκνότητά του κοντά στα όρια μεταξύ ρευστού και στερεού (οριακές συνθήκες). Αυτό ορίζεται από το refinement level. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνεται η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα σε δυο επίπεδα. Στην αριστερή είναι εμφανές ότι η πυκνότητα του πλέγματος δεν είναι επαρκής για να καταλάβει την επίδραση στη ροή του οριζώντιου πολύ λεπτού κυλίνδρου. Αντίθετα στη δεξιά εικόνα όπου το επίπεδο της πυκνότητας έχει ορισθεί 4, βλέπουμε ότι το flow simulation μπορεί να επιλύσει τη ροή γύρω από τον κύλινδρο αυτό. Βέβαια κάτι τέτοιο αυξάνει το υπολογιστικό κόστος και γι' αυτό η αύξηση της πυκνότητας γίνεται μόνο στις περιοχές που είναι απαραίτητο και όχι παντού.

