



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Μελέτη Υβριδοποίησης του ΘΗΣ Θίσβης
με τεχνολογία ηλιακού πύργου»*

Του Φοιτητή

Παπαδόπουλου Αθανάσιου

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Στη μνήμη της γιαγιάς μου...

(Υπογραφή)

.....

Παπαδόπουλος Αθανάσιος

Copyright © ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ.Σωτήριο Καρέλλα επειδή μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και μου έδωσε το έναυσμα να ασχοληθώ με την πολλά υποσχόμενη και ενδιαφέρουσα τεχνολογία της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω τόσο για την ενθάρρυνση που μου παρείχε στην πρόθεσή μου να ασχοληθώ κυρίως με τον αλγόριθμο διάταξης πεδίου ηλιοστατών για την τεχνολογία του συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη, όσο και για την ευκαιρία εκπόνησης δημοσίευσης στο 28ο Διεθνές συνέδριο Ecos.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο και συνεργάτη Αναστάσιο Λάππα, ο οποίος ασχολήθηκε εις βάθος με την οικονομο-τεχνική μελέτη του ΘΗΣ της Θίσβης και είχαμε άριστη συνεργασία. Χάρη στη βοήθεια του κατέστη δυνατή η δημοσίευση στο συνέδριο, όπως και ένα κομμάτι από το έκτο κεφάλαιο της διπλωματικής μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και την κοπέλα μου, όπως επίσης και τους φίλους μου, για την συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξαν κατά τη διεξαγωγή αυτής της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αρχικά η παρουσίαση και μελέτη των διαθέσιμων συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη ή αλλιώς πύργου ηλιακής ισχύος. Στο δεύτερο κομμάτι της διπλωματικής παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος σχεδιασμού ηλιοστατικών πεδίων, ο οποίος μας δίνει τη δυνατότητα να πειραματιστούμε με τις διαστάσεις των ηλιοστατών, το ύψος του πύργου και το μέγεθος του πεδίου ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περίπτωσης. Το λογισμικό κατόπιν χρησιμοποιείται για τη δημιουργία διαφορετικών πεδίων ηλιοστατών που εντάχτηκαν στην μελέτη για την υβριδοποίηση του ΘΗΣ στην περιοχή της Θίβης.

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στο ενεργειακό ζήτημα στη σημερινή εποχή. Αρχικά παρουσιάζεται η υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση σε παγκόσμιο επίπεδο, η σταδιακή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο και οι επενδυτικές τάσεις στην αγορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κατόπιν εστιάζουμε στον ελλαδικό χώρο, αναδεικνύοντας το υψηλό ηλιακό δυναμικό της χώρας μας, παρουσιάζεται η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα καθώς και οι ενεργειακές υποχρεώσεις της ως μέλος της ΕΕ.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην ηλιακή ενέργεια. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές ηλιακής αστρονομίας και η μεθοδολογία υπολογισμού του ηλιακού δυναμικού για μια τοποθεσία. Η εν λόγω μεθοδολογία εφαρμόζεται για την εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού στην περιοχή της Θίβης που βρίσκεται ο ΘΗΣ που μελετάται προς υβριδοποίηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από συγκεντρωμένη ακτινοβολία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι και οι αρχές λειτουργίας ενός υβριδικού συστήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια εμβάθυνση στο σύστημα του ηλιακού πύργου. Παρουσιάζονται όλοι οι βαθμοί απωλειών που πρέπει να λάβουμε υπόψη καθώς και μέθοδοι βελτιστοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται και το κεντρικό θέμα της εργασίας, που είναι ο αλγόριθμος σχεδιασμού ηλιοστατικών πεδίων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η διαστασιολόγηση του ηλιακού πεδίου για το σταθμό της Θίβης και η ενσωμάτωση του στην υπάρχουσα διαμόρφωση του σταθμού. Ακόμα γίνεται συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της οικονομικής μελέτης, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο 28ο Διεθνές συνέδριο Ecos, ενώ η αναλυτική μελέτη του συστήματος αποτέλεσε το κυρίως κομμάτι της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας του συνάδελφου μηχανολόγου Τάσσου Λάππα.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της διπλωματικής και καταγραφή των συμπερασμάτων που πρόέκυψαν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Το ενεργειακό ζήτημα σήμερα.....	8
1.2 Ενεργειακή κατάσταση και υποχρεώσεις της Ελλάδας	12
1.3 Ηλιακό Δυναμικό	15
1.4 Βιβλιογραφία-Αναφορές κεφαλαίου	18
2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	19
2.1 Η Γη	20
2.1.1 Η Γη και η τροχιά της γύρω από τον ήλιο	21
2.1.2 Υπολογισμός της θέσης του ηλίου	23
2.2 Ο Ήλιος	25
2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα	28
2.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα της γης	28
2.2.3 Ηλιακή ακτινοβολία στα όρια ατμόσφαιρας της γης	29
2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και επιφάνεια της γης	30
2.2.4.1 Ατμοσφαιρικές Επιδράσεις.....	31
2.2.4.2 Μάζα αέρα και ηλιακό φάσμα.....	33
2.3 Μεθοδολογία υπολογισμού ηλιακής ενέργειας	34
2.3.1 Υπολογισμός ηλιακών γωνιών	34
2.3.2 Υπολογισμός συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας	37
2.3.2.1 Μέθοδος για επιφάνειες με κλίση προς τον Ισημερινό	38
2.3.2.2 Ωριαία μέθοδος για κεκλιμένες επιφάνειες προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.....	41
2.4 Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας για Θίσβη	43
2.5 Βιβλιογραφία-Αναφορές κεφαλαίου	50
3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	51
3.1 Εισαγωγή στα συγκεντροτικά ηλιακά συστήματα	52
3.2 Σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη	60
3.3.2.1 Επιμέρους Υποσυστήματα	61
3.3.2.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	79
3.3.2.3 Πύργοι ηλιακής ισχύος ανά την υφήλιο	82
3.3.2.4 Πεδίο ηλιοστατών με κεντρικό ανακλαστήρα (Beam Down Optics)	85
3.3 Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	87
3.4 Βιβλιογραφία-Αναφορές Κεφαλαίου	91

4. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ & ΥΒΡΙΔΙΣΜΟΣ	93
4.1 Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας.....	94
4.2 Σταθμοί Συνδυασμένου Κύκλου (CSP).....	100
4.2.1 Πλεονεκτήματα μονάδων συνδυασμένου κύκλου	105
4.3 Υβριδοποίηση ατμοηλεκτρικών σταθμών	107
4.3.1 Τεχνολογία Ολοκληρωμένου Ηλιακού Συνδυασμένου Κύκλου (ISCC)	109
4.4 Βιβλιογραφία-Αναφορές Κεφαλαίου	113
5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ	114
5.1 Εισαγωγή	115
5.2 Απώλειες και αξιολόγηση της απόδοσης	115
5.2.1 Απώλειες του πεδίου ηλιοστατών.....	116
5.2.2 Απώλειες κεντρικού δέκτη	126
5.3 Προτάσεις για περιορισμό των απωλειών	132
5.3.1 Σύστημα καθαρισμού κατόπτρων	132
5.3.2 Επίδραση ανεμικών φορτίων και τρόποι αντιμετώπισης	138
5.4 Σχεδιασμός ηλιοστατικού πεδίου	146
5.4.1 Διάταξη πεδίου ηλιοστατών	146
5.4.2 Επιλογή τύπου δέκτη και σχεδιασμός	148
5.4.3 Επιλογή διαστάσεων ηλιοστάτη	154
5.5 Παρουσίαση προγραμμάτων	159
5.5.1 Καταγραφή μεθοδολογιών για το σχεδιασμό πεδίου ηλιοστατών	159
5.5.2 Περιγραφή της εφαρμογής CSPsim	160
5.5.3 Περιγραφή προγράμματος που δημιουργήσαμε.....	163
5.5.4 Πρόγραμμα προσομοίωσης λειτουργίας του πεδίου ηλιοστατών	170
5.6 Βιβλιογραφία-Αναφορές κεφαλαίου	177
6. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΘΙΣΒΗΣ	179
6.1 Παρουσίαση σταθμού –Χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου	180
6.2 Μελέτη ηλιακών πεδίων Θίσβης	181
6.2.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	185
6.3 Περιγραφή μοντελοποίησης σταθμού	191
6.3.1 Παρούσα κατάσταση σταθμού	194
6.3.2 Σενάριο υποκατάστασης εναλλακτών	195
6.3.2.1 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας	196

6.3.2.2 Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής μελέτης	196
6.4 Βιβλιογραφία-Αναφορές κεφαλαίου	207
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	208
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	211

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα

Το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας τη σημερινή εποχή προέρχεται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, τα οποία εκπέμπουν τόνους διοξειδίου του άνθρακα και άλλες μορφές ρύπανσης κάθε δευτερόλεπτο. Ακόμη, τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων μειώνονται συνεχώς. Προκειμένου η ανάπτυξη του πολιτισμού μας να γίνει βιώσιμη και να προκαλεί λιγότερη ζημιά στο περιβάλλον, οι άνθρωποι ψάχνουν για νέες πηγές καθαρής ενέργειας.

Λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για καθαρή ενέργεια, η βιομηχανία ηλιακής ενέργειας είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες αγορές παγκοσμίως. Σήμερα υπάρχουν αρκετές σημαντικές κατευθύνσεις για την ανάπτυξη της ηλιακής τεχνολογίας. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα πρώτα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός θερμικού κινητήρα.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνέχισαν να αυξάνονται το 2014 στα πλαίσια της αύξησης της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, παρότι είχαμε μια δραματική πτώση των τιμών του πετρελαίου κατά το δεύτερο εξάμηνο του έτους. Παρά την αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, για πρώτη φορά μετά από τέσσερις δεκαετίες, οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας παρέμειναν σταθερές το 2014, ενώ η παγκόσμια οικονομία αναπτύχθηκε. Αυτή η σταθεροποίηση έχει αποδοθεί στην αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Θα ακολουθήσει σχολιασμός για μια σειρά διαγραμμάτων και πινάκων από την ετήσια έκθεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (REN) για το έτος 2014.

Countries with Renewable Energy Policies and Targets, 2005



Σχήμα 1.1α. Χώρες με θεσπισμένους ενεργειακούς στόχους για το έτος 2005 (Πηγή: “Renewables 2015, Global Status Report” [1])

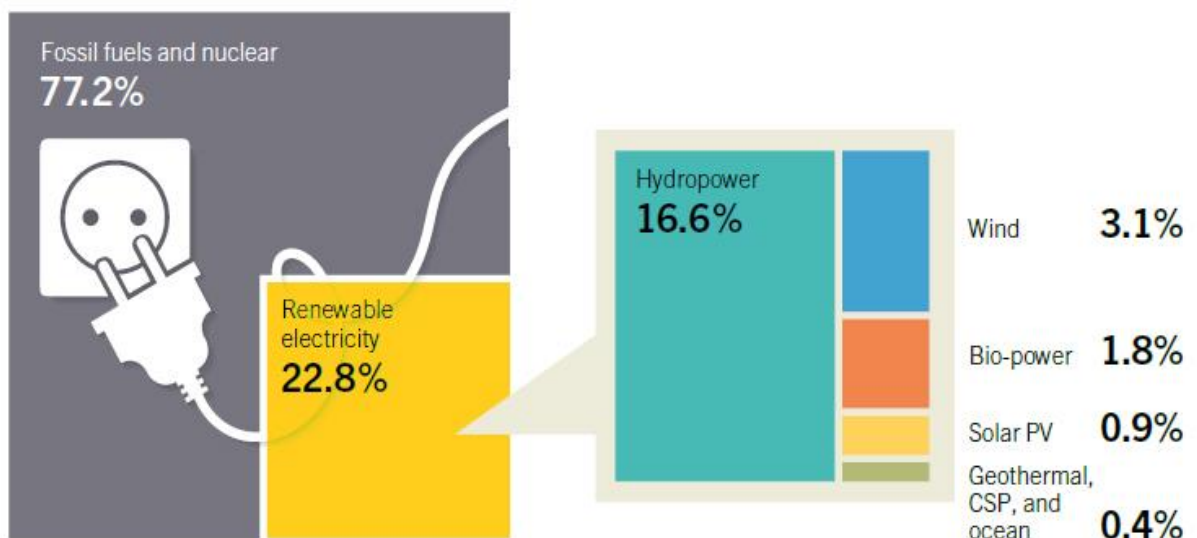
Countries with Renewable Energy Policies and Targets, Early 2015



Σχήμα 1.1β. Χώρες με θεσπισμένους ενεργειακούς στόχους για το έτος 2015 (Πηγή: “Renewables 2015, Global Status Report” [1])








Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι πλέον σχεδόν όλες οι χώρες έχουν αντιληφθεί την σημασία που έχει η υιοθέτηση ενεργειακής πολιτικής και η θέσπιση στόχων για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτός είναι και ο μόνος τρόπος να αντιμετωπιστούν τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα του πλανήτη μας, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας της γης, η τρύπα του όζοντος, η άνοδος της στάθμης των ωκεανών και πολλά άλλα.

Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production, End-2014



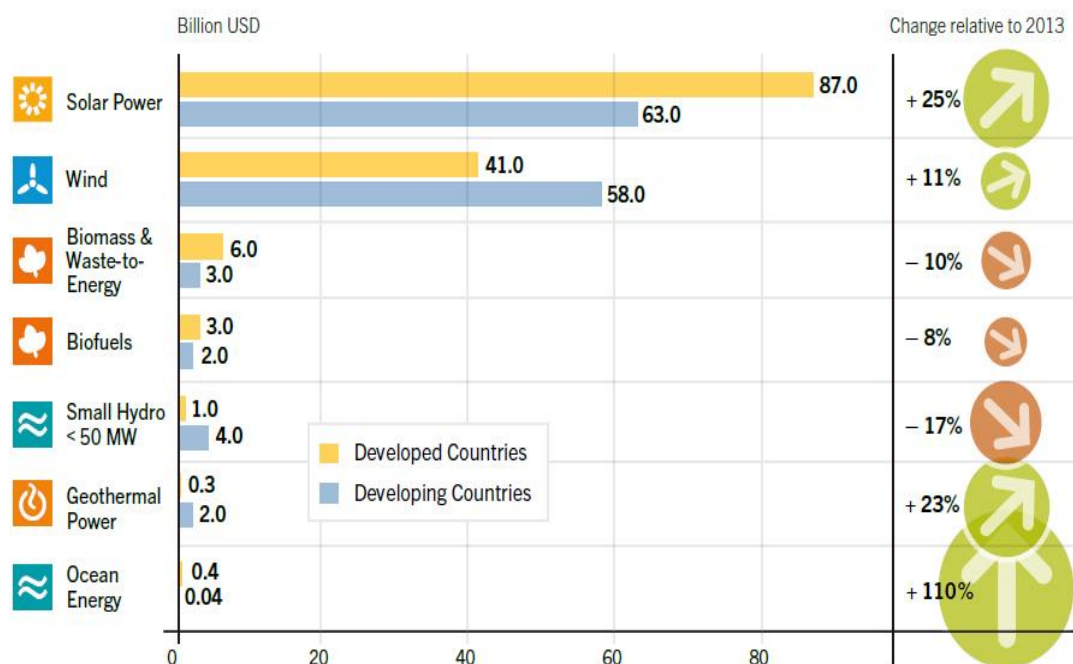
Σχήμα 1.2. Κατανομή μεριδίων στην παραγωγή ενέργειας (Πηγή: “Renewables 2015, Global Status Report” [1])

Το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες και πλέον αγγίζει το 29%. Από το σχήμα 1.2 αξίζει να παρατηρήσουμε τα πολύ χαμηλά ποσοστά των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (PV), αλλά και των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.

		START 2004	2013	2014
INVESTMENT				
New investment (annual) in renewable power and fuels ²	billion USD	45	232	270
POWER				
Renewable power capacity (total, not including hydro)	GW	85	560	657
Renewable power capacity (total, including hydro)	GW	800	1,578	1,712
 Hydropower capacity (total) ³	GW	715	1,018	1,055
 Bio-power capacity	GW	<36	88	93
 Bio-power generation	TWh	227	396	433
 Geothermal power capacity	GW	8.9	12.1	12.8
 Solar PV capacity (total)	GW	2.6	138	177
 Concentrating solar thermal power (total)	GW	0.4	3.4	4.4
 Wind power capacity (total)	GW	48	319	370

Σχήμα 1.3. Εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία (Πηγή: “Renewables 2015, Global Status Report” [1])

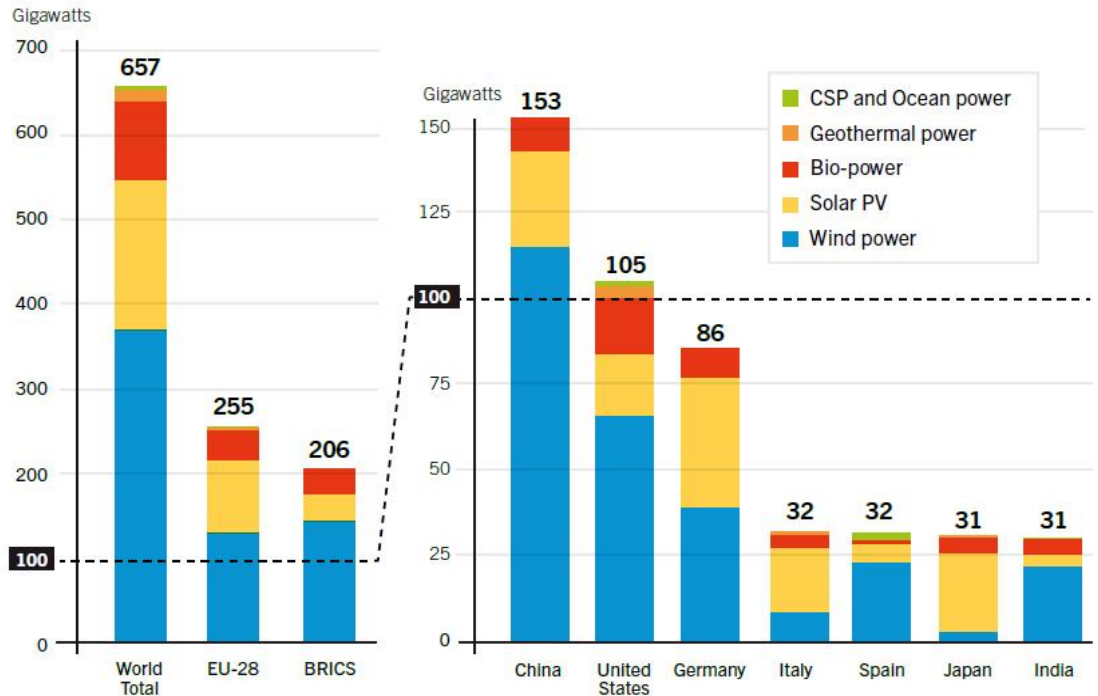
Global New Investment in Renewable Energy by Technology, Developed and Developing Countries, 2014



Σχήμα 1.4. Επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως (Πηγή: “Renewables 2015, Global Status Report” [1])

Όπως φαίνεται και στα σχήματα 1.3 και 1.4, η αγορά των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων παραμένει λιγότερο καθιερωμένη σε σχέση με τις περισσότερες αγορές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρ'όλα αυτά, σαν τομέας εδώ και σχεδόν μια δεκαετία παρουσιάζει ισχυρή ανάπτυξη, με αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 28% στα 4,4 GW μόνο για το έτος 2014. Το σχήμα 1.4 φανερώνει τις τάσεις στην σημερινή ενεργειακή αγορά και ξεχωρίζει το έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον που συγκεντρώνουν τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.

Renewable Power Capacities in World, EU-28, BRICS, and Top Seven Countries, 2014



Σχήμα 1.5. Εγκατεστημένη ισχύ από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως (Πηγή: “Renewables 2015, Global Status Report” [1])

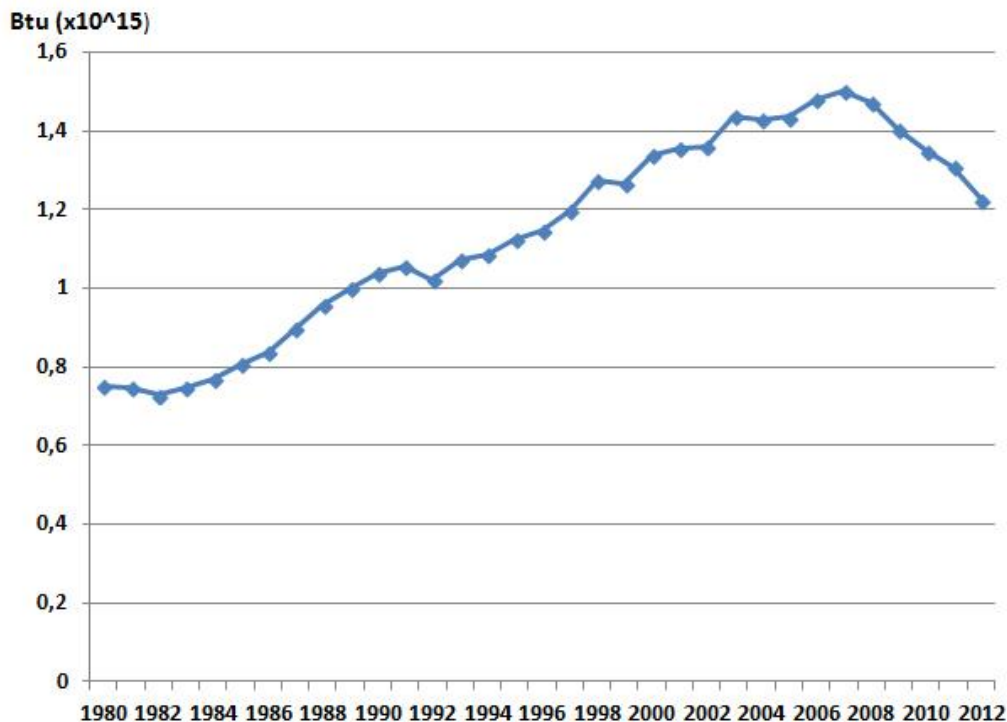
Κλείνουμε με το σχήμα 1.5, που παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς από τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παγκοσμίως. Η Ευρώπη διατηρεί τα πρωτεία στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τη Γερμανία να βρίσκεται στην πρώτη θέση από τα κράτη της Γηραιάς Ηπείρου. Η Ισπανία και η Ιταλία ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα ευρωπαϊκά κράτη. Αυτό είναι ελπιδοφόρο σημάδι και για την Ελλάδα, μιας και οι τρεις αυτές χώρες είναι μεσογειακές και έχουν καλό ηλιακό δυναμικό όπως θα δούμε παρακάτω. Οι χώρες BRICS (Βραζιλία- Ρωσία- Ιαπωνία- Κίνα- Νότια Αφρική) που αποτελούν τις μεγαλύτερες ανερχόμενες αγορές παγκοσμίως έχουν εγκατεστημένη ισχύ 206GW, με το μεγαλύτερο ποσοστό ανάμεσά τους να κατέχει η Κίνα με 153GW. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι ΗΠΑ με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 105GW έρχονται στη δεύτερη θέση μεταξύ των χωρών.

1.2 Η ενεργειακή κατάσταση και οι υποχρεώσεις της Ελλάδας

Τα τελευταία χρόνια, το ελληνικό ενεργειακό σύστημα χαρακτηρίζεται από:

- μια συνολική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας (με εξαίρεση την περίοδο κρίσης 2008-σήμερα) λόγω της οικονομικής ανάπτυξης και κατανάλωσης αλλαγές συμπεριφοράς,
- την υψηλή κατανάλωση συμβατικών καυσίμων που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό από λιγνίτη που επιλέχθηκε στρατηγικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μετά την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του '70,

- υψηλή εξάρτηση από τις εισαγωγές οι οποίες περιλαμβάνονται αργού πετρελαίου, προϊόντων πετρελαίου και φυσικού αερίου, που εισήχθη πρόσφατα και
- μια σταδιακή αύξηση της ανάπτυξης και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των ΑΠΕ, αντανακλώντας τις προσπάθειες Ελλάδα να υιοθετήσει πολιτικές της ΕΕ.



Σχήμα 1.6. Ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα [7]

Περίπου το 61% των ενεργειακών αναγκών στην Ελλάδα καλύπτεται από τις εισαγωγές με το υπόλοιπο 39% να καλύπτεται μέσω των εθνικών ενεργειακών πηγών, κυρίως λιγνίτη (77%) και ΑΠΕ (22%). Εισαγόμενες πηγές ενέργειας είναι κυρίως προϊόντα πετρελαίου που αντιπροσωπεύουν το 44% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και φυσικού αερίου, με μερίδιο της τάξης του 13%. Ο λιγνίτης σαν καύσιμο αποτελεί μια φθηνή εγχώρια λύση, αλλά δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό ενεργειακά και επίσης είναι ρυπογόνο.

Σήμερα περισσότερο από ποτέ, στην προσπάθεια να επιτευχθεί η έξοδος της χώρας από την σημερινή οικονομική κρίση, οι παρεμβάσεις και οι αλλαγές στο ενεργειακό μοντέλο φαντάζουν επιβεβλημένες. Η κρατική στρατηγική για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα επικεντρώνεται στα εξής σημεία :

- Ανάπτυξη των εγκαταστάσεων ΑΠΕ με την παροχή κινήτρων
- Θέσπιση εθνικών στόχων για την αύξηση της διείσδυσης της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Μείωση της εξάρτησης από συγκεκριμένες πηγές ενέργειας υψηλού κινδύνου
- Απελευθέρωση της αγοράς, την αύξηση της ανταγωνιστικότητας και τερματισμός των μονοπόλια στους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου.

- Δημιουργία ενός υγιούς επενδυτικού κλίματος για τις επιχειρήσεις στον τομέα της ενέργειας
- σημαντικές πρωτοβουλίες για τις υποδομές, όπως η διασύνδεση των ελληνικών νησιών

Σε ότι αφορά τις νομοθετικές ρυθμίσεις προκειμένου να ενισχυθεί η διείσδυση της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, δίνονται κίνητρα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και ηλιακών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Συγκεκριμένα:

Νόμος 3468/2006 : δίνεται έμφαση στην απλοποίηση των διαδικασιών αδειοδότησης των επενδύσεων σε ΑΠΕ και ορίζονται οι τιμές πώλησης της παραγόμενης από αυτές ενέργειας στο δίκτυο. Οι τιμές αυτές τροποποιούνται ανά έτος, ώστε να ανταποκρίνονται στον πληθωρισμό και στις αυξήσεις των τιμολογίων ηλεκτρικής ενέργειας.[9]

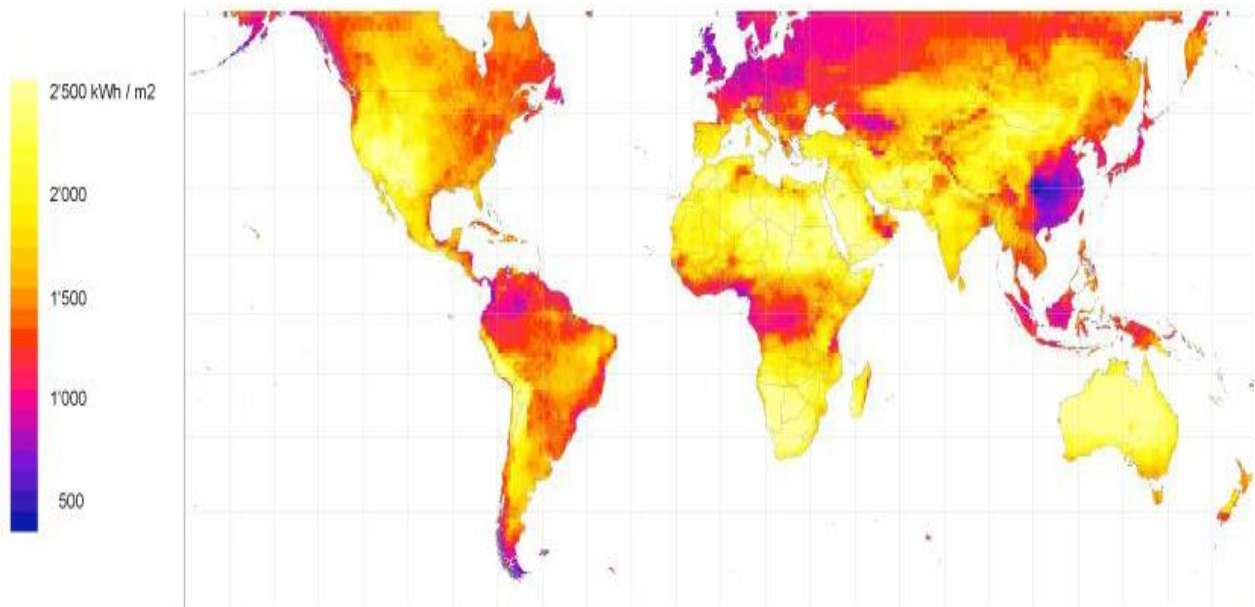
Νόμος 3522/2006 : οι επενδύσεις σε ΑΠΕ υποστηρίζονται οικονομικά, μέσω του Εθνικού Αναπτυξιακού, είτε μέσω φορολογικών εξαιρέσεων, είτε μέσω απευθείας επιχορηγήσεων, οι οποίες κυμαίνονται από το 34% έως το 55% του προϋπολογισμού του έργου, μέχρι τα 20 εκατομμύρια ευρώ. Βάσει του ίδιου νόμου, οι εμπορικές εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορούν να επιδοτηθούν με το 20-40% του κόστους εγκατάστασης, ανάλογα με την περιοχή στην οποία θα εγκατασταθούν. Επιπλέον, προβλέπεται έκπτωση φόρου κατά 20% της δαπάνης, για μικρές οικιακές εγκαταστάσεις αυτού του είδους (έως το ποσό των €700). Ανάλογες επιχορηγήσεις δίνονται και για την κάλυψη του κόστους εγκατάστασης ηλιακών συστημάτων θέρμανσης (κατά 40% για απόδοση συλλέκτη μεγαλύτερη από 45%, και κατά 50% για απόδοση ηλιακού συλλέκτη μεγαλύτερη από 60%).[9]

Παράλληλα η προώθηση των ΑΠΕ συνάδει και με την εκπλήρωση των δεσμεύσεων που έχει αναλάβει η χώρα μας, ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Με την οδηγία του Απριλίου 2009, για πρώτη φορά, η ΕΕ θεσπίζει δεσμευτικό στόχο για τις ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα δεσμεύεται με τον νόμο 3851/άρθρο 1 να πετύχει τον εθνικό στόχο των ΑΠΕ που θέσπισε για αυτήν η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με τον οποίο προβλέπεται συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020 και συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 40%. Επιπλέον, ζητείται συμβολή των ΑΠΕ της τάξεως του 10% στην τελική κατανάλωση ενέργειας για μεταφορές, και πάλι ως το 2020.

Ο ενεργειακός τομέας στην Ελλάδα έχει μεγαλύτερη συμμετοχή στο ΑΕΠ και στον κλάδο της απασχόλησης από τις περισσότερες χώρες της ΕΕ, και είναι έτοιμος να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια.

1.3 Ηλιακό Δυναμικό

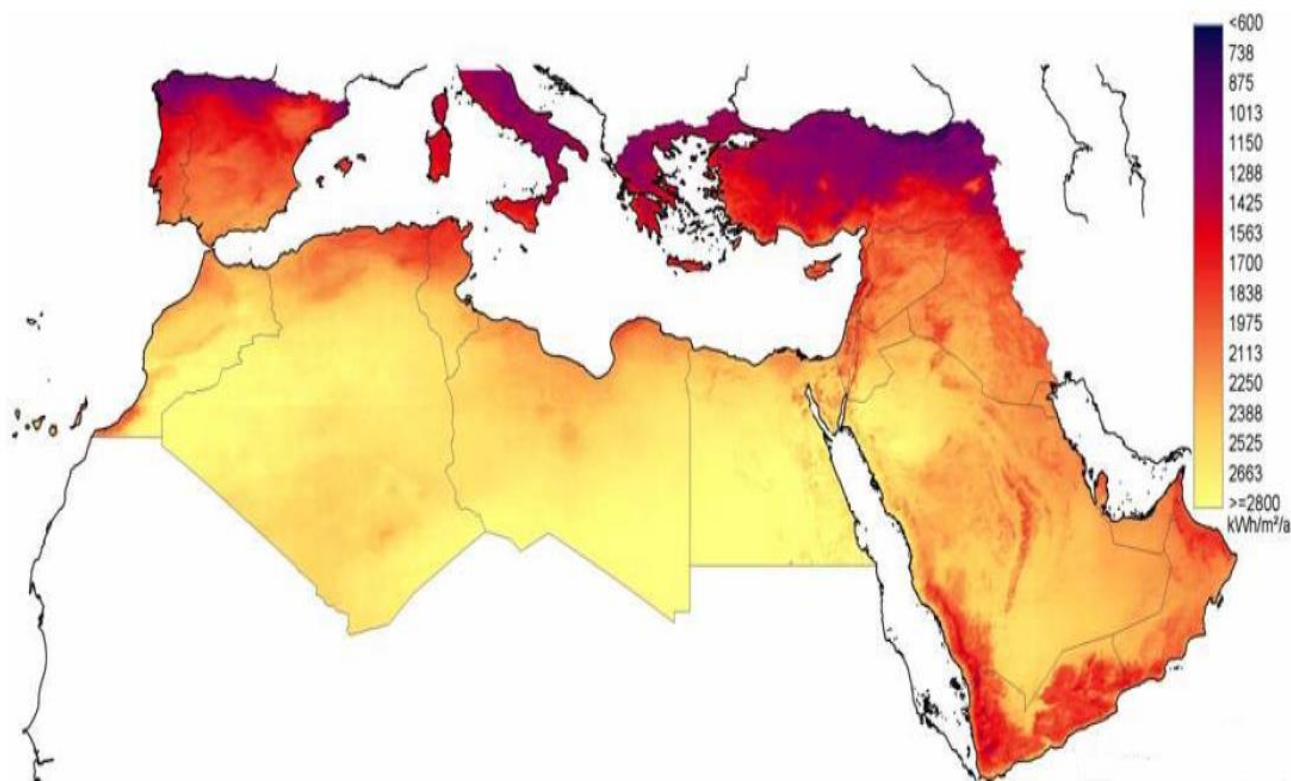
Η καταλληλότητα μιας περιοχής για την εγκατάσταση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος κρίνεται με βάση την ηλιοφάνεια της, και πιο συγκεκριμένα από το δυναμικό της σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Direct Normal Irradiation-DNI). Κατάλληλες περιοχές για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών είναι αυτές οι οποίες δέχονται τουλάχιστον 1650kWh άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο ετησίως, ενώ ιδανικότερες τοποθεσίες είναι αυτές που δέχονται περισσότερες από 2000kWh/m² ετησίως. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται τα επίπεδα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά την υφήλιο.



Σχήμα 1.7. Παγκόσμιος χάρτης DNI (Πηγή : <http://solargis.info> [8])

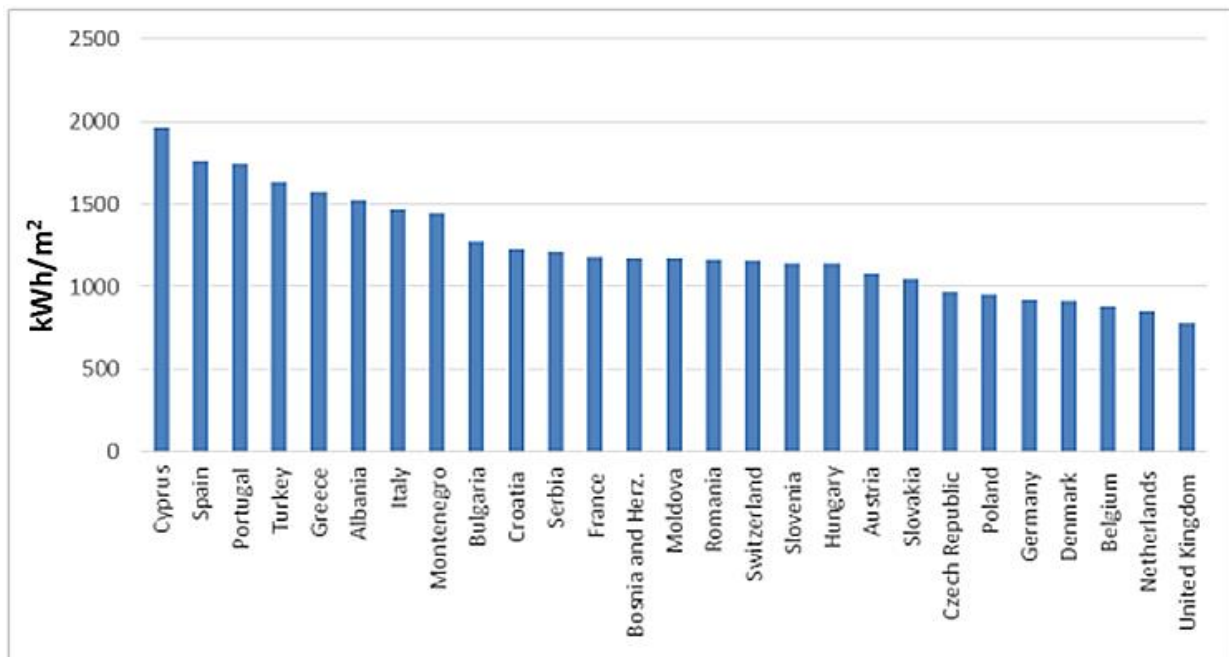
Η Ελλάδα έχει την τύχη να βρίσκεται σε πλεονεκτικό σημείο του παγκόσμιου χάρτη, όσο αφορά στην ηλιακή ενέργεια και πολλά μέρη της χαρακτηρίζονται από υψηλό ηλιακό δυναμικό (βλέπε σχήμα 1.8).

Είναι προφανές ότι η κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού θα αποτελεί μια αποδοτική και συμφέρουσα λύση για τις χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια και ειδικά με υψηλό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiation-DNI). Συνεπώς, κατάλληλες τοποθεσίες για εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας είναι οι μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, οι νοτιοδυτικές περιοχές των ΗΠΑ, η κεντρική και νότια Αμερική, η Βόρεια και Νότια Αφρική, η Εγγύς και η Μέση Ανατολή, το Ιράν, οι ερημικές πεδιάδες της Ινδίας, το Πακιστάν, η πρώην Σοβιετική Ένωση, η Κίνα και η Αυστραλία και αποτελούν τη λεγόμενη «ηλιακή ζώνη» (sun belt).



Σχήμα 1.8. Χάρτης DNI για τις μεσογειακές χώρες (Πηγή : <http://solargis.info> [8])

Εάν οι χώρες της ηλιακής ζώνης εκμεταλλευτούν την ηλιακή τους ενέργεια κατά αυτόν τον τρόπο, θα συνεισφέρουν τα μέγιστα στην προστασία του παγκόσμιου κλίματος. Ήδη, έχει αναπτυχθεί μια διεθνής πρωτοβουλία, το πρόγραμμα DESERTEC, γενική ιδέα του οποίου είναι η ικανοποίηση μεγάλου ποσοστού της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση της άφθονης ηλιακής ενέργειας στις ερήμους του πλανήτη. Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτροπαραγωγή μέσω ηλιοθερμικών σταθμών, σε ερημικές περιοχές του πλανήτη με πολύ υψηλό ηλιακό δυναμικό, ξεπερνά την τοπική ζήτηση. Μέσω του προγράμματος DESERTEC, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς αυτών των χωρών προς άλλες με μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες. Έτσι επωφελούνται και οι τελευταίες, αφού η ενέργεια που καταναλώνουν θα προέρχεται από ΑΠΕ και έτσι θα επιτυχαίνουν και τους ενεργειακούς τους στόχους. Χώρες της βόρειας Ευρώπης, όπως η Γερμανία, ήδη εξετάζουν σοβαρά το ενδεχόμενο να εισάγουν «ηλιακή» ηλεκτρική ενέργεια από τη βόρεια Αφρική και τη νότια Ευρώπη για να κάνουν τον ενεργειακό τους τομέα περισσότερο βιώσιμο. Βεβαίως, για κάθε νέο αναπτυξιακό έργο η ικανοποίηση της εγχώριας ζήτησης θα είναι η πρώτη προτεραιότητα.



Σχήμα 1.9. Ετήσιο DNI για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Σχήμα 1.10. Ο σταθμός συνδυασμένου κύκλου Θίβης

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1] “*Renewables 2015, Global Status Report*», Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2015”

[2] “*Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region*”, German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment 2005

[3] Yinghao Chu, «*Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies*», Research Associate, Global Energy Network Institute-GENI, (2011)

[4] Α.Μαντήκος, Διπλωματική Εργασία «*ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΟΥ ΚΟΛΠΟΥ*», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2012)

[5] http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422_read-16596/ [Ηλεκτρονικό]

[6] Κ.Γ Καρβούνης, «*Ενέργεια και πράσινη ανάπτυξη: Το ενεργειακό πρόβλημα στην Ελλάδα και οι πολιτικές για τη μετάβαση στην πράσινη οικονομία*», Διδακτορική Διατριβή, Πάντειο Πανεπιστήμιο (2014)

[7]) <http://205.254.135.7/countries/country-data.cfm?fips=GR#cde>, U.S. Energy Information Administration-EIA [Ηλεκτρονικό]

[8] <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI> [Ηλεκτρονικό]

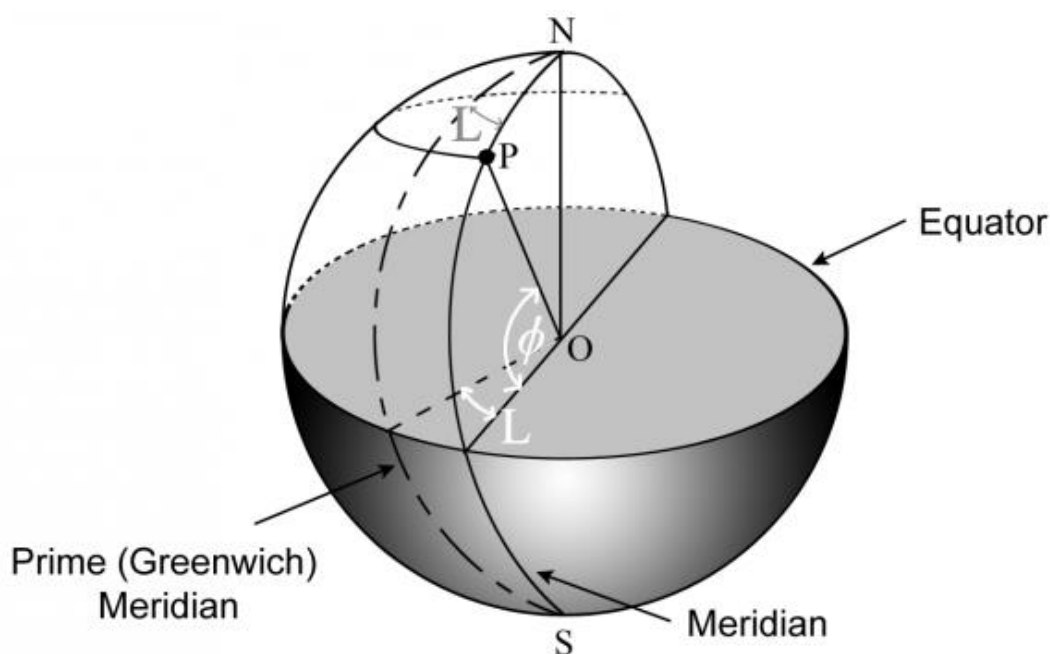
[9] [http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/129\(27-6-06\)_3468.pdf](http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/129(27-6-06)_3468.pdf) [Ηλεκτρονικό]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Η Γη

Θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε τη γη με μια συμπιεσμένη σφαίρα, με την έννοια ότι είναι πεπλατυσμένη στους πόλους και διογκωμένη γύρω από τον ισημερινό. Για τους υπολογισμούς της ηλιακής ενέργειας αρκεί να θεωρήσουμε τη γη ως μια απλή σφαίρα με διάμετρο περίπου 12.800 km. Τα σημεία στην επιφάνεια της γης ορίζονται βάσει γεωγραφικού μήκους και πλάτους (σχήμα 2.1). Το γεωγραφικό πλάτος του σημείου (ϕ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ακτίνας που προέρχεται από το σημείο με κατάληξη το κέντρο της Γης και την ακτίνα που προέρχεται από το κέντρο της Γης και καταλήγει στον ισημερινό, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.1. Οι τιμές του γεωγραφικού πλάτους κυμαίνονται από 0° έως 90° βόρεια και 0° έως 90° νότια (όπου 0° είναι το γεωγραφικό πλάτος για οποιοδήποτε σημείο πάνω στον ισημερινό). Το γεωγραφικό μήκος (L) ενός σημείου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού του Greenwich (ή κύριου μεσημβρινού) και του μεσημβρινού που διέρχεται από το σημείο (μεσημβρινός είναι μια περιφέρεια που περνάει μέσα από δύο πόλους).[1]

Οι τιμές του γεωγραφικού μήκους κυμαίνονται από 0° έως 90° ανατολικά και 0° έως 90° δυτικά (σημειώνεται ότι 0° είναι το γεωγραφικό μήκος οποιοδήποτε σημείου στο μεσημβρινό του Γκρήνουιτς). Όλα τα γεωγραφικά πλάτη πάνω από $66,55^\circ$ βόρεια βρίσκονται εντός του Αρκτικού κύκλου ενώ όλα τα σημεία κάτω από $66,55^\circ$ νότια ανήκουν στον Ανταρκτικό κύκλο. Αντίστοιχα όλα τα σημεία μεταξύ των γεωγραφικών πλατών $23,45^\circ$ βόρεια και $23,45^\circ$ νότια βρίσκονται μέσα στους τροπικούς, με τον Τροπικό του Καρκίνου να είναι στο γεωγραφικό πλάτος $23,45^\circ$ βόρεια και του Τροπικού του Αιγόκερου είναι σε γεωγραφικό πλάτος $23,45^\circ$ νότια. Τα γεωγραφικά πλάτη αν γραφτούν ως θετικές τιμές δείχνουν βόρεια ενώ οι αρνητικές τιμές δείχνουν νότια. Έτσι οι τροπικοί εκτείνονται από $+23,45^\circ$ έως και $-23,45^\circ$.[1]

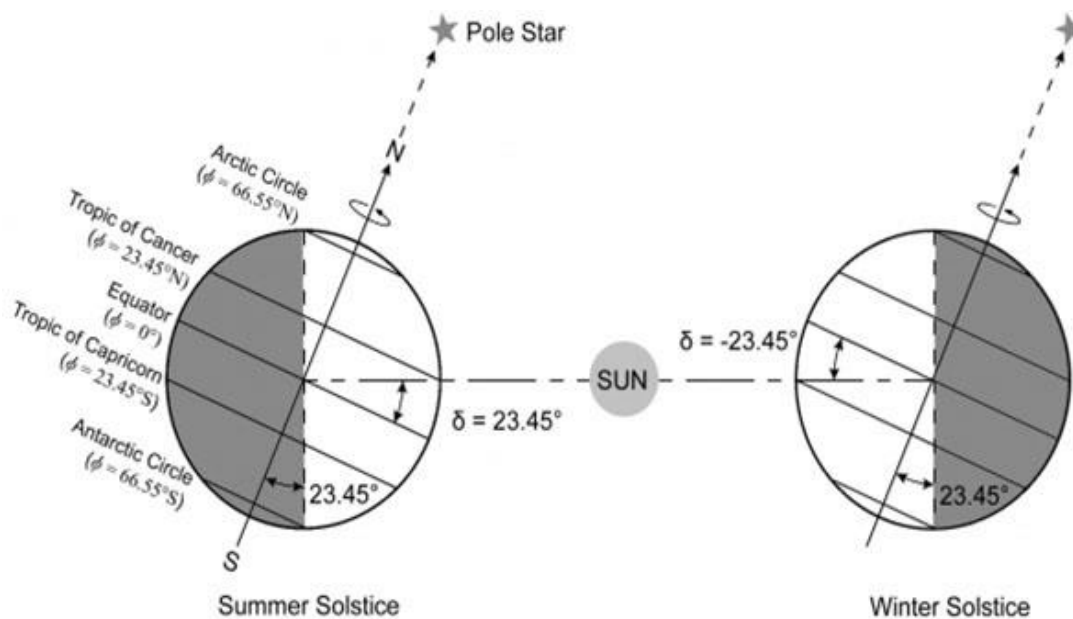


Σχήμα 2.1. Γεωγραφικό μήκος και πλάτος (Πηγή : <http://www.itacanet.org> [1])

2.1.1 Η Γη και η τροχιά της γύρω από τον Ήλιο

Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της κάθε 24 ώρες και εκτελεί μία περιφορά γύρω από τον Ήλιο περίπου κάθε 365,25 ημέρες. Η περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο ακολουθεί μια ελλειπτική τροχιά με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους να είναι $146,10 \times 10^6$ km (ονομάζεται *περιήλιο* και συμβαίνει περίπου στις 2 Ιανουαρίου) και την μέγιστη απόσταση να είναι $152,10 \times 10^6$ km (ονομάζεται *αφήλιο* και συμβαίνει περίπου στις 3 Ιουλίου). Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης απόστασης είναι μόνο 3,3%, έτσι στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται μια μέση απόσταση ίση με $149,5985 \times 10^6$ km. [1]

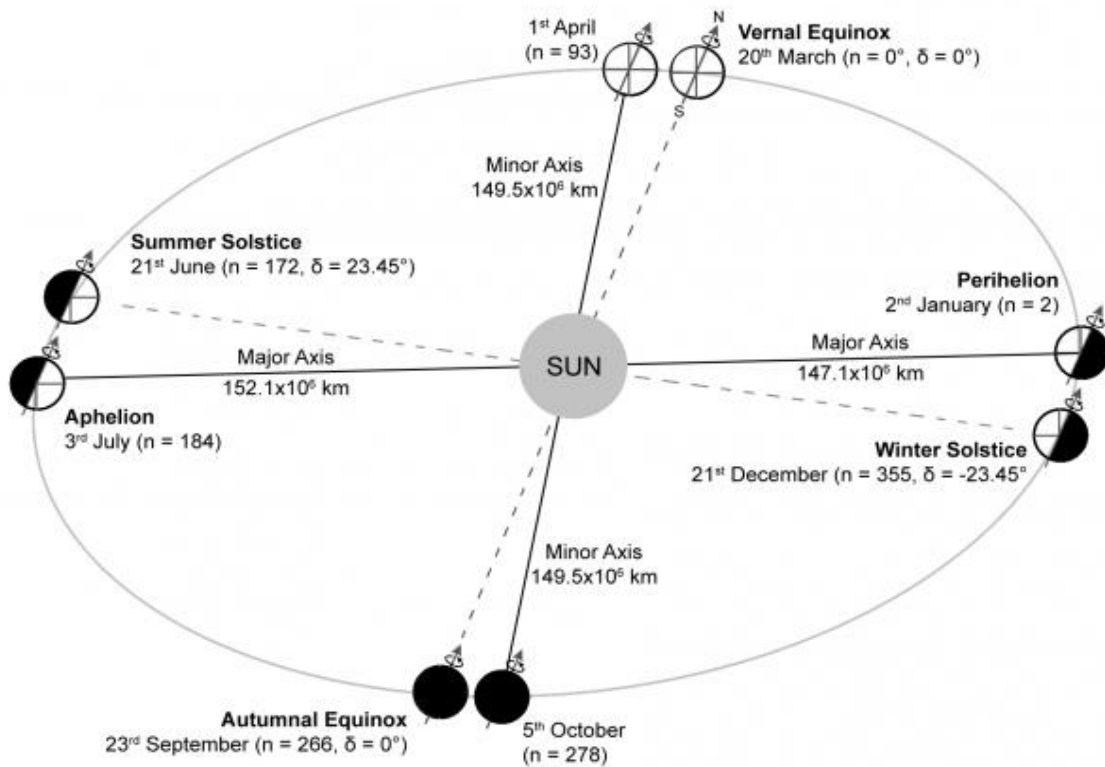
Ο άξονας περιστροφής κλίνει σε γωνία $23,45^\circ$ σε σχέση με το επίπεδο της τροχιάς γύρω από τον ήλιο και είναι προσανατολισμένος έτσι ώστε να δείχνει πάντα προς τον πολικό αστέρα. Εξαιτίας αυτής της κλίσης υπάρχουν οι εποχές και οι αλλαγές στη διάρκεια της ημέρας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η γωνία μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και της γραμμής που συνδέει τα κέντρα του ήλιου και της γης ονομάζεται *γωνία απόκλισης* (δ). Επειδή ο άξονας περιστροφής της Γης δείχνει πάντα τον πολικό αστέρα η γωνία απόκλισης αλλάζει καθώς η Γη περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο (σχήμα 2.2).



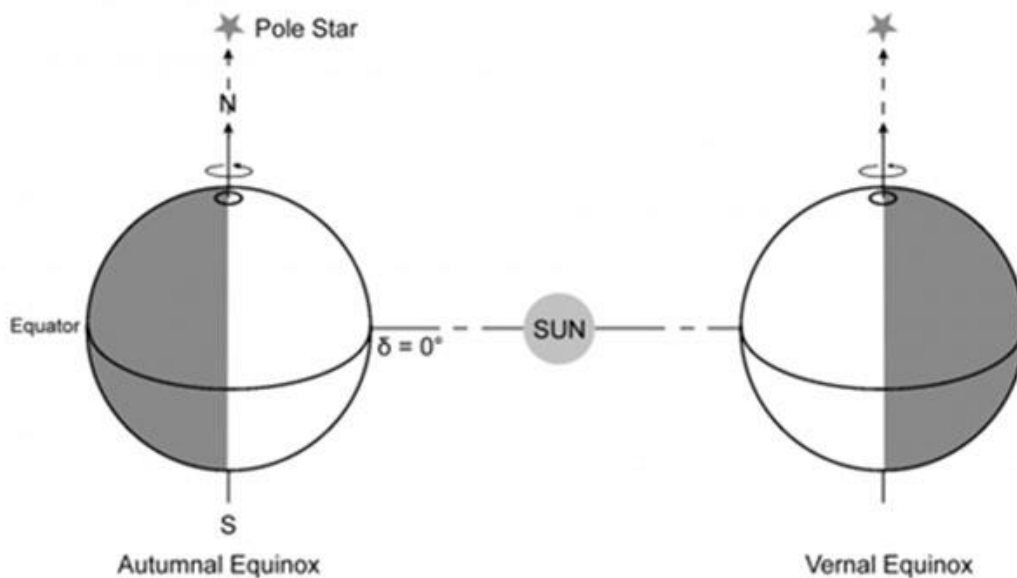
Σχήμα 2.2. Θερινό & χειμερινό ηλιοστάσιο, γωνία απόκλισης δ , γεωγραφικό πλάτος ϕ
(Πηγή : <http://www.itacanet.org> [1])

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τέσσερα σημεία στην τροχιά της γης (βλέπε σχήμα 2.3). Στο θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου) ο άξονας της Γης είναι προσανατολισμένος προς την κατεύθυνση του ήλιου, ως εκ τούτου, η γωνία απόκλισης είναι $23,45^\circ$. Όλα τα σημεία κάτω από $66,55^\circ$ νότια έχουν 24 ώρες σκοτάδι και όλα τα σημεία πάνω από $66,55^\circ$ βόρεια έχουν 24 ώρες ηλιοφάνεια [1]. Αντίστοιχα στο χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου) ο άξονας της Γης είναι άμεσα προσανατολισμένος μακριά από τον ήλιο, ως εκ τούτου, η γωνία απόκλισης είναι $-23,45^\circ$. Όλα τα σημεία κάτω από $66,55^\circ$ νότια έχουν 24 ώρες ηλιοφάνεια και κάθε σημείο πάνω από $66,55^\circ$ βόρεια έχει 24 ώρες σκότους. Τόσο στη φθινοπωρινή όσο και στην εαρινή ισημερία (23 Σεπτεμβρίου και 21 Μαρτίου αντίστοιχα) ο

άξονας της Γης είναι σε γωνία 90° με τη γραμμή που ενώνει τα κέντρα της Γης και του Ήλιου, ως εκ τούτου, η γωνία απόκλισης (δ) είναι 0° (σχήμα 2.4). Όλα τα γεωγραφικά πλάτη έχουν 12 ώρες ηλιοφάνειας και ο ήλιος είναι ακριβώς κάθετος στο ηλιακό μεσημέρι για όλα τα σημεία του ισημερινού[1].



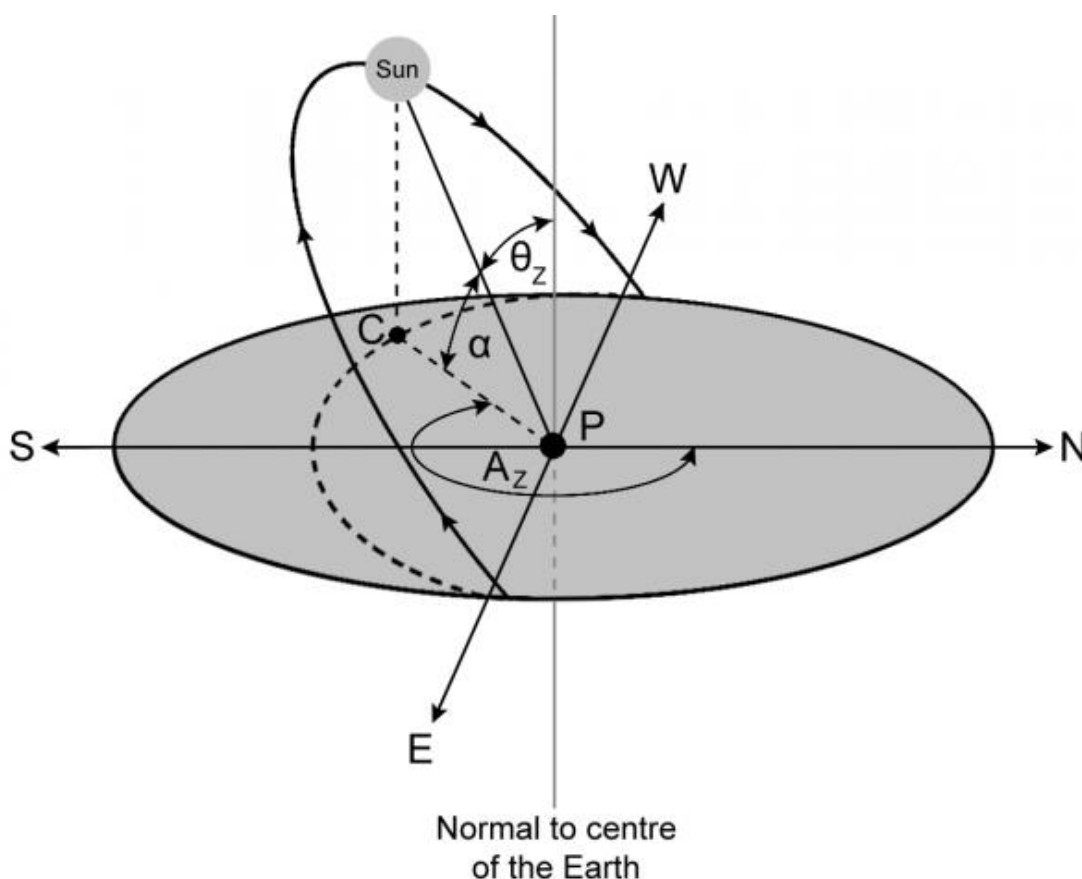
Σχήμα 2.3. Ηλιοστάσια και Ισημερίες (Πηγή <http://www.itacanet.org> [1])



Σχήμα 2.4. Φθινοπωρινή και Εαρινή Ισημερία (Πηγή <http://www.itacanet.org> [1])

2.1.2 Υπολογισμός της θέσης του Ήλιου

Υπάρχει και εναλλακτικός τρόπος μελέτης της θέσης του Ήλιου στον ουρανό, αυτός της σχετικής κίνησής του ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή στη Γη. Η θέση του Ήλιου στον ουρανό μπορεί να οριστεί χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από γωνίες (σχήμα 2.5). Συνήθως χρησιμοποιούμε τη γωνία απόκλισης (δ) και την ωριαία γωνία (ω). Η γωνία απόκλισης αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η *ωριαία γωνία* (ω) σε ένα σημείο P στην επιφάνεια της Γης είναι η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περιέχει το σημείο P και του μεσημβρινού που είναι παράλληλος προς τις ακτίνες του ήλιου (σχήμα 2.6). Η ωριαία γωνία παίρνει αρνητικές τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας, την τιμή μηδέν στο ηλιακό μεσημέρι και αυξάνει καθώς το απόγευμα εξελίσσεται. Η ωριαία γωνία σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι η ίδια για όλα τα σημεία που ανήκουν στον ίδιο μεσημβρινό (δηλαδή για τα σημεία με το ίδιο γεωγραφικό μήκος). Δεδομένου ότι η Γη ολοκληρώνει μια περιστροφή κάθε 24 ώρες, η γωνία ώρα αλλάζει κατά 15° ($360^\circ/24$) κάθε ώρα.[1]



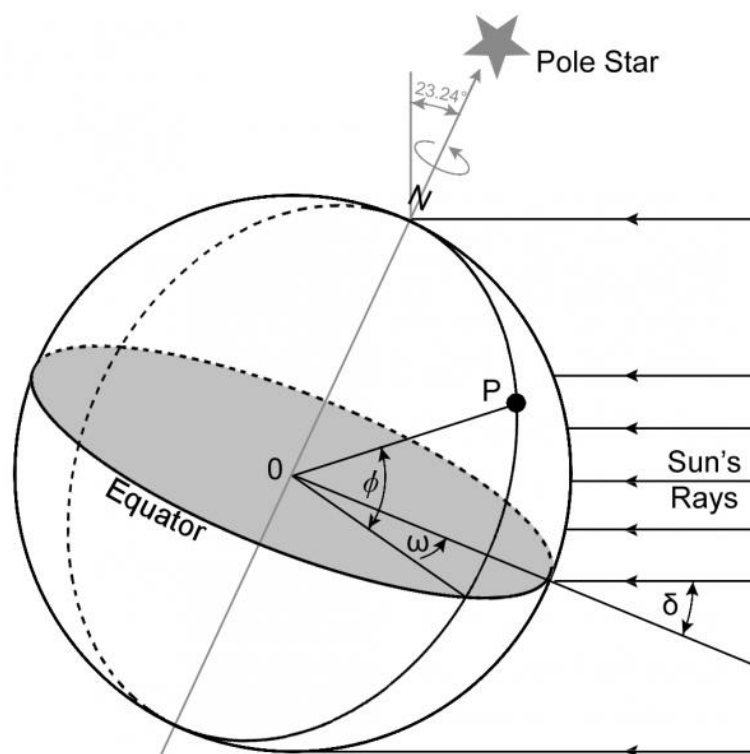
Σχήμα 2.5. Σχετική κίνηση του ήλιου ως προς ακίνητο παρατηρητή στη Γη
(Πηγή <http://www.itacanet.org> [1])

Παρατηρώντας το σχήμα 2.5 βλέπουμε ότι ορίζονται και κάποιες επιπλέον γωνίες που μας βοηθούν στον καθορισμό της θέσης του Ήλιου. Πιο συγκεκριμένα η ηλιακή γωνία ζενίθ (θ_z), η γωνία ηλιακού Αζιμούθιου (A_z) και η γωνία ηλιακού ύψους (α). Το ύψος του Ήλιου στον ουρανό μπορεί να προσδιορισθεί είτε σε σχέση με τον ορίζοντα από τη γωνία ηλιακού

ύψους (α) είτε σε σχέση με την κάθετο της επιφάνειας της Γης στο σημείο P από την ηλιακή γωνία ζενίθ (θ_z). Ισχύει ότι οι δύο αυτές γωνίες είναι συμπληρωματικές ($\alpha^\circ + \theta_z^\circ = 90^\circ$).

Έτσι συνοψίζοντας έχουμε τους εξής ορισμούς για τις ηλιακές γωνίες :

- Γωνία ζενίθ (θ_z) : η γωνία μεταξύ της καθέτου της επιφάνειας της Γης στο σημείο P και της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Γωνία ηλιακού ύψους (α) : η γωνία μεταξύ του οριζοντα της Γης στο σημείο P και του ήλιου.
- Γωνία αζιμούθιου (A_z) : η γωνία που σχηματίζει η προβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο με το Βορά. Η θετική φορά της γωνίας αζιμούθιου είναι η ωρολογιακή.

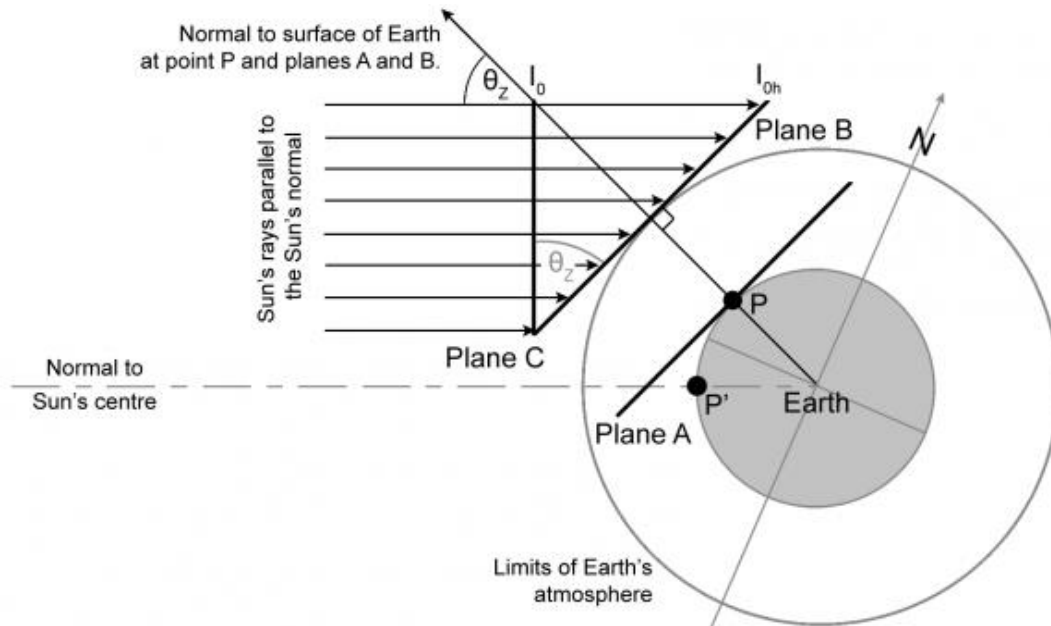


Σχήμα 2.6. Γεωγραφικό μήκος (ϕ), γωνία απόκλισης (δ) και ωριαία γωνία για σημείο P
(Πηγή <http://www.itacanet.org> [1])

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6 δεν είναι όλα τα σημεία στην επιφάνεια της Γης κάθετα στις ακτίνες του Ήλιου. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μια τέτοια επιφάνεια είναι μειωμένη σε σχέση με εκείνη που θα προσέπιπτε σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία. Η μείωση αυτή εξαρτάται από το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζουν η διεύθυνση της ακτινοβολίας και η κάθετος στην επιφάνεια και ονομάζεται *Φαινόμενο Συνημιτόνου*.

Σχηματικά το φαινόμενο του συνημιτόνου φαίνεται ακόμα καλύτερα στο παρακάτω σχήμα (2.7). Έστω P το σημείο ενδιαφέροντος πάνω στη Γη που δεν είναι σε επιφάνεια κάθετη στην ηλιακή ακτινοβολία. Θεωρούμε επίπεδο που εφάπτεται στην επιφάνεια της

Γης στο σημείο P και φέρνουμε την κάθετη στο επίπεδο αυτό που καταλήγει στο κέντρο της Γης. Έτσι σχηματίζεται η γωνία θ_z με τις ηλιακές ακτίνες.

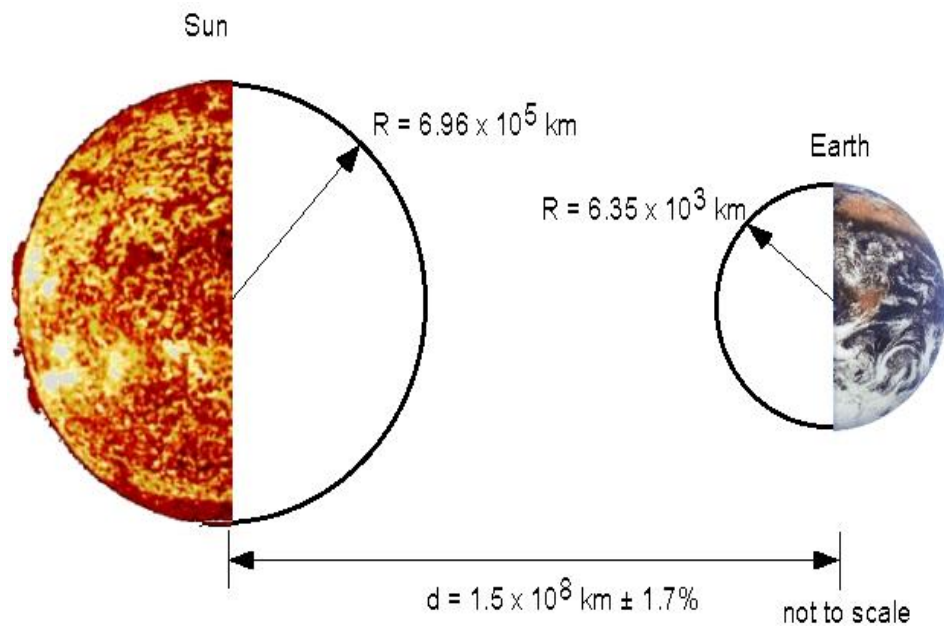


Σχήμα 2.7. Φαινόμενο Συνημιτόνου (Πηγή <http://www.itacanet.org> [2])

2.2 Ο Ήλιος

Ο Ήλιος είναι μια πυρακτωμένη σφαίρα αέριας ύλης με διάμετρο 1.39×10^9 m (βλέπε σχήμα 2.8). Η εσωτερική θερμοκρασία του μπορεί να φτάσει πάνω από 20 εκατομμύρια βαθμούς Κέλβιν λόγω αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης στον πυρήνα του που μετατρέπουν το υδρογόνο σε ήλιο. Η ακτινοβολία που προέρχεται από τον εσωτερικό πυρήνα του Ήλιου δεν είναι ορατή αφού απορροφάται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ένα στρώμα ατόμων υδρογόνου κοντά στην επιφάνειά του. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω αυτού του στρώματος από συναγωγή. Η επιφάνεια του Ήλιου, που ονομάζεται φωτόσφαιρα, είναι σε θερμοκρασία περίπου 6000 Kelvin. Η τιμή 6000K χρησιμοποιείται προσεγγιστικά σε μαθηματικούς υπολογισμούς, αλλά οι θερμοκρασίες $5762 \pm 50\text{K}$ (Backus, 1976) και $5730 \pm 90\text{K}$ (Parrott, 1993) έχουν προταθεί ως πιο ακριβείς τιμές. [1]

Ο ήλιος απέχει περίπου 1.5×10^8 χιλιόμετρα από τη Γη και επειδή η θερμική ακτινοβολία ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός στο κενό (300.000 km/s), μετά την αποχώρησή της από τον ήλιο η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στον πλανήτη μας σε 8 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα [5].



Σχήμα 2.8. Διαστάσεις και απόσταση Ήλιου-Γης (Πηγή : <http://www.pveducation.org> [6])

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο δεν αποτελείται από μόνο ένα μήκος κύματος, αλλά από πολλά μήκη κύματος και ως εκ τούτου φαίνεται λευκή ή κίτρινη στο ανθρώπινο μάτι. Αυτά τα διαφορετικά μήκη κύματος μπορεί να φανούν με πέρασμα του φωτός μέσα από ένα πρίσμα ή σταγονίδια νερού. Διαφορετικά μήκη κύματος εμφανίζονται ως διαφορετικά χρώματα, αλλά ορισμένα δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι.

Η πυκνότητα της συνολικής ισχύος ενός μέλανος σώματος (όπως είναι ο Ήλιος) καθορίζεται ενσωματώνοντας τη φασματική ακτινοβολία πάνω σε όλα τα μήκη κύματος και έχουμε :

$$\mathbf{H = \sigma \times T^4} \quad (2.1)$$

όπου : σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann

T (K) είναι η θερμοκρασία του μέλανος σώματος.

Η συνολική ισχύς που εκπέμπεται από τον Ήλιο υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πυκνότητα ισχύος που εκπέμπεται με την επιφάνειά του η οποία δίνει $9.5 \times 10^{25} \text{ W}$ [5]. Η συνολική παραγωγή ενέργειας του Ήλιου είναι $3.8 \times 10^{20} \text{ MW}$, το οποίο αντιστοιχεί σε 63 MW/m^2 επιφάνειας του Ήλιου κατά προσέγγιση. Αυτή η ενέργεια ακτινοβολείται προς τα έξω σε όλες τις κατευθύνσεις. Η Γη λαμβάνει ένα μικρό μόνο μέρος της συνολικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται, ίση με $1.73 \times 10^{14} \text{ kW}$. Αυτό το ποσό είναι ισοδύναμο με $1.5 \times 10^{18} \text{ kWh}$ ενέργειας ετησίως, η οποία ισοδυναμεί με ενέργεια που δίνουν 1.9×10^{14} τόνοι άνθρακα. Σε σύγκριση με την παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ενέργειας που αντιστοιχεί σε περίπου 10^{10} τόνους άνθρακα, αυτό είναι ένα πολύ μεγάλο ποσό. Είναι ενέργεια περίπου 10.000 φορές περισσότερη από εκείνη που καταναλώνεται στη Γη ετησίως. Θεωρητικά η ενέργεια από 84 λεπτά ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει στη Γη θα κάλυπτε την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας για ένα χρόνο (περίπου 900 EJ).

Σε όρους μηχανικής, αυτή η ηλιακή ενέργεια θεωρείται ότι έχει απλωθεί ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του πλανήτη. Το ποσό της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας ανά μονάδα

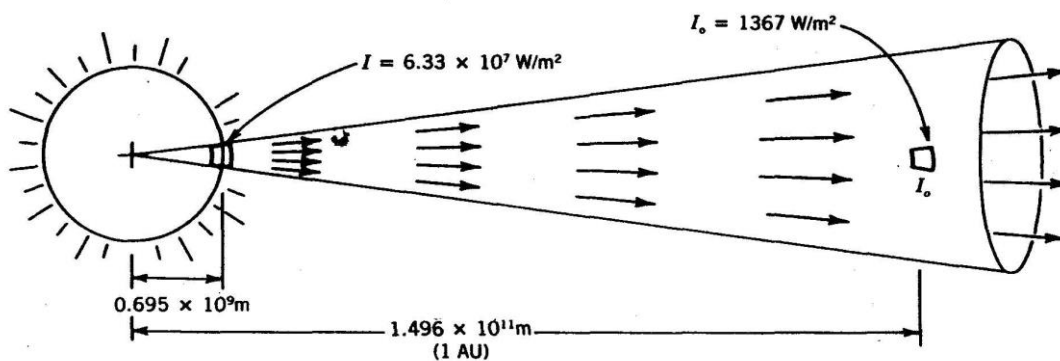
επιφάνειας είναι γνωστή ως ακτινοβολία είτε ως πυκνότητα ακτινοβολούμενης ροής. Η πυκνότητα της ηλιακής ισχύος μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, την εποχή του έτους και την ώρα σε μια συγκεκριμένη ημέρα.

Όπως φαίνεται από τη Γη, ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του περίπου μία φορά κάθε τέσσερις εβδομάδες. Όταν παρατηρείται από τη Γη, ο δίσκος του Ήλιου σχηματίζει γωνία 32 λεπτά της μοίρας. Αυτό είναι σημαντικό σε πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα στην οπτική για συγκεντρωτικά συστήματα, όπου ο Ήλιος δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μια σημειακή πηγή και ακόμη και αυτή η μικρή γωνία είναι σημαντική για την ανάλυση της οπτικής συμπεριφοράς του συλλέκτη.

Στα επόμενα κεφάλαια που θα αναλύσουμε την ηλιακή ακτινοβολία και πως καταμερίζεται με βάση με G θα συμβολίζουμε τις στιγμιαίες τιμές της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (σε W/m^2), με I οι ωριαίες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (σε kWh/m^2), και με H οι ημερήσιες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (σε kWh/m^2). Οι μέσες ημερήσιες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, για κάθε μήνα του έτους, συμβολίζονται με \bar{H} .

- Η Ηλιακή Σταθερά

Επειδή η ακτινοβολία διαχέεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης, από τη στιγμή που ταξιδεύει προς τη Γη ($1.496 \times 10^{11}m$ ή 1 AU είναι η μέση απόσταση Γης-Ήλιου) η ακτινοβολία μειώνεται σταδιακά όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.9. Η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος θεωρείται σταθερή, ως εκ τούτου, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε απόσταση 1 AU ορίζουμε ως ηλιακή σταθερά H_{const} και έχει μια τρέχουσα αποδεκτή τιμή $1.367 W/m^2$ (Fröhlich και Brusa 1981, και Iqbal 1983) [7].



Σχήμα 2.9. Προσδιορισμός της ηλιακής σταθεράς

(Πηγή : <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html> [7])

2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα

Μόνο ένα κλάσμα της συνολικής ισχύος που εκπέμπεται από τον Ήλιο προσκρούει σε ένα αντικείμενο στο διάστημα το οποίο βρίσκεται σε κάποια απόσταση από τον ήλιο. Η ηλιακή ακτινοβολία (H_0 σε W/m^2) είναι η πυκνότητα της προσπίπτουσα ισχύος σε ένα αντικείμενο που φωτίζεται από τον Ήλιο. Στην επιφάνεια του Ήλιου, η πυκνότητα ισχύος είναι αυτή ενός μέλανος σώματος με θερμοκρασία περίπου 6000K και η συνολικής ισχύς από τον Ήλιο βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με την επιφάνεια του Ήλιου. Ωστόσο, σε κάποια απόσταση από τον Ήλιο, η συνολική ισχύς απλώνεται πλέον πάνω σε πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια και ως εκ τούτου η ηλιακή ακτινοβολία σε ένα αντικείμενο στο διάστημα μειώνεται καθώς το αντικείμενο κινείται περαιτέρω μακριά από τον ήλιο (σχήμα 2.9). [8]

Η ηλιακή ακτινοβολία σε ένα αντικείμενο σε κάποια απόσταση D από τον Ήλιο βρίσκεται διαιρώντας τη συνολική ισχύ που εκπέμπεται από τον Ήλιο με την επιφάνεια στην οποία πέφτει το ηλιακό φως [8]. Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο δίνεται από τη σχέση (2.1) πολλαπλασιαζόμενη με την επιφάνεια του Ήλιου ($4\pi R_{sun}^2$) όπου R_{sun} είναι η ακτίνα του Ήλιου. Η επιφάνεια επί της οποίας η ισχύς από τον Ήλιο πέφτει θα είναι $4\pi D^2$, όπου D είναι η απόσταση του αντικειμένου από τον Ήλιο. Συνεπώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, H_0 (W/m^2), που προσπίπτει επί ενός αντικειμένου είναι:

$$H_0 = \frac{R_{sun}^2}{D^2} \times H_{sun} \quad (2.2)$$

Όπου:

H_{sun} είναι η πυκνότητα ισχύος στην επιφάνεια του Ήλιου (μονάδες W/m^2) όπως καθορίζεται από την εξίσωση Stefan-Boltzmann για μέλανα σώματα

R_{sun} είναι η ακτίνα του Ήλιου σε μέτρα

D είναι η απόσταση από τον Ήλιο σε μέτρα.

2.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα της Γης

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα της Γης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την πυκνότητα ισχύος (H_{sun}) στην επιφάνεια του ήλιου ($5.961 \times 10^7 W/m^2$), την ακτίνα του ήλιου (R_{sun}), και την απόσταση ανάμεσα στη γη και τον ήλιο. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα της Γης έχει υπολογισθεί περίπου $1,36 kW/m^2$. Οι γεωμετρικές σταθερές που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει επί του Γη φαίνονται στο σχήμα 2.8.

Η πραγματική πυκνότητα ισχύος παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις που οφείλονται στη μεταβαλλόμενη απόσταση Γης-Ήλιου, καθώς η Γη κινείται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο αλλά και επειδή η ενέργεια που εκπέμπει ο ήλιος δεν είναι σταθερή. Η ποσοστιαία διακύμανση της ισχύος λόγω της ελλειπτικής τροχιάς είναι περίπου 3,4%, με τον Ιανουάριο να αποτελεί το μήνα με τη μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία και τον Ιούλιο τη μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία [6].

Η εξίσωση που περιγράφει τη διακύμανση της ισχύος ακριβώς έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι [6] :

$$\frac{H}{H_{\text{constant}}} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right) \quad (2.3)$$

όπου :

H είναι η πυκνότητα ισχύος έξω από την ατμόσφαιρα της Γης (μονάδες W/m²)

H_{constant} είναι η τιμή της ηλιακής σταθεράς (1.367 W/m²)

n είναι η ημέρα του έτους.

Συνήθως αυτές οι διακυμάνσεις είναι μικρές και για φωτοβολταϊκές εφαρμογές η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς και το φάσμα της έχουν οριστεί ως σταθερά που συμβολίζεται ως «AM0» (το φάσμα έξω από την ατμόσφαιρα, προσεγγίζεται ως μέλανος σώματος 5800K, που σημαίνει «μηδέν ατμόσφαιρες») και λαμβάνει την τιμή των 1.353 kW/m² [6].

2.2.3 Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία στα όρια ατμόσφαιρας της Γης

Η ηλιακή σταθερά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη προς τις ακτίνες του ήλιου και στα όρια της ατμόσφαιρας της Γης ή αλλιώς *εξωγήινης ακτινοβολίας* για κάθε ημέρα του έτους [14]:

$$H_0 = H_{\text{const}} \times \left[1 + 0.034 \cos\left(2\pi \frac{n}{265.25}\right) \right] \quad (2.4)$$

όπου :

H₀: εξωγήινη ακτινοβολία σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες (W/m²),

H_{const} : η ηλιακή σταθερά (1367 W/m²),

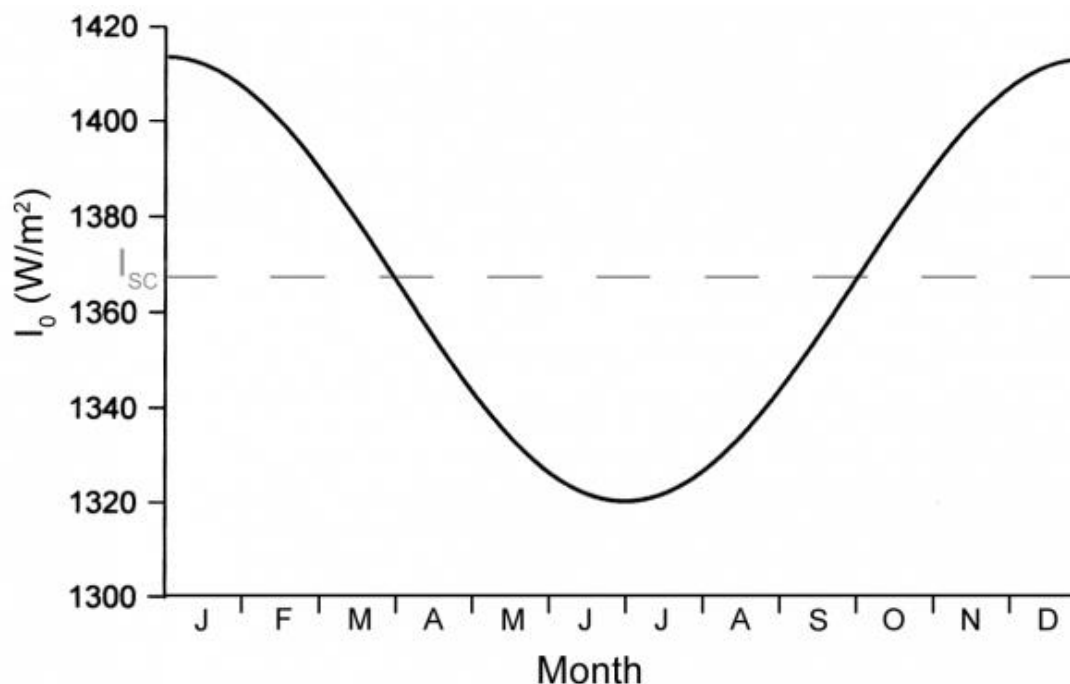
n : η ημέρα του έτους με την 1η Ιανουαρίου να αντιστοιχεί στο n = 1.

Στο σχήμα 2.10 φαίνεται η μεταβολή της εξωγήινης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Οι περισσότερες μελέτες για το ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής ξεκινάνε με τον υπολογισμό της εξωγήινης ακτινοβολίας, μιας και για οποιαδήποτε μέρα του έτους είναι η μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να ληφθεί από τον ήλιο (προτού έχουμε ατμοσφαιρικές ή λοιπές επιδράσεις).

Με βάση το φαινόμενο του συνημιτόνου που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2.1.2 η εξωγήινη ακτινοβολία σε επιφάνεια που δεν είναι κάθετη προς την ακτινοβολία θα είναι μειωμένη. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε την εξωγήινη ακτινοβολία σε μια επιφάνεια παράλληλη με τον ορίζοντα στο σημείο ενδιαφέροντος πολλαπλασιάζοντας με το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ, την οποία έχουμε ορίσει ως τη γωνία μεταξύ της καθέτου της επιφάνειας της Γης στο σημείο ενδιαφέροντος και της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Έτσι τελικά για οποιαδήποτε οριζόντια επιφάνεια έξω ακριβώς από τη γήινη ατμόσφαιρα έχουμε :

$$H = H_0 \times \cos\theta_z \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.10. Μεταβολή εξωγήινης ακτινοβολίας στη διάρκεια ενός έτους
(Πηγή : <http://www.pveducation.org> [2])

2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και επιφάνεια της Γης

Από τη στιγμή που η εξωγήινη ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα παύει να είναι σχετικά σταθερή και συνεχής, οπότε για τον υπολογισμό της δεν αρκούν οι σχέσεις (2.4) και (2.5). Η ακτινοβολία που τελικά φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη ποικίλει σε μεγάλο βαθμό. Αυτό οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης απορρόφησης και σκέδασης, σε τοπικές παραλλαγές της ατμόσφαιρας, όπως ύπαρξη υδρατμών, σύννεφων και ρύπων. Επιπλέον προφανείς παράγοντες είναι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, η εποχή του έτους και η ώρα της ημέρας [10].

Οι παραπάνω επιδράσεις έχουν πολλές επιπτώσεις στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Αυτές οι αλλαγές περιλαμβάνουν μεταβολές στην συνολική λαμβάνουσα ισχύ, το φασματικό περιεχόμενο του φωτός και τη γωνία από την οποία το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια. Επιπλέον, μια βασική αλλαγή είναι ότι αυξάνεται δραματικά η μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία. Η μεταβλητότητα οφείλεται τόσο τοπικές επιδράσεις, όπως τα σύννεφα και οι εποχιακές διακυμάνσεις, καθώς και σε άλλες, όπως η διάρκεια της ημέρας σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος. Οι περιοχές της ερήμου τείνουν να έχουν χαμηλότερες διακυμάνσεις λόγω των τοπικών ατμοσφαιρικών φαινομένων, όπως έλλειψη σύννεφων, ενώ οι περιοχές στον Ισημερινό έχουν χαμηλή μεταβλητότητα μεταξύ των εποχών. [10]

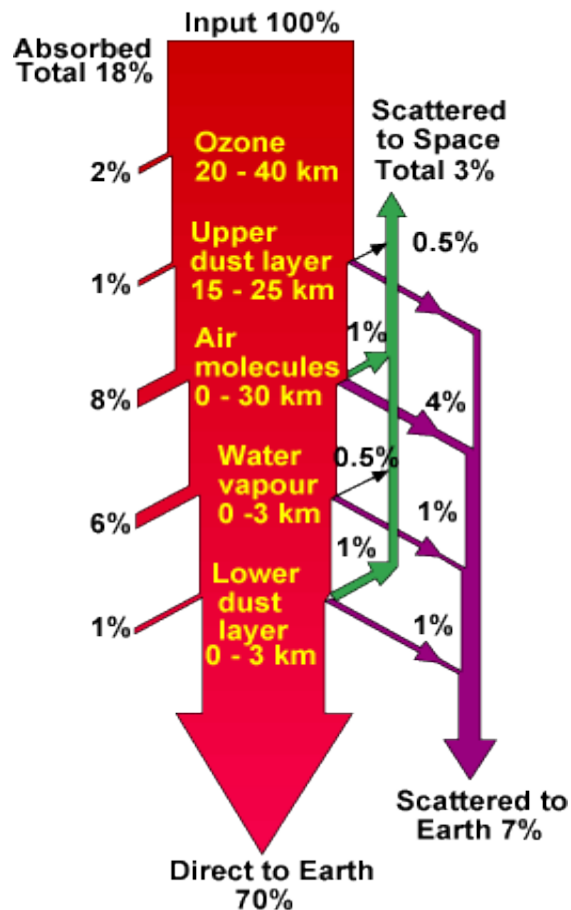
Στην επιφάνεια της γης, αντιλαμβανόμαστε την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (I_b) που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο και μια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (I_d) που φαίνεται να προέρχεται από όλες τις κατευθύνσεις του ουρανού και είναι το ποσό της ακτινοβολίας που έχει υποστεί ανάκλαση ή σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα, αλλά και ανάκλαση πάνω στην

επιφάνεια της Γης. Το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας ονομάζεται *ολική ηλιακή ακτινοβολία* (I_t).

Η άμεση ακτινοβολία εξαρτάται από την απόσταση Ήλιου-Γης, τη γωνία απόκλισης, το ηλιακό ύψος, το γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει, καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση που υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκάγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκεδάσεως (αερολυμάτων, σταγονιδίων υδρατμού κλπ.) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

2.2.4.1 Ατμοσφαιρικές Επιδράσεις

Η ατμόσφαιρα προκαλεί μείωση της εισερχόμενης εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας κατά περίπου 30% σε μια πολύ αίθρια ημέρα και έως σχεδόν 90% σε μια πολύ συννεφιασμένη μέρα. Το σχήμα 2.11 δίνει μια ένδειξη του εύρους της απορρόφησης και σκέδασης που προκαλούνται από διαφορετικές συνιστώσες της ατμόσφαιρας. Σε μια αίθρια μέρα, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία αντιπροσωπεύει περίπου το 80% ή 90% της συνολικής ποσότητας της ηλιακής ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της γης. Η τοπική παρεμπόδιση της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί σκιές. Σε μια ημέρα συννεφιασμένη ή με ομίχλη, όταν ο ήλιος δεν είναι ορατός η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι ουσιαστικά μηδέν και δεν υπάρχουν σκιές. Αντίθετα η διάχυτη ακτινοβολία είναι αυτή που μας επιτρέπει να δούμε στη σκιά. Η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τους σχεδιαστές συστημάτων ηλιακής ενέργειας, διότι μπορεί να συγκεντρωθεί σε μικρές περιοχές με τη χρήση κατόπτρων ή φακών, ενώ η διάχυτη δεν μπορεί.[7]



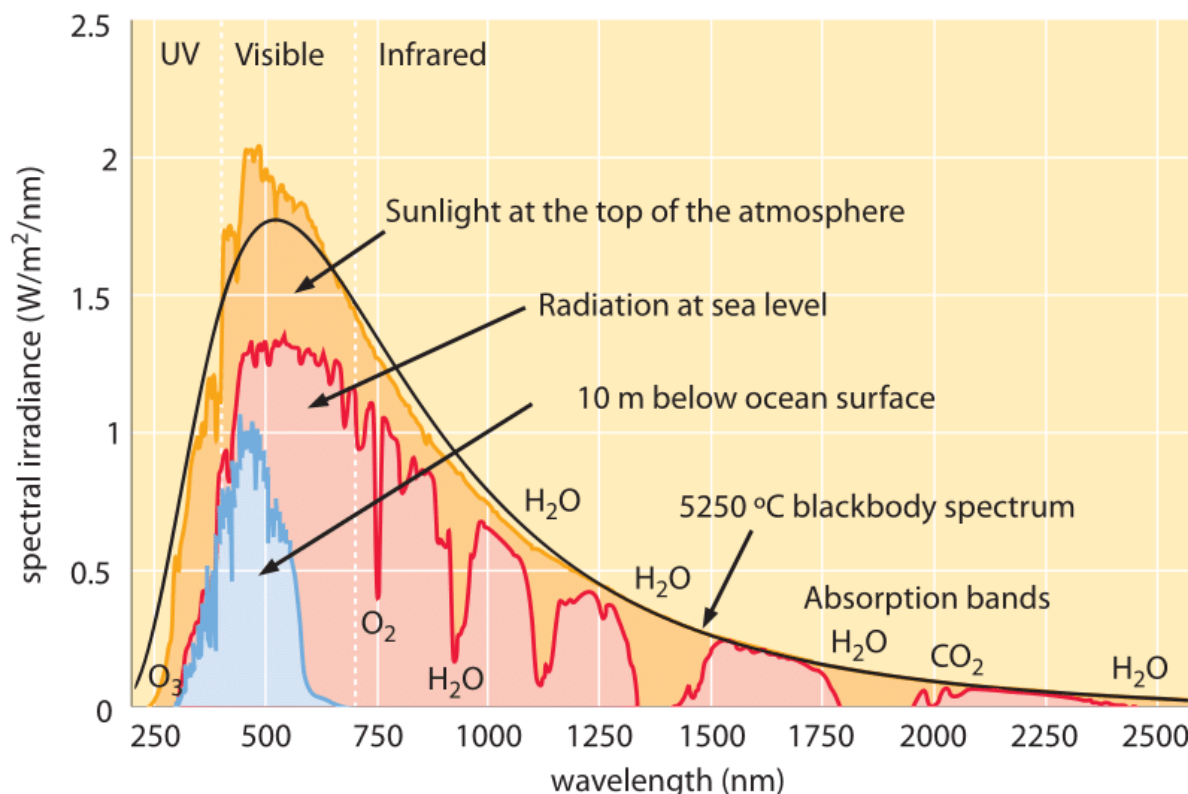
Σχήμα 2.11. Ατμοσφαιρικές επιδράσεις στην ηλιακή ακτινοβολία έτους
(Πηγή : <http://www.pveducation.org> [11])

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12 η διάχυτη ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα της προς τα κάτω σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας με άζωτο, οξυγόνο, μόρια ή σταγονίδια νερού και τα σωματίδια σκόνης στην ατμόσφαιρα. Το ποσό αυτής της σκέδασης εξαρτάται από την ποσότητα του νερού και της σκόνης στην ατμόσφαιρα, αλλά και το υψόμετρο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Όπως προαναφέραμε η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να συγκεντρωθεί. Εξαίρεση αποτελούν κάποια μοντέλα (μη-συγκεντρωτικών) ηλιακών συλλεκτών επίπεδης πλάκας και ορισμένα είδη συγκεντρωτών χαμηλής θερμοκρασίας (με ευρεία γωνία αποδοχής) που μπορούν να συλλέξουν διάχυτη ακτινοβολία. Το γενικό συμπέρασμα όμως είναι ότι λίγοι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μπορούν να αξιοποιήσουν τη διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2.4.2 Μάζα Αέρα και ηλιακό φάσμα

Η ατμόσφαιρα διασκορπίζει και απορροφά μέρος της ενέργειας του ήλιου που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης. Η σκέδαση της ακτινοβολίας από τα μόρια αερίων όπως π.χ. των O₂, O₃, H₂O και CO₂ που είναι πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας καλείται σκέδαση Rayleigh. Περίπου το ήμισυ της ακτινοβολίας που σκεδάζεται χάνεται στο διάστημα και το έτερο ήμισυ κατευθύνεται προς την επιφάνεια της Γης από όλες τις κατευθύνσεις ως διάχυτη ακτινοβολία. Λόγω της απορρόφησης από τα μόρια του οξυγόνου και όζοντος το βραχύτερο μήκος κύματος που φθάνει στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 0,29 μm. Μόρια άλλων αερίων απορροφούν διαφορετικά μήκη κύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12. [11]

Η σκέδαση από σωματίδια σκόνης μεγαλύτερα από τα μήκη κύματος του φωτός ονομάζεται σκέδαση Mie. Στην περίπτωση αυτή έχουμε άμεση σκέδαση (όπου η ακτινοβολία αναπηδά πάνω στα σωματίδια) αλλά και απορρόφηση ακολουθούμενη από εκπομπή, η οποία θερμαίνει τα σωματίδια. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που σκεδάζεται από τη διαδικασία αυτή διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία και τον καιρό. Μια μορφή της σκέδασης Mie, που ονομάζεται φαινόμενο Tyndall, σκορπίζει τα μικρότερα μήκη κύματος και είναι υπεύθυνη για το μπλε χρώμα του ουρανού.[10]



Σχήμα 2.12. Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας (Πηγή :

<http://book.bionumbers.org/wp-content/uploads/202014/08/320-f1-SolarSpectrum-11.png>)

Το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται, διαχέεται και απορροφάται εξαρτάται τόσο από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες (που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο) όσο και από την απόσταση που διανύει μέσα στην ατμόσφαιρα μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από τη γωνία του ήλιου και μετρείται μάζες αέρα. Ο όρος *μάζα αέρα* (AM - Air Mass) είναι ο λόγος της απόστασης που η ηλιακή ακτινοβολία

διανύει μέσα στην ατμόσφαιρα της γης (μήκος διαδρομής) προς την απόσταση που θα διένυε εάν οι ηλιακές ακτίνες ήταν κάθετες στην επιφάνεια. Δίνεται από τη σχέση :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (2.6)$$

όπου θ είναι η γωνία από την κατακόρυφο (γωνία ζενίθ). Άρα έξω από την ατμόσφαιρα της γης $AM=0$, ενώ όταν ο ήλιος είναι ακριβώς από πάνω, η Air Mass ισούται με 1 ($\theta_z=0$).

Μία πιο αναλυτική και ακριβής εξίσωση, που λαμβάνει υπόψιν την καμπυλότητα της γης είναι η παρακάτω :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0,50572 (96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}} \quad (2.7)$$

2.3 Μεθοδολογία Υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας

Στα κεφάλαια 2.1 και 2.2 αναφέραμε τις βασικές αρχές της ηλιακής αστρονομίας και αναλύσαμε το πώς κατανέμεται η ηλιακή ακτινοβολία από τη στιγμή που φεύγει από την επιφάνεια του ήλιου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τη μεθοδολογία που ακολουθούμε για να υπολογίσουμε την ηλιακή ενέργεια σε μια περιοχή.

2.3.1 Υπολογισμός ηλιακών γωνιών [3]

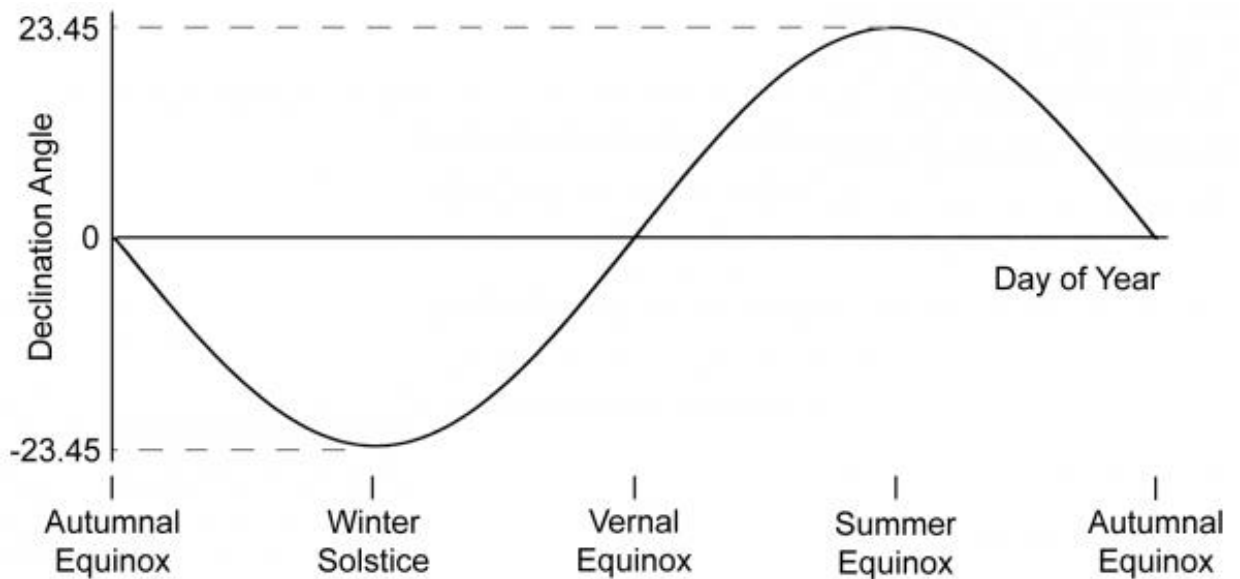
Γωνία Απόκλισης (δ): Η γωνία μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και της γραμμής που συνδέει τα κέντρα του ήλιου (βλέπε κεφ. 2.1.1). Η εξίσωση που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της γωνίας απόκλισης για κάθε ημέρα ενός έτους είναι (σε radians):

$$\delta = 23,45 \frac{\pi}{180} \sin \left[2\pi \left(\frac{284 + n}{36,25} \right) \right] \quad (2.8)$$

όπου :

δ : η γωνία απόκλισης σε radians

n : η ημέρα του έτους με την 1η Ιανουαρίου να αντιστοιχεί στο $n = 1$.



Σχήμα 2.13. Η μεταβολή της γωνίας απόκλισης κατά τη διάρκεια ενός έτους
(Πηγή : <http://www.itacanet.org> [3])

Η γωνία απόκλισης είναι η ίδια για όλη την υδρόγειο σε μια δεδομένη ημέρα. Το Σχήμα 2.13 παρουσιάζει την μεταβολή της γωνίας αποκλίσεως κατά τη διάρκεια ενός έτους για το βόρειο ημισφαίριο. Επειδή η περίοδος πλήρους περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο δεν συμπίπτει ακριβώς με το ημερολογιακό έτος η απόκλιση ποικίλλει ελαφρώς την ίδια ημέρα από χρόνο σε χρόνο. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η γωνία απόκλισης μηδενίζεται για τις ισημερίες (22 Μαρτίου και 22 Σεπτεμβρίου), παίρνει θετικές τιμές για το βόρειο ημισφαίριο κατά το καλοκαίρι και αρνητικές τιμές το χειμώνα. Αντίστοιχα, παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ίση με 23.45° , στο θερινό ηλιοστάσιο (22 Ιουνίου) και την ελάχιστη τιμή της, ίση με -23.45° , στο χειμερινό ηλιοστάσιο (22 Δεκεμβρίου).

Ωριαία Γωνία (ω) : Η *ωριαία γωνία* σε ένα σημείο P στην επιφάνεια της Γης είναι η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περιέχει το σημείο P και του μεσημβρινού που είναι παράλληλος προς τις ακτίνες του ήλιου (βλέπε κεφ.2.1.2). Δύο εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ωριαίας γωνίας όταν είναι γνωστές διάφορες γωνίες :

$$\sin\omega = -\frac{\cos\alpha \sin A_z}{\cos\delta} \quad (2.9)$$

$$\sin\omega = \frac{\sin\alpha - \sin\delta\sin\varphi}{\cos\delta \cos\varphi} \quad (2.10)$$

όπου:

ω = η ωριαία γωνία

α = γωνία ηλιακού ύψους

A_z = γωνία ηλιακού Αζιμούθιου

δ = η γωνία απόκλισης

φ = γεωγραφικό πλάτος

Είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε την τιμή για τις *ωριαίες γωνίες στην ανατολή και δύση του Ήλιου* (ω_s). Αριθμητικά οι δύο αυτές τιμές έχουν την ίδια αξία, ωστόσο η γωνία ανατολής είναι αρνητική και η γωνία δύσης είναι θετική. Και οι δύο μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\cos\omega_s = -\tan\varphi \tan\delta \rightarrow \omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (2.11)$$

Για μια κεκλιμένη επιφάνεια οι ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης του ηλίου γωνίες (ω'_s) δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$\cos\omega'_s = -\tan(\varphi - \beta)\tan\delta \quad (2.12)$$

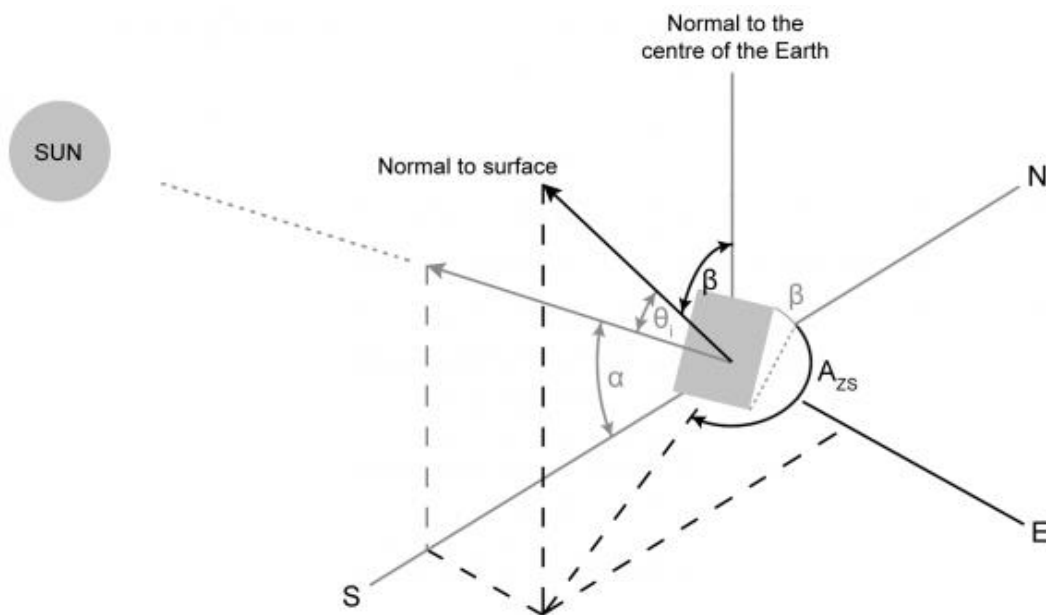
όπου β η κλίση του επιπέδου για την περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Όταν ένα σημείο βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο αλλά δεν αντικρίζει τον ισημερινό, ο υπολογισμός των ωριαίων γωνιών για την ανατολή και δύση του ηλίου είναι πολύπλοκος. Μία τέτοια επιφάνεια παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14. Για μια τέτοια επιφάνεια οι ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης (ω'_s) δεν θα είναι αριθμητικά ίσες και η ακόλουθη διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί :

$$\omega'_s = \cos^{-1} \left[\frac{ab \pm \sqrt{a^2 - b^2 + 1}}{a^2 + 1} \right] \quad (2.13)$$

όπου :

$$a = \frac{\cos\varphi}{\sin A_{zs} \tan\beta} + \frac{\sin\varphi}{\sin A_{zs}} \quad \text{και} \quad b = \tan\delta \left[\frac{\cos\varphi}{\tan A_{zs}} - \frac{\sin\varphi}{\sin A_{zs} \tan\beta} \right]$$



Σχήμα 2.14 Κεκλιμένο επίπεδο που δεν αντικρίζει τον Ισημερινό
(Πηγή : <http://www.itacanet.org> [3])

Η εξίσωση (2.13) δίνει 2 λύσεις εξαιτίας του \pm στον αριθμητή. Η πραγματική τιμή της ωριαίας γωνίας για την κεκλιμένη επιφάνεια τελικά είναι η μικρότερη από τις δύο. Δηλαδή $\omega'_s = \min\{\omega'_{s1}, \omega'_{s2}\}$.

Η γωνία ω_s μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί ο αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας (N) για μια ημέρα, χρησιμοποιώντας την επόμενη εξίσωση (ω_s είναι σε ακτίνια):

$$N = \frac{2\omega_s}{15} \times \frac{180}{\pi} \quad (2.14)$$

Αξίζει να αναφέρουμε ότι σε κάθε έτος έχουμε 4380 ώρες ηλιοφάνειας παντού στον πλανήτη (με εξαίρεση τα δίσεκτα έτη). Με βάση την εξίσωση (2.10) για $\varphi = \pm 66.55^\circ$:

$(\tan \delta - \tan \varphi) \geq 1$ δεν έχουμε δύση ηλίου, δηλαδή 24 ώρες ηλιοφάνεια

$(\tan \delta - \tan \varphi) \leq -1$ δεν έχουμε ανατολή ηλίου, δηλαδή 24 ώρες σκότους.

Γωνία ηλιακού ύψους (α) : η γωνία μεταξύ του ορίζοντα της Γης στο σημείο P και του ηλίου (βλέπε κεφ.2.1.2). Η γωνία ηλιακού ύψους υπολογίζεται ως εξής :

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \omega \cos \varphi \quad (2.15)$$

Γωνία ηλιακού αζιμούθιου (A_z) : η γωνία που σχηματίζει η προβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο με το Βορά (βλέπε κεφ.2.1.2). Υπολογίζεται από την εξής σχέση :

$$\sin A_z = - \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (2.16)$$

2.3.2 Υπολογισμοί συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας

Για πολλές περιοχές του κόσμου, η μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο μπορεί να ανευρεθεί σε βάσεις δεδομένων. Για μια πιο ακριβή ένδειξη του ποσού ενέργειας που πέφτει σε μία κεκλιμένη επιφάνεια, πρέπει να γίνει μια σειρά υπολογισμών. Τα επόμενα δύο κεφάλαια περιέχουν δύο μεθόδους: το κεφάλαιο 2.3.2.1 περιέχει έναν απλοποιημένο υπολογισμό για την εύρεση της συνολικής ημερήσιας ακτινοβολίας που πέφτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια που βλέπει προς τον ισημερινό, ενώ η ενότητα 2.3.2.2 περιγράφει έναν πιο σύνθετο υπολογισμό που υπολογίζει την ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο ώρα με την ώρα μέσα στην ημέρα. Και οι δύο μέθοδοι ακολουθούν την ίδια βασική πορεία.

2.3.2.1 Μέθοδος για επιφάνειες με κλίση προς τον Ισημερινό [4]

Ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός της εξωγήινης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Υπολογίζουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου (I_0) στα όρια της ατμόσφαιρας γης :

$$I_0 = I_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365,25} \right) \right] \quad (2.17)$$

Μονάδες (W/m^2)

Υπολογίζουμε την εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο προς την επιφάνεια της Γης (I_{0h}) στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου :

$$I_{0h} = I_0 \times \cos\theta_z = I_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365,25} \right) \right] \cos\theta_z \quad (2.18)$$

όπου :

$$\cos\theta_z = \cos\delta \cos\varphi \cos\omega + \sin\delta \sin\varphi \quad (2.19)$$

Για να βρούμε την ενέργεια της εξωγήινης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα επίπεδο οριζόντιο προς την επιφάνεια της Γης σε μια ολόκληρη ημέρα, πρέπει να ολοκληρώσουμε την εξίσωση (2.18) ως προς το χρόνο μεταξύ ανατολής ηλίου ($\omega = -\omega_s$) και δύσης ($\omega = +\omega_s$). Η προκύπτουσα εξίσωση είναι :

$$H_{0h} = \frac{86400}{\pi} I_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365,25} \right) \right] (\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\varphi \sin\delta) \quad (2.20)$$

Μονάδες (J/m^2)

ή

$$H_{0h} = \frac{24}{\pi} I_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(2\pi \frac{n}{365,25} \right) \right] (\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\varphi \sin\delta) \quad (2.21)$$

Μονάδες (Wh/m^2)

Όπου $\cos\omega_s = -\tan\varphi \tan\delta$

Η μηνιαία μέση ολική ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία προκύπτει ως εξής:

$$\bar{H}_{0h} = \frac{1}{N} \sum_N H_{0h} \quad (2.22)$$

όπου N: Ο αριθμός ημερών του εκάστοτε μήνα.

2. Υπολογισμός του δείκτη αιθριότητας

Ο δείκτης αιθριότητας (K_T) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ακτινοβολίας που φτάνει σε οριζόντιο επίπεδο σε μια τοποθεσία πάνω στην επιφάνεια της Γης και την εξωγήινη ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο πάνω από την τοποθεσία. Έτσι ο δείκτης K_T μας δίνει μια ένδειξη του ποσοστού της ακτινοβολίας του ήλιου που χάνεται στη

σκέδαση και στην απορρόφηση στην ατμόσφαιρα [12]. Χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες τιμές ακτινοβολίας έχουμε :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_{0h}} \quad (2.23)$$

όπου :

\bar{H} : η μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης

\bar{H}_{0h} : η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Οι τιμές του δείκτη αιθριότητας που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο έχουν ισχύ μόνο αν $0,3 \leq K_T \leq 0,8$.

Ο δείκτης K_T μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας σε σχέση με την ολική ακτινοβολία για μία οριζόντια επιφάνεια:

$$\bar{H}_d = \bar{H} \times (1 - 1,13\bar{K}_T) \quad (2.24)$$

όπου \bar{H}_d είναι η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή διάχυτης ακτινοβολίας.

Η μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ακτινοβολία προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ ολικής και διάχυτης. Θεωρούμε ότι μηδενικό ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας φτάνει στην οριζόντια επιφάνεια. Έτσι έχουμε :

$$\bar{H} = \bar{H}_d + \bar{H}_b \quad \leftrightarrow \quad \bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (2.25)$$

3. Υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Για κεκλιμένο επίπεδο, υπό γωνία β σε σχέση με το οριζόντιο, ορίζουμε το δείκτη R_B ως εξής:

$$R_B = \frac{\text{Direct Radiation on a tilted surface}}{\text{Direct Radiation on horizontal surface}} = \frac{\bar{B}(\beta)}{\bar{B}} = \frac{\bar{H}_0}{\bar{H}_{0h}}$$

Και από τις εξισώσεις (2.20) και (2.21) έχουμε :

$$R_B = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \sin\omega'_s + \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\varphi \sin\delta} \quad (2.26)$$

Λόγω της κλίσης β του επιπέδου αντικαταστήσαμε το γεωγραφικό πλάτος φ με $(\varphi - \beta)$ (βλέπε σχέση 2.12 και σχήμα 2.14).

Άρα $\bar{H}_b(\beta) = R_B \times \bar{H}_b$ (σε Wh/m^2) ή (J/m^2) .

4. Υπολογισμός της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια [13]

Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο υπολογίστηκε με την εξίσωση (2.24). Η τιμή αυτή με τη σειρά της χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η διάχυτη ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια.

Η ακτινοβολία που διαχέεται σε μια οριζόντια επιφάνεια υπολογίστηκε με την εξίσωση (2.21), η τιμή αυτή με τη σειρά της χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί την ακτινοβολία που διαχέεται σε μία επιφάνεια υπό κλίση από την οριζόντια. Για το σκοπό αυτό, αντίστοιχα με την άμεση ακτινοβολία, ορίζεται ο δείκτης R_D ως ο λόγος:

$$R_B = \frac{\text{Diffused Radiation on a tilted surface}}{\text{Diffused Radiation on horizontal surface}} = \frac{\bar{H}_d(\beta)}{\bar{H}_d} \leftrightarrow$$

$$R_B = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta) \quad (2.27)$$

Έτσι τελικά $\bar{H}_d(\beta) = R_B \times \bar{H}_d$ (σε Wh/m²) ή (J/m²).

5. Υπολογισμός της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Υποθέσαμε ότι δεν υπάρχει ανακλώμενη ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο (βλέπε 3. Υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια), άρα για να υπολογιστεί η μέση μηνιαία ημερήσια ανακλώμενη ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια (\bar{A}) πολλαπλασιάζουμε την ολική ακτινοβολία (\bar{H}) με ένα συντελεστή μετατροπής:

$$R_A = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)\rho \quad (2.28)$$

όπου ρ είναι η ανακλαστικότητα του περιβάλλοντος εδάφους.

Και έτσι $\bar{A}(\beta) = R_A \times \bar{H} = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)\rho\bar{H}$ (σε Wh/m²) ή (J/m²).

Από την παραπάνω σχέση γίνεται φανερό ότι για $\beta=0$, δηλαδή για οριζόντιο επίπεδο και όχι κεκλιμένο, $\bar{A}(0) = 0$. Αυτό σημαίνει ότι η ανακλώμενη ακτινοβολία δεν συνεισφέρει στην ολική.

Ακολουθεί πίνακας με ενδεικτικές τιμές ανακλαστικότητας για τους συνηθέστερους τύπους εδάφους που συναντάμε [19].

Είδος Επιφάνειας	Ανακλαστικότητα	Είδος Επιφάνειας	Ανακλαστικότητα
Σκουρόχρωμο χώμα	0,1	Τσιμέντο	0,3
Νερό	0,1	Άμμος	0,4
Άσφαλτος	0,15	«Παλιό» Χιόνι	0,58
Γρασίδι	0,205	Φρέσκο Χιόνι	0,8

Πίνακας 2.1. Εδάφη και συντελεστής ανακλαστικότητας

6. Υπολογισμός της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Στο τελευταίο βήμα η άμεση, η διάχυτη και η ανακλώμενη ακτινοβολία προστίθενται για να βρούμε τη μηνιαία μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο. Έτσι έχουμε:

$$\bar{H}(\beta) = \bar{H}_b(\beta) + \bar{H}_D(\beta) + \bar{A}(\beta) \quad (2.29)$$

2.3.2.2 Ωριαία μέθοδος για κεκλιμένες επιφάνειες προς οποιαδήποτε κατεύθυνση

1. Υπολογισμός ωριαίων τιμών ακτινοβολίας

Αρχικά μέσω της σχέσης (2.21) υπολογίζουμε τη μηνιαία μέση ημερήσια τιμή ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (\bar{H}_{0H}). Στη συνέχεια υπολογίζουμε το δείκτη αιθριότητας K_T από τη σχέση (2.23), με τον περιορισμό $0,3 \leq K_T \leq 0,8$ να ισχύει και πάλι. Ωστόσο σε αυτή τη μέθοδο η σχέση (2.24) αντικαθίσταται με τις παρακάτω:

- Για $\omega_s \leq 81,4^\circ$ ($\omega_s \leq 1,4208$ rad) έχουμε

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad (2.30\alpha)$$

- Για $\omega_s \geq 81,4^\circ$ ($\omega_s \geq 1,4208$ rad) έχουμε

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3 \quad (2.30\beta)$$

Το δεξί μέλος των εξισώσεων (2.30α) και (2.30β) λέγεται και Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Διάχυσης \bar{K}_d . Αν ο δείκτης αιθριότητας \bar{K}_T βρίσκεται εκτός των παραπάνω ορίων ($0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$), τότε ο δείκτης \bar{K}_d παίρνει σταθερές τιμές. Πιο συγκεκριμένα, αν $\bar{K}_T < 0,3$ τότε $\bar{K}_d = 0,98$, ενώ αν $\bar{K}_T > 0,8$ τότε $\bar{K}_d = 0,16$.

Οι μέσες ημερήσιες τιμές ακτινοβολίας για κάθε μήνα κατανέμονται σε ωριαίες τιμές, χρησιμοποιώντας τον λόγο r_t :

$$r_t = \frac{\text{ωριαία ολική ακτινοβολία}}{\text{ημερήσια ολική ακτινοβολία}}$$

Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί των ωριαίων γωνιών (ω_s) θα γίνονται για το μέσο της ώρας (π.χ. 11: 00-12: 00).

Έτσι τελικά έχουμε:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (2.31)$$

Όπου

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047)$$

(οι γωνίες σε radians στις παραπάνω σχέσεις)

Η ολική ακτινοβολία για κάθε ώρα (\dot{I}) της «μέσης ημέρας» του κάθε μήνα υπολογίζεται στη συνέχεια:

$$\dot{I} = r_t \bar{H} \quad (2.32)$$

Αντίστοιχα εργαζόμαστε για τη συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας :

$$r_d = \frac{\text{ωριαία διάχυτη ακτινοβολία}}{\text{ημερήσια συνολική διάχυτη ακτινοβολία}}$$

έτσι ώστε :

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{(\cos\omega - \cos\omega_s)}{(\sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s)} \quad (2.33)$$

Η ωριαία διάχυτη ακτινοβολία για τη «μέση ημέρα» κάθε μήνα υπολογίζεται στη συνέχεια :

$$\dot{I}_d = r_d \bar{H}_d \quad (2.34)$$

Τέλος, η συνιστώσα της ωριαίας άμεσης ακτινοβολίας υπολογίζεται από τη διαφορά των δύο. Δηλαδή :

$$\dot{I}_b = \dot{I} - \dot{I}_d \quad (2.35)$$

2. Υπολογισμός ολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ωριαία ολική ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ($\dot{I}(\beta)$) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια εξίσωση παρόμοια προς την εξίσωση (2.29) :

$$\dot{I}(\beta) = \dot{I}_b \dot{R}_b + \dot{I}_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \rho \dot{I} \quad (2.36)$$

$$\text{Όπου } \dot{R}_b = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_z}$$

θ_i : η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο (βλέπε σχήμα 2.14)

θ_z : η γωνία ηλιακού Αζιμούθιου (βλέπε σχέση 2.19).

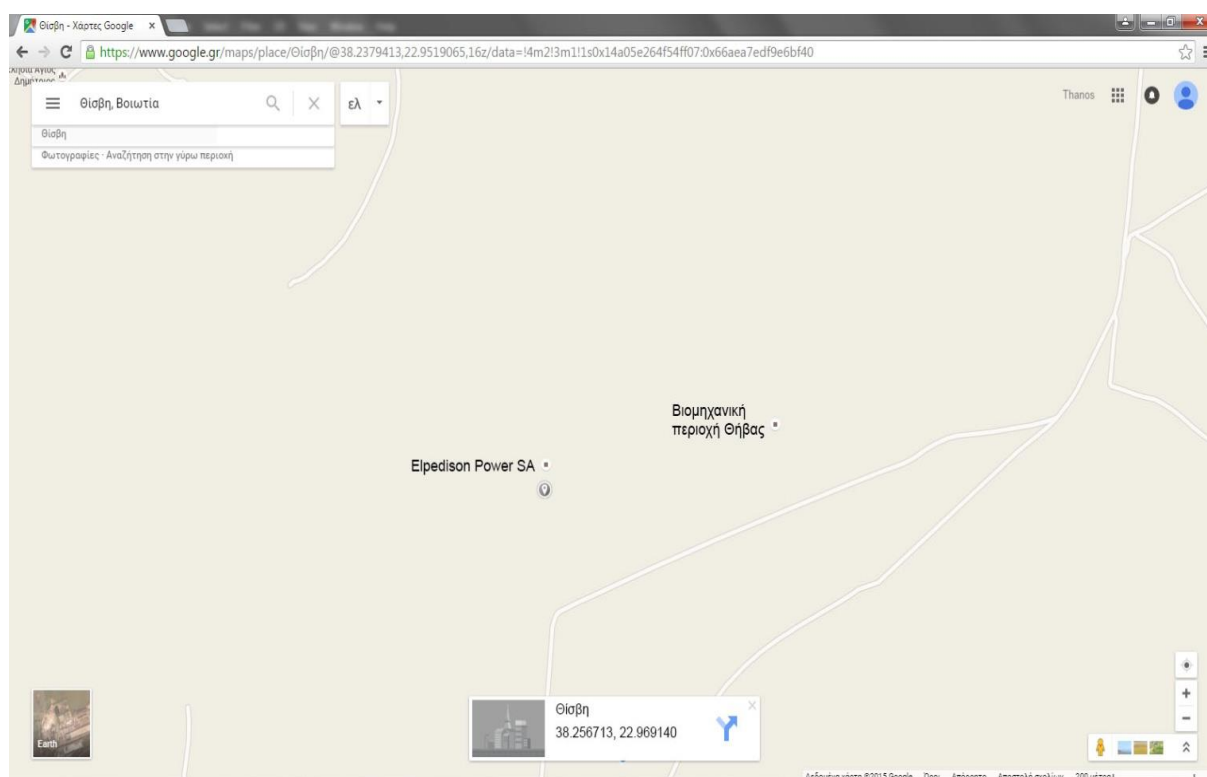
2.4 Υπολογισμός Ηλιακής Ακτινοβολίας για την περιοχή της Θίσβης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εφαρμόσουμε τη μεθοδολογία που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2.3 για να υπολογίσουμε το ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής. Η μεθοδολογία παρουσιάζεται βήμα βήμα με συμπληρωματικά σχόλια όπου κρίνεται απαραίτητο. Η τοποθεσία που μας ενδιαφέρει είναι η Θίσβη, που ανήκει στο νομό Βοιωτίας στη βιομηχανική περιοχή της Θήβας.

Προτού προχωρήσουμε στους αριθμητικούς υπολογισμούς για το ηλιακό δυναμικό χρειαζόμαστε τις γεωγραφικές συντεταγμένες της υπό εξέταση περιοχής. Ένας απλός τρόπος εύρεσης των συντεταγμένων είναι με την εφαρμογή «googlemaps», όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15. Όπως βλέπουμε οι συντεταγμένες της περιοχής είναι :

Γεωγραφικό Πλάτος (φ) = $38^{\circ} 15' 26,99'' E = 38,257^{\circ} = 0,66771 \text{ rad}$

Γεωγραφικό Μήκος (L) = $22^{\circ} 58' 9'' E = 22,969^{\circ} = 0.40088 \text{ rad}$



Σχήμα 2.15. Χρήση «googlemaps» για εύρεση γεωγραφικών συν/νων

1^ο βήμα : Υπολογισμός της Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Εξωγήινης Ακτινοβολίας [16]

Αρχικά για κάθε ημέρα του έτους υπολογίζεται η γωνία απόκλισης (δ) από τη σχέση (2.8), ο αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας (N) από τη σχέση (2.14) και η ωριαία γωνία ανατολής και δύσης ηλίου ω_s από τη σχέση (2.11). Κατόπιν υπολογίζεται η ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία από τη σχέση (2.21) για κάθε ημέρα του χρόνου. Αθροίζοντας τις τιμές της ημερήσιας εξωγήινης ακτινοβολίας για κάθε μήνα προκύπτει η συνολική μηνιαία εξωγήινη ακτινοβολία. Τέλος, διαιρώντας την τιμή της συνολικής μηνιαίας ακτινοβολίας με τον αριθμό ημερών του κάθε μήνα προκύπτει η τιμή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας \bar{H}_0 για κάθε μήνα, σχέση (2.22) .

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον Ιανουάριο, ενώ τα φύλλα υπολογισμών για τους υπόλοιπους μήνες παρατίθενται στο Παράρτημα [1].

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ								
n	Ημερομηνία	γωνία δ°	δ (rad)	γωνία ω_s°	ω_s (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία	Ημερήσια Εξωγήινη	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)
						H_o (daily) (J/m^2)	Ακτινοβολία H_o (daily) (kWh/m^2)	
1	1-Ιαν	-23.012	-0.4016	70.433	1.229	14892140.21	4.1367	9.391
2	2-Ιαν	-22.931	-0.4002	70.513	1.231	14946345.97	4.1518	9.402
3	3-Ιαν	-22.843	-0.3987	70.600	1.232	15004992.2	4.1681	9.413
4	4-Ιαν	-22.748	-0.3970	70.693	1.234	15068065.1	4.1856	9.426
5	5-Ιαν	-22.647	-0.3953	70.793	1.236	15135549.56	4.2043	9.439
6	6-Ιαν	-22.538	-0.3934	70.899	1.237	15207429.16	4.2243	9.453
7	7-Ιαν	-22.424	-0.3914	71.011	1.239	15283686.13	4.2455	9.468
8	8-Ιαν	-22.302	-0.3892	71.129	1.241	15364301.34	4.2679	9.484
9	9-Ιαν	-22.174	-0.3870	71.254	1.244	15449254.26	4.2915	9.500
10	10-Ιαν	-22.040	-0.3847	71.384	1.246	15538522.93	4.3163	9.518
11	11-Ιαν	-21.898	-0.3822	71.521	1.248	15632083.95	4.3422	9.536
12	12-Ιαν	-21.751	-0.3796	71.663	1.251	15729912.4	4.3694	9.555
13	13-Ιαν	-21.597	-0.3769	71.811	1.253	15831981.88	4.3978	9.575
14	14-Ιαν	-21.436	-0.3741	71.965	1.256	15938264.44	4.4273	9.595
15	15-Ιαν	-21.269	-0.3712	72.124	1.259	16048730.55	4.4580	9.617
16	16-Ιαν	-21.096	-0.3682	72.289	1.262	16163349.08	4.4898	9.639
17	17-Ιαν	-20.917	-0.3651	72.460	1.265	16282087.31	4.5228	9.661
18	18-Ιαν	-20.731	-0.3618	72.635	1.268	16404910.83	4.5569	9.685
19	19-Ιαν	-20.540	-0.3585	72.816	1.271	16531783.58	4.5922	9.709
20	20-Ιαν	-20.342	-0.3550	73.002	1.274	16662667.81	4.6285	9.734
21	21-Ιαν	-20.138	-0.3515	73.193	1.277	16797524.04	4.6660	9.759
22	22-Ιαν	-19.928	-0.3478	73.388	1.281	16936311.06	4.7045	9.785
23	23-Ιαν	-19.713	-0.3440	73.589	1.284	17078985.92	4.7442	9.812
24	24-Ιαν	-19.491	-0.3402	73.794	1.288	17225503.89	4.7849	9.839
25	25-Ιαν	-19.264	-0.3362	74.003	1.292	17375818.48	4.8266	9.867
26	26-Ιαν	-19.031	-0.3321	74.218	1.295	17529881.4	4.8694	9.896
27	27-Ιαν	-18.792	-0.3280	74.436	1.299	17687642.55	4.9132	9.925
28	28-Ιαν	-18.548	-0.3237	74.659	1.303	17849050.05	4.9581	9.954
29	29-Ιαν	-18.298	-0.3194	74.885	1.307	18014050.22	5.0039	9.985
30	30-Ιαν	-18.043	-0.3149	75.116	1.311	18182587.55	5.0507	10.015
31	31-Ιαν	-17.782	-0.3104	75.351	1.315	18354604.74	5.0985	10.047
		-20.847	-0.3639	72.5040	1.2654			9.66721
				Συνολική Εξωγήινη	Μηνιαία Ακτινοβολία	506148018.6 ΣΗο	140.597 ΣΗο	
				Μέση Εξωγήινη	Μηνιαία Ακτινοβολία	16327355.44 \bar{H}_o (monthly)	4.535376511 \bar{H}_o (monthly)	

Πίνακας 2.2

2^ο βήμα : Υπολογισμός της Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ολικής Ακτινοβολίας

Για αυτό το βήμα θα χρειαστούμε μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην υπό εξέταση περιοχή. Τις μετρήσεις αυτές τις βρίσκουμε είτε από βάση δεδομένων στο διαδίκτυο είτε ακόμα καλύτερα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, κατόπιν επικοινωνίας με την EMY, πήραμε τις μετρήσεις για τη μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία του πλησιέστερου σταθμού στην περιοχή της Θίσβης. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται στην περιοχή του Αλιάρτου σε πολύ μικρή χιλιομετρική απόσταση.

Αφού επεξεργαστήκαμε τις μετρήσεις της EMY, με την ίδια λογική που ακολουθήσαμε στο 1^ο βήμα, καταλήξαμε στις τιμές της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας \bar{H} για κάθε μήνα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.3.

	Συνολική Μέση Μηνιαία Ολική Ακτινοβολία ΣΗ (kWh/m ²)												
ΕΤΟΣ/ΜΗΝΑΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Συν.Ετήσια
1977	58.36	87.68	133.13	163.57	197.84	217.02	214.25	198.59	125.76	103.76	61.11	42.22	1603.29
1978	44.23	76.84	133.84	164.31	215.54	240.55	231.69	210.58	155.04	90.60	48.83	51.69	1663.74
1979	59.72	57.97	141.44	162.71	193.81	229.37	231.53	201.64	162.81	82.19	62.88	50.65	1636.73
1980	51.23	57.40	113.69	170.52	208.07	214.19	229.48	198.48	151.03	97.74	72.78	55.58	1620.17
1981	57.41	76.25	138.77	180.59	223.34	232.35	233.50	200.81	156.9	103.76	79.68	57.30	1740.67
1982	49.74	60.12	121.16	155.19	212.63	232.46	227.12	204.03	166.46	107.52	69.37	47.64	1653.43
1983	72.28	80.43	126.36	181.46	221.91	211.06	212.8	200.67	156.57	94.85	36.90	44.47	1639.76
1984	65.77	55.98	100.12	139.49	213.87	222.08	232.23	194.95	158.86	103.12	47.94	41.59	1576.01
1985	53.84	76.15	85.93	168.64	201.79	218.47	226.70	208.86	159.48	103.764	63.20	45.23	1612.03
1986	61.94	60.73	82.04	176.56	195.22	203.21	210.95	186.47	134.83	81.58	55.99	49.46	1498.99
1987	46.86	52.31	112.63	151.46	192.30	207.94	200.64	200.51	140.26	72.92	48.46	38.18	1464.45
ΣΗ (monthly)	56.49	67.44	117.19	164.96	206.94	220.79	222.81	200.51	151.64	103.76	58.83	47.64	1618.99
Η̄ (monthly)	1.82	2.176	3.780	5.321	6.675	7.360	7.187	6.468	5.05	3.347	1.961	1.537	

Πίνακας 2.3. Μηνιαία Μέση Ημερήσια Ολική Ακτινοβολία

3^ο βήμα : Υπολογισμός του Μηνιαίου Μέσου Ημερήσιου Δείκτη Αιθριότητας [13]

Ο μηνιαίος μέσος ημερήσιος δείκτης αιθριότητας υπολογίζεται από τη σχέση (2.23). Στον επόμενο πίνακα (2.4) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά αποτελέσματα, ενώ τα αναλυτικά φύλλα υπολογισμών παρατίθενται στο Παράρτημα.

ΜΗΝΑΣ	#Ημερών	Συνολική Μηνιαία Εξωγήινη Ακτινοβολία ΣΗ ₀ (kwh/m ²)	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία Η̄ ₀ (kwh/m ²)	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Ολική Ακτινοβολία Η̄(kwh/m ²)	Ηλιακή Γωνία Δύσης ω _s (rad)	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας K _T
ΙΑΝ	31	140.597	4.535	1.822	1.265	0.402
ΦΕΒ	28	165.49	5.910	2.409	1.382	0.408
ΜΑΡ	31	242.915	7.836	3.780	1.538	0.482
ΑΠΡ	30	292.40	9.747	5.499	1.704	0.564
ΜΑΪ	31	342.77	11.057	6.675	1.843	0.604
ΙΟΥΝ	30	347.391	11.580	7.360	1.913	0.636
ΙΟΥΛ	31	350.11	11.294	7.187	1.880	0.636
ΑΥΓ	31	316.39	10.206	6.468	1.759	0.634
ΣΕΠ	30	254.11	8.470	5.055	1.598	0.597
ΟΚΤ	31	200.50	6.468	3.347	1.433	0.518
ΝΟΕ	30	145.02	4.834	1.961	1.295	0.406
ΔΕΚ	31	127.57	4.115	1.537	1.228	0.373

Πίνακας 2.4. Δείκτης Ημερήσιου Δείκτη Αιθριότητας K_T

**4^ο βήμα : Υπολογισμός Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Διάχυτης Ακτινοβολίας Οριζοντίου
Επιπέδου**

Για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας θα χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις (2.30α) και (2.30β). Αρχικά υπολογίζοντας το Μηνιαίο Μέσο Ημερήσιο Δείκτη Διάχυσης \bar{K}_d και στη συνέχεια τη διάχυτη ακτινοβολία, αφού $\bar{H}_d = \bar{K}_d \times \bar{H}$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5.

**5^ο βήμα : Υπολογισμός Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Άμεσης Ακτινοβολίας Οριζοντίου
Επιπέδου**

Η μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ακτινοβολία προκύπτει ως διαφορά μεταξύ ολικής και διάχυτης από την σχέση (2.25). Στον επόμενο πίνακα (2.5) παρουσιάζονται συγκεντρωμένα οι δείκτες αιθριότητας καθώς και οι συνιστώσες της μηνιαίας μέσης ηλιακής ακτινοβολίας στη Θίσβη.

ΜΗΝΑΣ	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Ολική Ακτινοβολία $\bar{H}(\text{kwh/m}^2)$	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Αιθριότητας \bar{K}_T	Μηνιαίος Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Διάχυσης \bar{K}_d	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Διάχυτη Ακτινοβολία $\bar{H}_d(\text{kWh/m}^2)$	Μηνιαία Μέση Ημερήσια Άμεση Ακτινοβολία $\bar{H}_b(\text{kwh/m}^2)$
ΙΑΝ	1.822	0.402	0.498	0.908	0.914
ΦΕΒ	2.409	0.408	0.491	1.183	1.225
ΜΑΡ	3.780	0.482	0.446	1.687	2.093
ΑΠΡ	5.499	0.564	0.370	2.034	3.465
ΜΑΪ	6.675	0.604	0.335	2.236	4.440
ΙΟΥΝ	7.360	0.636	0.307	2.260	5.099
ΙΟΥΛ	7.187	0.636	0.306	2.202	4.985
ΑΥΓ	6.468	0.634	0.309	1.997	4.471
ΣΕΠ	5.055	0.597	0.341	1.724	3.331
ΟΚΤ	3.347	0.518	0.412	1.381	1.967
ΝΟΕ	1.961	0.406	0.494	0.968	0.993
ΔΕΚ	1.537	0.373	0.534	0.821	0.715

Πίνακας 2.5. Συνιστώσες Μηνιαίας Μέσης Ημερήσιας Ακτινοβολίας για τη Θίσβη

Υπολογισμός ωριαίων τιμών ακτινοβολίας

Οι υπολογισμοί των ωριαίων τιμών ακτινοβολίας για κάθε ημέρα του έτους απαιτεί εκτενείς υπολογισμούς και είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Αυτό που συνηθίζεται είναι να υπολογίζονται οι τιμές για τη διάμεσο κάθε μήνα. Κατόπιν γίνεται η θεώρηση ότι κάθε μήνας αποτελείται από πανομοιότυπες ημέρες, δηλαδή κάθε ημέρα του μήνα έχει τις ίδιες τιμές συνολικής, διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας και με βάση αυτές να υπολογίζονται οι τιμές τις ωριαίας ακτινοβολίας. Στη διπλωματική αυτή ακολουθήσαμε μια μέση λύση. Δεν έγινε η θεώρηση των πανομοιότυπων ημερών για κάθε μήνα, αλλά υπολογίσαμε τις μέσες μηνιαίες τιμές ως μέσο όρο των τιμών ακτινοβολίας για κάθε μήνα.

Ο υπολογισμός των ωριαίων τιμών της ακτινοβολίας όμως θα γίνει για το μέσο όρο τιμών κάθε μήνα. Έτσι θα αποφύγουμε μεγάλο όγκο υπολογισμών αλλά ταυτόχρονα θα έχουμε αρκετά καλή προσέγγιση στους υπολογισμούς μας. Σκοπός είναι να αποφύγουμε τυχόν υπερδιαστασιολογήσεις σε ότι αφορά την απαιτούμενη έκταση του πεδίου ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή συγκεκριμένης ισχύος.

Οι ώρες που εξετάζουμε την ηλιακή ακτινοβολία είναι από τις 4:00 έως τις 20:00. Φτιάχνουμε μια στήλη και ανά διάστημα μιας ώρας υπολογίζουμε την ηλιακή ωριαία γωνία (ω) ξεκινώντας από το ηλιακό μεσημέρι όπου θα έχουμε $\omega=0^\circ$ με βήμα 15° την ώρα. Επειδή οι υπολογισμοί γίνονται στο μισό της ώρας θα ξεκινήσουμε στο διάστημα 11:00-12:00, δηλαδή για την ώρα 11:30, με $\omega=-7,5^\circ$ (αφαιρώντας μισό βήμα, δηλαδή $-15/2$). Συνεχίζουμε τη συμπλήρωση των κελιών προς τα πάνω, μέχρι να φτάσουμε στο διάστημα 04:00-05:00, αφαιρώντας 15° . Αντίθετα εργαζόμαστε για τη συμπλήρωση των κελιών προς τα κάτω, μέχρι να φτάσουμε στο διάστημα 19:00-20:00, προσθέτοντας 15° .

Για τον υπολογισμό των ωριαίων τιμών ακτινοβολίας θα χρειαστούμε τα στοιχεία που συγκεντρώσαμε στον παρακάτω πίνακα.

Μήνας	# Ημερών	Γωνία ω_s (rad)	Γωνία ω_s (μοίρες)	Διάρκεια Ημέρας N (ώρες)
ΙΑΝ	31	1,2654	72,5	9,98
ΦΕΒ	28	1,3823	79,2	10,56
ΜΑΡ	31	1,5377	88,11	11,75
ΑΠΡ	30	1,7036	97,61	13,01
ΜΑΪ	31	1,8432	105,61	14,08
ΙΟΥΝ	30	1,9135	109,63	14,62
ΙΟΥΛ	31	1,8803	107,74	14,36
ΑΥΓ	31	1,7589	100,78	13,44
ΣΕΠ	30	1,5984	91,58	12,21
ΟΚΤ	31	1,4329	82,1	10,95
ΝΟΕ	30	1,2945	74,17	9,89
ΔΕΚ	31	1,2278	70,35	9,38

Πίνακας 2.6

6^ο βήμα : Υπολογισμός συνιστωσών Ωριαίας Ηλιακής Ακτινοβολίας Οριζοντίου Επιπέδου [15]

Σε αυτό το βήμα, αφού έχουμε υπολογίσει τις τιμές της ωριαίας γωνίας, θα χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις (2.19), (2.33), (2.34) για τον υπολογισμό της γωνίας θ_z και των συντελεστών r_t και r_d . Επειδή εργαζόμαστε για τη μέση μέρα κάθε μήνα η τιμή του n θα αντιστοιχεί στη διάμεσο κάθε μήνα.

Κατόπιν υπολογίζουμε τις τιμές της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από τη σχέση (2.32) και τις τιμές της ωριαίας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από τη σχέση (2.34). Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει ως η διαφορά της ολικής από τη διάχυτη, σχέση (2.35). Οι αρνητικές τιμές μηδενίζονται αφού δεν μεταφράζονται σε αρνητική ακτινοβολία. Έτσι για τον κάθε μήνα θα έχουμε :

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)										DNI	$\cos\theta_z$	
			$\delta = -0.364$												
			\bar{H}	\bar{H}_d	r_t	r_{t^*}	I (kwh/m ²)	r_d	r_{d^*}	I_d (kwh/m ²)	I_b (kwh/m ²)	$I_{b,n}$ (kwh/m ²)			
04:00-05:00	-112.5	-1.963	3.780	1.687	-0.047	0.000	0.000	-0.156	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.501
05:00-06:00	-97.5	-1.702	3.780	1.687	-0.044	0.000	0.000	-0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.316
06:00-07:00	-82.5	-1.440	3.780	1.687	-0.023	0.000	0.000	-0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.125
07:00-08:00	-67.5	-1.178	3.780	1.687	0.014	0.014	0.052	0.019	0.019	0.032	0.020	0.334	0.060	0.060	0.060
08:00-09:00	-52.5	-0.916	3.780	1.687	0.060	0.060	0.228	0.070	0.070	0.119	0.109	0.483	0.226	0.226	0.226
09:00-10:00	-37.5	-0.654	3.780	1.687	0.108	0.108	0.408	0.112	0.112	0.190	0.219	0.604	0.362	0.362	0.362
10:00-11:00	-22.5	-0.393	3.780	1.687	0.147	0.147	0.556	0.142	0.142	0.240	0.316	0.690	0.458	0.458	0.458
11:00-12:00	-7.5	-0.131	3.780	1.687	0.169	0.169	0.638	0.158	0.158	0.266	0.372	0.734	0.507	0.507	0.507
12:00-13:00	7.5	0.131	3.780	1.687	0.169	0.169	0.638	0.158	0.158	0.266	0.372	0.734	0.507	0.507	0.507
13:00-14:00	22.5	0.393	3.780	1.687	0.147	0.147	0.556	0.142	0.142	0.240	0.316	0.690	0.458	0.458	0.458
14:00-15:00	37.5	0.654	3.780	1.687	0.108	0.108	0.408	0.112	0.112	0.190	0.219	0.604	0.362	0.362	0.362
15:00-16:00	52.5	0.916	3.780	1.687	0.060	0.060	0.228	0.070	0.070	0.119	0.109	0.483	0.226	0.226	0.226
16:00-17:00	67.5	1.178	3.780	1.687	0.014	0.014	0.052	0.019	0.019	0.032	0.020	0.334	0.060	0.060	0.060
17:00-18:00	82.5	1.440	3.780	1.687	-0.023	0.000	0.000	-0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.125
18:00-19:00	97.5	1.702	3.780	1.687	-0.044	0.000	0.000	-0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.316
19:00-20:00	112.5	1.963	3.780	1.687	-0.047	0.000	0.000	-0.156	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.501
$\omega_s =$		1.265													
συν/στης $\alpha =$		0.518													
συν/στης $\beta =$		0.558													

Πίνακας 2.7

Στο παράρτημα παρατίθενται οι πίνακες και για τους υπόλοιπους μήνες.

7ο βήμα : Υπολογισμός Ωριαίας Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες

Τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός της ωριαίας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ($I_{b,n}$) σε επίπεδο κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία για τη μέση ημέρα κάθε μήνα. Πρόκειται για την ακτινοβολία DNI (Direct Normal Irradiance) που συγκεντρώνουν οι ηλιακοί συλλέκτες. Η ισχύς της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες $G_{b,n}$ είναι αριθμητικά ίση με την τιμή $I_{b,n}$. Μεταφερόμαστε στην εξίσωση (2.18) και έχουμε :

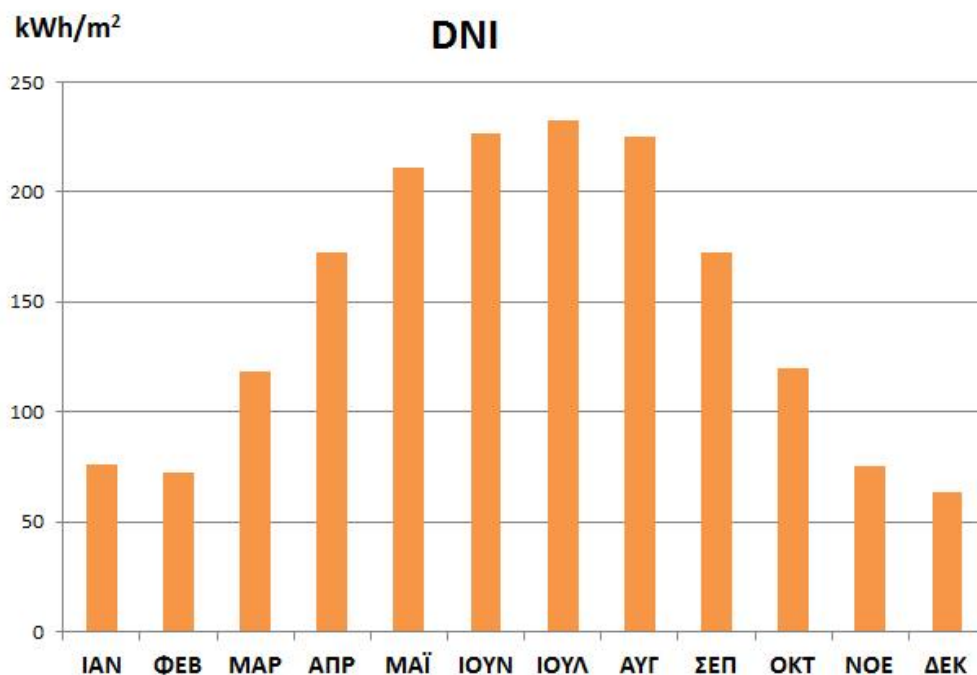
$$I_{b,n} = I_b \times \cos\theta_z$$

Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8 στην επόμενη σελίδα.

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ		
	ΩΡΑ	DNI	
		I_b (kwh/m ²)	$I_{b,n}$ (kwh/m ²)
04:00-05:00	0	0	-0,50118116
05:00-06:00	0	0	-0,31613954
06:00-07:00	0	0	-0,12457036
07:00-08:00	0,0079473	0,131422718	0,060471255
08:00-09:00	0,04600742	0,203235411	0,226375031
09:00-10:00	0,09467043	0,261639858	0,361834898
10:00-11:00	0,13862279	0,302921521	0,457619488
11:00-12:00	0,16447932	0,324288084	0,50720124
12:00-13:00	0,16447932	0,324288084	0,50720124
13:00-14:00	0,13862279	0,302921521	0,457619488
14:00-15:00	0,09467043	0,261639858	0,361834898
15:00-16:00	0,04600742	0,203235411	0,226375031
16:00-17:00	0,0079473	0,131422718	0,060471255
17:00-18:00	0	0	-0,12457036
18:00-19:00	0	0	-0,31613954
19:00-20:00	0	0	-0,50118116

Πίνακας 2.8

Σημείωση: Με κόκκινο έχουν σημειωθεί οι μεγαλύτερες τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για τη μέση ημέρα του μήνα Ιανουαρίου.



Πίνακας 2.9 Διάγραμμα κατανομής DNI κατά τη διάρκεια ενός έτους

2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-1-solar-astronomy/> [Ηλεκτρονικό]
- [2] <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-2-solar-energy-reaching-the-earths-surface/> [Ηλεκτρονικό]
- [3] <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-3-calculating-solar-angles/> [Ηλεκτρονικό]
- [4] <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-4-irradiation-calculations/> [Ηλεκτρονικό]
- [5] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/the-sun> [Ηλεκτρονικό]
- [6] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-outside-earths-atmosphere> [Ηλεκτρονικό]
- [7] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html> [Ηλεκτρονικό]
- [8] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-in-space> [Ηλεκτρονικό]
- [9] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle> [Ηλεκτρονικό]
- [10] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-at-earths-surface> [Ηλεκτρονικό]
- [11] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects> [Ηλεκτρονικό]
- [12] M.E. Herzog, Thesis ,«*Estimation of hourly and monthly average daily insolation on tilted surfaces*», Trinity University, (1985)
- [13] J.M. Santos, J.M. Pinazo, J. Canada. “*Methodology for generating daily clearness index values K_t starting from the monthly average daily value K_t . Determining the daily sequence using stochastic models*”. Renewable Energy 28 (2003) [1523–1544].
- [14] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/suns-position> [Ηλεκτρονικό]
- [15] D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie. «*Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation*». Solar Energy Vol.28, No.4, (1982), [293-302]
- [16] Δ.Δάφλος, Μεταπτυχιακή Εργασία, «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Σχεδιασμός Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης για την υβριδοποίηση του ΑΗΣ της περιοχής Σορωνής Ρόδου*», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2012)
- [17] Zekai.Sen, «*Solar energy fundamentals and modeling techniques : atmosphere, environment, climate change and renewable energy*», (2008)
- [18] S.Kalogirou «*Solar energy engineering : processes and systems*», Elsevier Inc. 2009

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (CSP) χρησιμοποιούν συνδυασμούς από κάτοπτρα ή φακούς για τη συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή χρήσιμων μορφών ενέργειας, όπως θερμότητα, ηλεκτρισμό ή καύσιμα. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV), δεν είναι σε θέση να αξιοποιήσουν την ακτινοβολία που διαχέεται από τα σύννεφα, τη σκόνη ή άλλους παράγοντες. Αυτό τα κάνει να ταιριάζουν καλύτερα σε περιοχές με υψηλό ποσοστό αίθριων ημερών και σε περιοχές που δεν έχουν αιθαλομίχλη ή σκόνη.[1]

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα εμπορικά στην τάξη του επιπέδου ανάπτυξης είναι:

- Συλλέκτες παραβολικής σκάφης
- Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος
- Συλλέκτες Fresnel
- Παραβολικοί Δίσκοι

Κάθε τεχνολογία διαθέτει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και σε ορισμένες περιπτώσεις καλύπτει συγκεκριμένα τμήματα της αγοράς. Αυτή τη στιγμή υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη όλων των τύπων CSP συστημάτων.

Βασικές αρχές λειτουργίας [1]

Η δομή ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος (CSP) παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 3.1. Όλα τα συστήματα αρχίζουν με ένα συγκεντρωτή. Υπάρχει μια σαφής διάκριση μεταξύ των γραμμικών συγκεντρωτών, που πετυχαίνουν βαθμούς συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 50-100 φορές, και τους εστιακούς συγκεντρωτές με βαθμούς συγκέντρωσης 500 έως και αρκετές χιλιάδες.

Κατόπιν παρεμβάλλεται ένας δέκτης που μετατρέπει τη συμπυκνωμένη ακτινοβολία σε ενέργεια άλλης μορφής, συνήθως σε θερμική ενέργεια. Το είδος του δέκτη ποικίλει ανάλογα με την τεχνολογία. Για παράδειγμα τα συστήματα συλλεκτών παραβολικής σκάφης χρησιμοποιούν ως δέκτες χαλύβδινους σωλήνες χάλυβα που καλύπτονται εξωτερικά από ένα γυάλινο σωλήνα, δημιουργώντας κενό ώστε να μειωθούν οι απώλειες από θερμότητα συναγωγής. Οι ηλιακοί πύργοι χρησιμοποιούν εξωτερικό δέκτη πάνελ ή αλλιώς ο δέκτης θα βρίσκεται τοποθετημένος μέσα σε μια κοιλότητα.

Μετά το δέκτη υπάρχουν δύο επιλογές : είτε η ενέργεια μετατρέπεται στην τελική επιθυμητή μορφή ή μεταφέρεται σε άλλη θέση για την τελική μετατροπή. Είναι πιθανό ο κύκλος ισχύος να είναι ενσωματωμένος στο εσωτερικό της μονάδας του δέκτη (όπως συμβαίνει για παράδειγμα στους κινητήρες Stirling). Εάν όμως η μετατροπή ενέργειας πραγματοποιείται εκτός δέκτη, τότε η συλλεγόμενη θερμική ενέργεια μεταφέρεται σε ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid-HTF). Στα συστήματα ηλιακού πύργου το τηγμένο άλας αποτελεί μια πρωτοπόρα επιλογή και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να αξιοποιηθεί και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας.

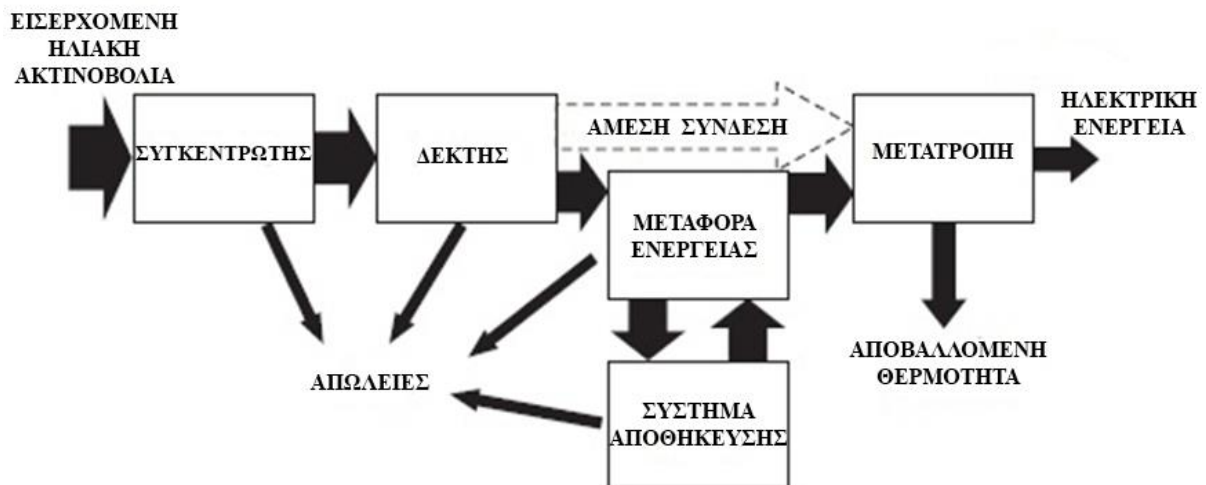
Η επιλογή της διαδρομής μεταφοράς θερμότητας μας παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage-TES) σε ενδιάμεση θερμική μορφή προτού γίνει η τελική μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τρέχουσα κυρίαρχη

προσέγγιση είναι η χρησιμοποίηση τηγμένου άλατος σε μονωμένες δεξαμενές υψηλής θερμοκρασίας.

Το τελικό στάδιο σε ένα σύστημα CSP είναι παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συνηθέστερες επιλογές εδώ είναι οι ατμοστρόβιλοι, οι κινητήρες Stirling, ο οργανικός κύκλος Rankine, ο κύκλος Brayton και τα φωτοβολταϊκά.

Η αποτελεσματικότητα του κάθε υποσυστήματος μπορεί να ορίζεται ως ο λόγος της εισερχόμενης ενέργειας προς την εξερχόμενη. Η συνολική απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια για ένα σύστημα CSP (η_{system}) είναι το γινόμενο των διαφόρων αποδόσεων του υποσυστήματος (συγκεντρωτή/οπτική, δέκτη, μεταφοράς, αποθήκευσης και μετατροπής):

$$\eta_{\text{system}} = \eta_{\text{optical}} \times \eta_{\text{receiver}} \times \eta_{\text{transport}} \times \eta_{\text{storage}} \times \eta_{\text{conversion}}$$



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής για σταθμό CSP [Πηγή: K. Lovegrove, W. Stein. «Concentrating Solar Power Technology – Principles, developments and applications», 2012)

Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας για συστήματα CSP

Η επιλογή μιας τοποθεσίας που πληροί τις τεχνικές απαιτήσεις για την εφαρμογή ενός συστήματος CSP απαιτεί εις βάθος μελέτη ορισμένων βασικών παραμέτρων. Οι σημαντικότερες παράμετροι επισημαίνονται στο παρόν κεφάλαιο και είναι : το ηλιακό δυναμικό, οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι, η δομή του εδάφους και η γεωλογία της περιοχής, η διαθεσιμότητα της γης, η τοπογραφία της περιοχής και η ενεργειακή ζήτηση.

1. Αξιολόγηση του ηλιακού δυναμικού

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σταθμό CSP είναι περίπου ανάλογη προς την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής και ως εκ τούτου αντιστρόφως ανάλογη με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Άρα κρίνεται απαραίτητη η διεκπεραίωση ηλιακής μελέτης για την τοποθεσία προτού γίνει κάποια επένδυση σε σύστημα CSP [3].

Για να γίνει αντιληπτή η σημαντικότητα του ηλιακού δυναμικού αναφέρουμε σαν παράδειγμα ότι ενδεχόμενο λάθος της τάξεως του 1% στον υπολογισμό του ηλιακού δυναμικού μπορεί να μεταβάλει τα ετήσια έσοδα ενός σταθμού CSP ισχύος 50 MW στην Ισπανία κατά 310.000 ευρώ (δηλαδή λάθος 0,20€/kWh). [4]

Η Άμεση Κανονική Ακτινοβολία (DNI), αποτελεί μεταξύ 50% και 90% της παγκόσμιας ακτινοβολίας και ποικίλει πολύ σε χρόνο και χώρο. Πράγματι, η ετήσια DNI μπορεί να παρουσιάσει διακύμανση έως και 30% από έτος σε έτος [5]. Για να θεωρούνται τα στοιχεία μας αξιόπιστα θα πρέπει να έχουμε μετρήσεις κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πέντε ή δέκα ετών, προκειμένου να μειωθούν τα μακροπρόθεσμα σφάλματα κατά μέσο όρο σε λιγότερο από 10% ή 5% αντίστοιχα [6]. Συνοψίζοντας, η ακτινοβολία είναι κριτήριο ζωτικής σημασίας για την επιλογή υποψήφιας τοποθεσία για ένα έργο CSP.

2. Διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων και ψύξης

Όταν η τεχνολογία CSP χρησιμοποιεί τον κύκλο Rankine, το νερό είναι απαραίτητο για την ψύξη, εκτός εάν εφαρμοστεί τεχνολογία ξηρής ψύξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ξηρή ψύξη γίνεται εις βάρος της απόδοσης των εγκαταστάσεων και του κόστους των επενδύσεων. Επίσης αυξάνει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά 10% [7].

Τα αποτελέσματα από συγκριτικές μελέτες μεταξύ του υγρού και ξηρού κύκλου Rankine με απόρριψη θερμότητας δείχνουν ότι τα ξηρά συστήματα απόρριψης θερμότητας παρέχουν 91-96% της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας από τα αντίστοιχα υγρά. Ακόμα εμφανίζουν ετήσιες αποδόσεις μετατροπής ενέργειας (ηλιακή σε ηλεκτρική) χαμηλότερες κατά 0,5-0,7%. Σημειώνεται ωστόσο ότι η ετήσια κατανάλωση νερού για ένα ξηρό σύστημα είναι περίπου το 8% ενός αντίστοιχου υγρού. Η ελάχιστη κατανάλωση νερού εμφανίζεται σε κύκλους φυσικού αερίου, αλλά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση νερό εξακολουθεί να απαιτείται για τον καθαρισμό καθρεπτών από εναποθέσεις σκόνης.[7]

Άρα η εκτίμηση των υδατικών πόρων μιας υποψήφιας τοποθεσίας για ένα σταθμό CSP είναι υψίστης σημασίας για τη λήψη απόφασης σχετικά με τον τρόπο ψύξης. Ακόμα περισσότερο σε ερημικές περιοχές, όπου οι βροχοπτώσεις είναι ακανόνιστες, τα υδατικά συστήματα σπανίζουν και οι αποθέσεις σκόνης από την έρημο είναι αρκετά σημαντικές.

3. Η δομή του εδάφους και η γεωλογία

Το είδος του εδάφους επηρεάζει ως προς για το είδος των αρχιτεκτονικών εργασιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν στα θεμέλια και τις χωματουργικές εργασίες. Γενικά χαλαρά και αμμώδη εδάφη πρέπει να αποφεύγονται [2].

Εάν αναλογιζόμαστε την κατασκευή ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας για έναν σταθμό CSP, τότε είναι πολύ σημαντικό να μελετηθεί η φύση των τοπικών βράχων και της άμμου. Τοπικά πετρώματα ή άμμος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του συστήματος αποθήκευσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να αποτελεί το 12% του

κόστους κατασκευής για έναν σταθμό με συλλέκτες παραβολικής σκάφης ή 6% για σταθμό τεχνολογίας ηλιακού πύργου [10].

4. Θέματα γης

Οι σταθμοί CSP καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση γης. Άρα το κόστος της γης πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή μιας τοποθεσίας, μιας και αυξάνει το συνολικό κόστος επένδυσης [2].

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που αφορά τους σταθμούς CSP είναι ότι η χρήση γης δεν πρέπει να έρχεται σε αντίθεση με άλλες χρήσεις γης, όπως η στέγαση και η γεωργία. Ακόμα να μην ανήκει σε προστατευόμενη περιοχή και να βρίσκεται εκτός βιομηχανικών ζωνών.

5. Γεωγραφία και τοπογραφία της περιοχής

Μια τοποθεσία σε μεγαλύτερο υψόμετρο θα είναι εκτεθειμένη σε πολύ καθαρότερο ουρανό και κατά συνέπεια θα δέχεται περισσότερη άμεση ακτινοβολία (DNI), η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για σταθμούς CSP. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης απαίτησης για έκταση γης και επίσης για κατασκευαστικούς λόγους, μια μικρή κλίση είναι επιθυμητή. Προτείνεται μια μέση κλίση μικρότερη από 3% [11].

6. Ενεργειακό προφίλ ζήτησης και συνδεσιμότητα με κεντρικό δίκτυο

Τέλος, πρέπει να καθοριστεί το προφίλ της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την επιλεγμένη περιοχή αλλά και τις γύρω περιοχές. Αυτό το ενεργειακό προφίλ ζήτησης θα συμβάλλει στην τελική επιλογή συστήματος CSP.

Σε ότι αφορά τη συνδεσιμότητα, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή τότε πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης με το κεντρικό σύστημα. Η εγγύτητα του σταθμού σε μια γραμμή υψηλής τάσεως όχι μόνο θα μειώσει τις απώλειες ισχύος αλλά και το κόστος μεταφοράς [2]. Τελικά, η σύνδεση με το δίκτυο είναι σίγουρα ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή τοποθεσίας.

Ιστορικά Στοιχεία [12]

Η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας (CSP) δεν αποτελεί καινοτομία των τελευταίων ετών. Καταγραφές για την πρώτη εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής έχουμε από το 212 π.Χ. όταν ο Αρχιμήδης χρησιμοποίησε καθρέπτες για να συγκεντρώσει τις ηλιακές ακτίνες. Τον ίδιο αιώνα ο Έλληνας μαθηματικός Διοκλής περιέγραψε τις οπτικές ιδιότητες ενός παραβολικού κοίλου.

Στις αρχές του 17^{ου} αιώνα, ο Salomon De Caux (1576-1626) ανέπτυξε έναν μικρό κινητήρα που τροφοδοτούνταν από ηλιακή ενέργεια και αποτελούνταν από κάτοπτρα γυαλιού και ένα μεταλλικό αεροστεγές δοχείο που περιείχε νερό και αέρα. Όταν θερμαινόταν το νερό δημιουργούνταν ένας μικρός πίδακας νερού, σαν συντριβάνι. Το 1774, ο Lavoisier και ο Joseph Priestley ανέπτυξαν τη θεωρία της καύσης από τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν δοκιμαστικό σωλήνα συλλογής αερίων. Στη συνέχεια, ο Augustin Mouchot επινόησε μία ηλιακή μηχανή ατμού που κινούσε ένα τυπογραφικό πιεστήριο.

Το 1878, ο Augustin Mouchot στην Παγκόσμια Έκθεση στο Παρίσι επέδειξε μια ατμομηχανή που λειτουργούσε με συλλέκτη δίσκου. Στις αρχές της δεκαετίας του 1900, αν και το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια είχε ατονήσει λόγω της προόδου στις μηχανές εσωτερικής καύσης και την αύξηση διαθεσιμότητας σε ορυκτά καύσιμα χαμηλού κόστους, η πρώτη εγκατάσταση σταθμού με σύστημα CSP (ηλιακό πεδίο με συλλέκτες παραβολικής σκάφης) έγινε στο El Meadi (Αίγυπτος). Ο σταθμός χρησιμοποιήθηκε για άντληση αρδευτικού νερού.

Τη δεκαετία του 1960, με επίκεντρο τα φωτοβολταϊκά για το διαστημικό πρόγραμμα, το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια άρχισε να αναζωπυρώνεται και πάλι. Κατά τη διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης τη δεκαετία του 1970 είχαμε έντονη δραστηριότητα στον τομέα έρευνας και σχεδιασμού συστημάτων CSP. Πολλές πιλοτικές μονάδες χτίστηκαν, δοκιμάστηκαν και έφεραν στο προσκήνιο την τεχνολογία CSP στη βιομηχανία και το εμπόριο.

Η πραγματική εδραίωση των συστημάτων CSP στη βιομηχανία έγινε στην Καλιφόρνια τη δεκαετία του 1980. Οι ευνοϊκές ρυθμίσεις της κυβέρνησης (όπως φορολογικά κίνητρα και μακροπρόθεσμες συμβάσεις υποχρεωτικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας) οδήγησαν στην κατασκευή των εννέα ξεχωριστών μονάδων με τεχνολογία συλλεκτών παραβολικής σκάφης υπό την ονομασία «Solar Electric Generating Systems» (SEGS), συνολικού ύψους εγκατεστημένης ισχύος 354 MWe. Μια πτώση της τιμής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου οδήγησε πολλές χώρες να αποσυρθούν από την πολιτική υποστήριξη που παρείχαν στα συστήματα CSP, και ως εκ τούτου, κανένα νέο εργοστάσιο δεν κατασκευάστηκε τη δεκαετία 1990-2000.

Το 2006 το ενδιαφέρον αναζωπυρώθηκε και πάλι για την ανάπτυξη σταθμών CSP μεγάλης κλίμακας. Η αγορά επανεμφανίστηκε πιο συγκεκριμένα στην Ισπανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, και πάλι σαν απόρροια των κυβερνητικών μέτρων που προωθούσαν εναλλακτικές μορφές ενέργειας.

Μελλοντικές Εξελίξεις

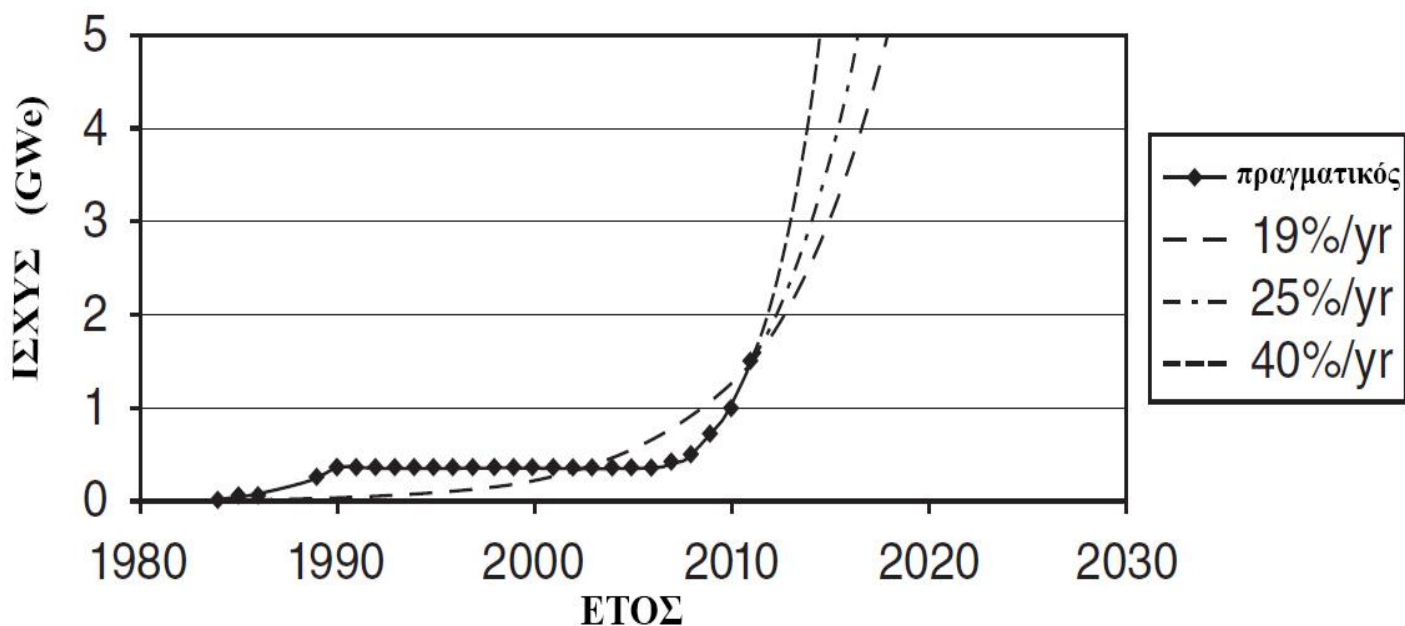
Σήμερα, το 2015, έχουμε σε λειτουργία σταθμούς με ισχύ περισσότερη από 2,136GW, 2,477GW υπό κατασκευή και 10,135GW να έχουν ανακοινωθεί κυρίως στις ΗΠΑ, με την Ισπανία και την Κίνα να ακολουθούν. Σύμφωνα με τα στοιχεία περίπου 17GW των έργων CSP είναι υπό ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο, με τις ΗΠΑ να βρίσκονται στην πρώτη θέση με περίπου 8GW. Η Ισπανία κατατάσσεται δεύτερη με 4,46GW στην ανάπτυξη, ακολουθούμενη από την Κίνα με 2,5GW [14].

Τα συστήματα CSP παράγουν ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια που τελικά πρέπει να ανταγωνιστεί με άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά. Έτσι το κόστος παραγωγής ενέργειας είναι η κύρια ενασχόληση του τομέα έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας CSP. Με μηδενικό κόστος καυσίμων, το κόστος παραγωγής ενέργειας από CSP εξαρτάται από την απόσβεση του υψηλού αρχικού επενδυτικού κεφαλαίου κατά τη διάρκεια ζωής του σταθμού.

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι μια δοκιμασμένη τεχνολογία που βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο της καμπύλης μείωσης κόστους. Αυτή τη στιγμή βρισκόμαστε σε μια

περίοδο που η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται με αλματώδη ρυθμό και το κόστος παραγωγής μειώνεται συνεχώς. Η τάση μείωσης του κόστους ενώ αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς συνδέεται λογικά με:

- τεχνικές βελτιώσεις, με βάση την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από εγκατεστημένες μονάδες και παράλληλες προσπάθειες των τμημάτων έρευνας και ανάπτυξης (R&D) να εντοπίσουν βελτιώσεις στην απόδοση
- εγκατάσταση σταθμών μεγαλύτερου μεγέθους, το οποίο επιτρέπει την χρήση μεγαλύτερων και αποδοτικότερων γεννητριών και άλλων εξαρτημάτων.



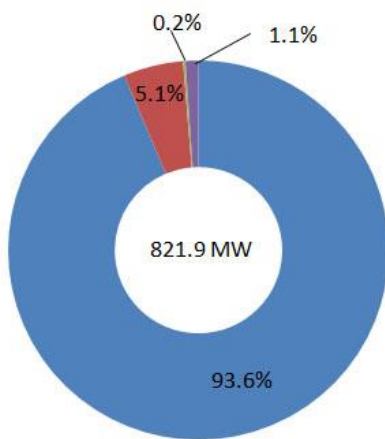
Σχήμα 3.2 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς σταθμών CSP με βάση πραγματικούς και προβλεπόμενους ρυθμούς αύξησης (Πηγή [1])

Αυτά τα πρακτικά αποτελέσματα, με βάση την εμπειρία που έχουμε σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οδηγούν σε μια μείωση του κόστους της τεχνολογίας αυτής με σταθερό ρυθμό για κάθε διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύος. Μια σειρά από βασικούς παράγοντες μείωσης του κόστους, όπως το μειωμένο κόστος κατασκευής σταθμών και η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, αναμένονται να οδηγήσουν σε συνολική μείωση του κόστους ενέργειας το 2025 της τάξεως του 30-40% σε σχέση με το 2012. Κατά την ίδια χρονική περίοδο, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αναμένεται να φτάσει 60-100 GW, ανάλογα με τα πολιτικά μέτρα που θα παρθούν. Το σχήμα 3.3 απεικονίζει την εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος έως το 2013 μαζί με αναγωγή των ρυθμών ανάπτυξης (19% κατά μέσο όρο ανά έτος από το 1984 έως το 2013 και 19%, 25% ή 40% κατά μέσο όρο ανά έτος από το 2013 και μετά). Για το 2050 προβλέπεται μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας στο 25% περίπου σε σχέση με τις τιμές του 2010 (χωρίς να υπολογίζουμε το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης).

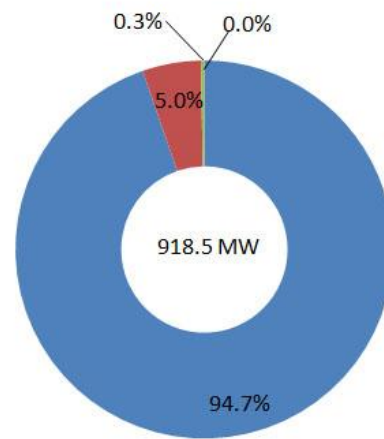
ΧΩΡΕΣ	2020	2030	2040	2050
Australia, Central Asia, ⁴ Chile, India (Gujarat, Rajasthan), Mexico, Middle East, North Africa, Peru, South Africa, United States (Southwest)	5%	12%	30%	40%
United States (remainder)	3%	6%	15%	20%
Europe (mostly from imports), Turkey	3%	6%	10%	15%
Africa (remainder), Argentina, Brazil, India (remainder)	1%	5%	8%	15%
Indonesia (from imports)	0.5%	1.5%	3%	7%
China, Russia (from imports)	0.5%	1.5%	3%	4%

Σχήμα 3.3 Προβλέψεις ηλεκτροπαραγωγής από συστήματα CSP (Πηγή :International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap-Concentrated Solar Power)

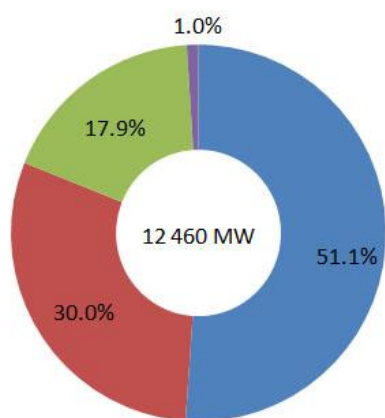
in operation



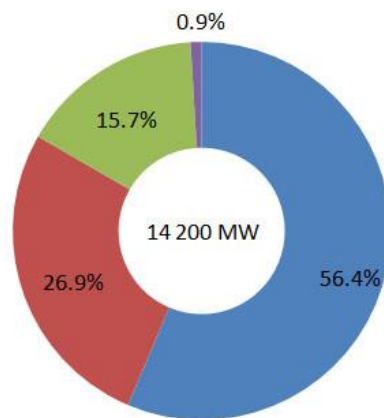
under construction



planned



sum of plants in operation, under construction and planned



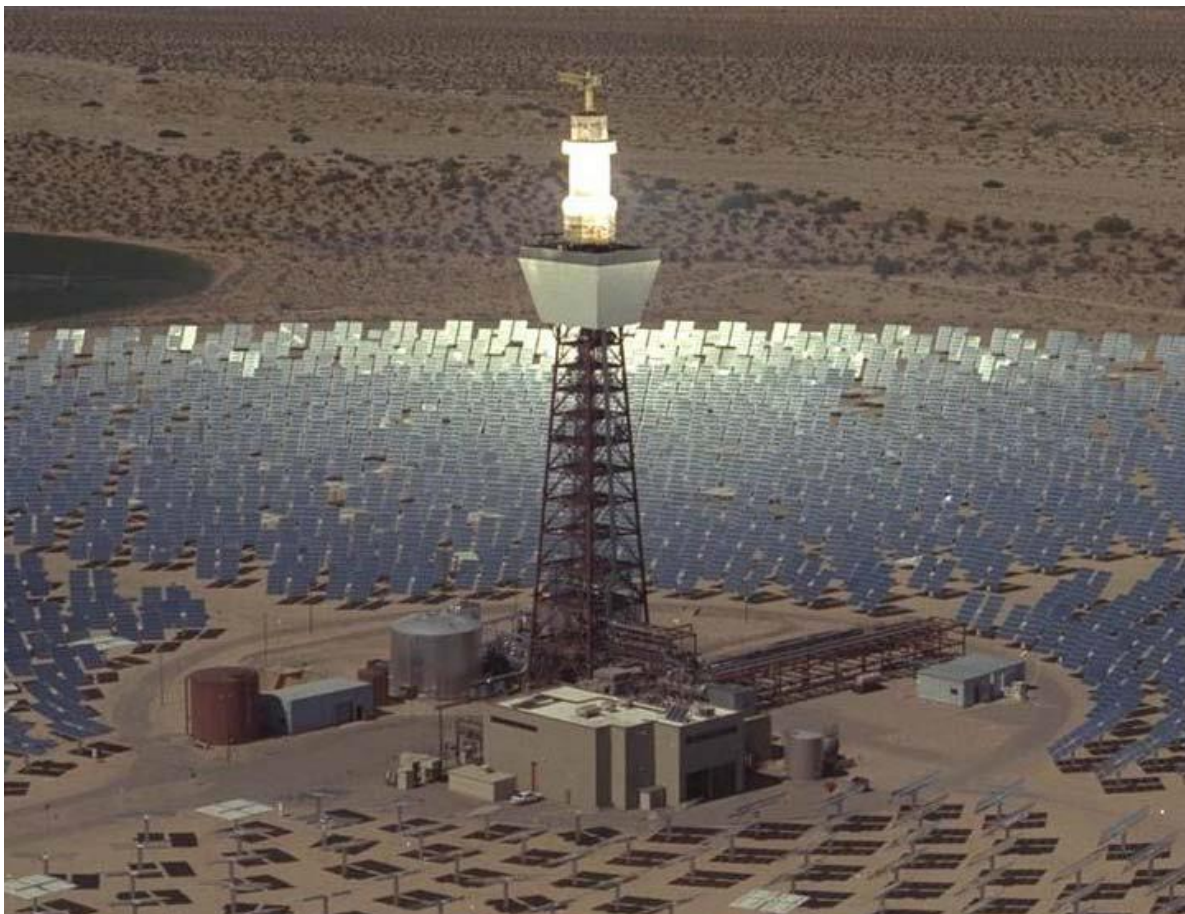
Σχήμα 3.4 Ποσοστά διαφορετικών ηλιακών συγκεντρωτικών τεχνολογιών

3.2 Σύστημα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη

Το σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη (ή πύργου ηλιακής ισχύος) παράγει ηλεκτρική ενέργεια με εστίαση της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου. Ο εναλλάκτης αυτός αποκαλείται και δέκτης του συστήματος. Το σύστημα χρησιμοποιεί εκατοντάδες (ακόμα και δεκάδες χιλιάδες) καθρέφτες με ενσωματωμένο σύστημα εντοπισμού του ηλίου, που ονομάζονται ηλιοστάτες, προκειμένου να αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο δέκτη (βλέπε σχήμα 3.5). Τονίζεται ότι ο δέκτης είναι κοινός για όλους τους καθρέφτες, και για το αυτό λόγο το σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη κατατάσσεται στα συστήματα σημειακής εστίασης. Η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για εφαρμογές κλίμακας 30-400 MWe [15].

Ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με τεχνολογία συστήματος κεντρικού δέκτη αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

1. Ηλιακός πύργος με ενσωματωμένο δέκτη
2. Ηλιακό πεδίο
3. Σύστημα παραγωγής ενέργειας
4. Σύστημα αποθήκευσης



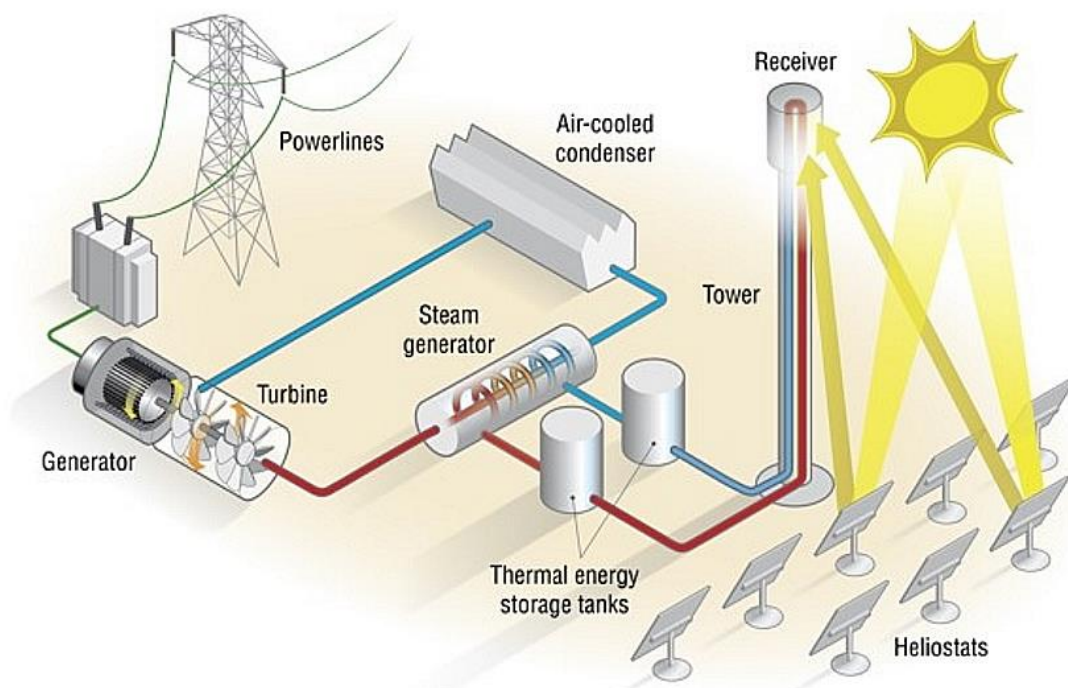
Σχήμα 3.5 (Πηγή Sandia National Laboratories [16])

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος εμφανίζει πολύ υψηλούς βαθμούς συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (στο εύρος 500-1000 ήλιων) και έτσι είναι δυνατόν να επιτευχθούν θερμοκρασίες ακόμα και πάνω από 900°C στο δέκτη, επιτρέποντας τη χρήση θερμοδυναμικών κύκλων υψηλής απόδοσης. Συνήθως η τεχνολογία ηλιακού πύργου συνδυάζεται με συμβατικούς σταθμούς με κύκλο ατμού για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Ο δέκτης που τοποθετείται στην κορυφή του πύργου λειτουργεί ως εναλλάκτης ενέργειας, λαμβάνοντας τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια και μεταφέροντάς τη σε μορφή θερμότητας σε ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF). Το ρευστό αυτό διέρχεται μέσα από μικρές σωληνώσεις της επιφάνειας του δέκτη και κατόπιν μεταφέρει τη θερμότητα στο ρευστό λειτουργίας του συμβατικού κύκλου ισχύος για την παραγωγή ατμού. Η συναλλαγή θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών γίνεται μέσω ενός συνόλου εναλλακτών θερμότητας, που αποκαλούμε Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (Λ.Α.Θ.). Στο συμβατικό κύκλο ισχύος ο ατμός παράγεται σε ένα λέβητα και μεταφέρεται στον αμοστρόβιλο, όπου διαστέλλεται και παράγει μηχανικό έργο που με τη σειρά του μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας. Ο ατμός που εξέρχεται του στροβίλου συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή, στη συνέχεια το συμπύκνωμα αντλείται προς τον καυστήρα του Λ.Α.Θ. όπου λαμβάνει θερμότητα από τον ηλιακό δέκτη και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Πολλές φορές γίνεται χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ή/και συστήματα συμπληρωματικής καύσης καυσίμων προκειμένου να αποφεύγονται έντονες διακυμάνσεις στην ηλεκτροπαραγωγή της μονάδας σε διαστήματα περιορισμένης ηλιοφάνειας.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής ηλιοθερμικής εγκατάστασης ηλιακού πύργου
(Πηγή : <http://energy.gov> [17])

3.2.1 Επιμέρους Υποσυστήματα

Στο κεφάλαιο αυτό, θα δοθεί έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων της τεχνολογίας κεντρικού ηλιακού δέκτη (ως μονάδες), καθώς η διάταξη, οι παράμετροι σχεδιασμού και η απόδοση τους συστήματος θα μελετηθούν διεξοδικά στο 5^ο κεφάλαιο.

1. Ηλιακός Πύργος και Δέκτης

Ο κεντρικός ηλιακός δέκτης, που βρίσκεται τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου, απορροφά τη συγκεντρωμένη από το ηλιοστατικό πεδίο ηλιακή ακτινοβολία και την προσδίδει σε ένα ρευστό μεταφοράς υπό τη μορφή θερμικής ενέργειας. Στην ουσία, ο δέκτης είναι ένας ειδικά σχεδιασμένος εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος δέχεται διακοπτόμενη ανομοιόμορφη ροή θερμότητας στην επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.

Ο σχεδιασμός του είναι προϊόν εκτενούς ανάλυσης και βελτιστοποίησης, καθώς το κόστος του ανέρχεται περίπου στο 15% του αρχικού κεφαλαίου, και είναι το υποσύστημα μιας τέτοιας εγκατάστασης με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα σχετικά με τη διάρκεια ζωής του, καθώς στην επιφάνεια του παρατηρούνται πολλά μεταβατικά φαινόμενα και αναπτύσσονται ισχυρές θερμικές τάσεις. Τα βασικά μέρη ενός κεντρικού ηλιακού δέκτη είναι η απορροφητική επιφάνεια, αποτελούμενη από τα πάνελ σωληνώσεων, η κεντρική κατασκευή, πάνω στην οποία αυτά είναι στερεωμένα, οι σωληνώσεις διασύνδεσης των πánελ, οι σωληνώσεις εισόδου-εξόδου του εργαζόμενου μέσου και οι δεξαμενές ατμού ή τύμπανο ατμού, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.

Το μέγεθος της απορροφητικής επιφάνειας του ηλιακού δέκτη εξαρτάται από τη ζητούμενη από την εγκατάσταση παραγόμενη ενέργεια, και περιορίζεται από τη μέγιστη ροή εισερχόμενης θερμότητας και τις απώλειες διαρροής. Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια του δέκτη, τόσο υψηλότερες τιμές παίρνει και η θερμική ροή που συγκεντρώνεται σε αυτήν. Ταυτόχρονα όμως αυξάνονται και οι απώλειες διαρροής, από τις ανακλώμενες ακτίνες που αστοχούν από την επιφάνεια του δέκτη. Η εισερχόμενη ροή θερμότητας είναι επιθυμητό να παίρνει μεγάλες τιμές, καθώς αυξάνει τη συνολική απόδοση του δέκτη, ωστόσο και αυτή περιορίζεται από κάποιο άνω όριο, λόγω της περιορισμένης αντοχής των υλικών κατασκευής του δέκτη σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Περισσότερα για τις απώλειες δέκτη στο κεφάλαιο 5.

Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συγκεντρωτικά συστήματα, η ροή θερμότητας και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο δέκτη είναι υψηλότερες. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά, που πρέπει να εμφανίζει ένας δέκτης είναι η υψηλή θερμική απόδοση και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τυπικές θερμοκρασίες, στις οποίες λειτουργεί ένας κεντρικός ηλιακός δέκτης είναι 300-1200°C, και τυπικές τιμές για την εισερχόμενη ροή θερμότητας στην απορροφητική επιφάνεια είναι 200-1200 KW/m². Οι παραπάνω τιμές κάνουν επιτακτική την προσεκτική μελέτη των υλικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ενός δέκτη, καθώς αυτά καλούνται να ανταπεξέλθουν μεγάλων τάσεων και θερμικών φορτίων, κατά τη λειτουργία του σταθμού. Ακόμα πρέπει να έχει συμπεριφορά μέλανος σώματος με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας. Για τον σκοπό αυτό στην κατασκευή των συλλεκτών χρησιμοποιούνται κοιλότητες, σωληνώσεις με κατάλληλη μαύρη επιστρώση ή πορώδεις απορροφητικές διατάξεις που έχουν την ιδιότητα να παγιδεύουν τα διαφεύγοντα φωτόνια.

Ένας τυπικός εναλλάκτης δημιουργείται από έναν μεγάλο αριθμό πάνελ ,αποτελούμενων από παράλληλους, κατακόρυφους λεπτούς σωλήνες (~20÷56 mm) συγκολλημένους μεταξύ τους με κοινή κεφαλή εισόδου και εξόδου. Οι σωλήνες συνήθως επικαλύπτονται εξωτερικά με μαύρη βαφή, πολύ υψηλής απορροφητικότητας Pyromark®.[21]

Στο σχεδιασμό ενός κεντρικού δέκτη, σημαντικό ρόλο παίζει και το ρευστό το οποίο θα επιλεγεί να διαρρέει τις σωληνώσεις του. Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- Τετηγμένα Άλατα
- Αέρας
- Νερό (όπου ο δέκτης λειτουργεί και σαν σύστημα παραγωγής ατμού)
- Υγρό Νάτριο

Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Σωληνοειδής δέκτης (External Tubular Receiver or Cavity Tubular Receiver)
- Ογκομετρικός δέκτης (Volumetric Receiver)

Σωληνοειδής Δέκτης

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο σύστημα δέκτη σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας ηλιακού πύργου είναι ο σωληνοειδής δέκτης, όπου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός μεταλλικού ή κεραμικού τοίχου. Συμβατικές διατάξεις με σκούρους μεταλλικούς σωλήνες έχουν χρησιμοποιηθεί με ατμό ή τετηγμένα άλατα ως ρευστό μεταφοράς και επιτυγχάνοντας θερμοκρασίες από 500 έως 600°C. Πολύ μικρότερη είναι η εμπειρία σε κυλινδρικούς δέκτες οι οποίοι χρησιμοποιούν ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας αέρα, ωστόσο έχουν επιτευχτεί θερμοκρασίες από 800°C έως και 900°C.

Με κριτήριο τη γεωμετρική τους διάταξη, οι σωληνοειδείς δέκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

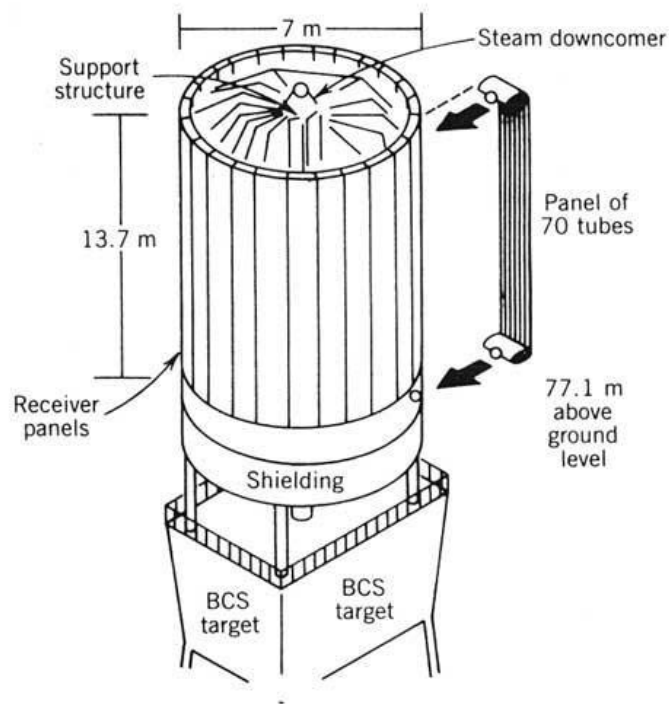
- Εξωτερικούς δέκτες (external receivers)
- Ογκομετρικός δέκτης (volumetric receiver)

Οι εξωτερικοί δέκτες αποτελούνται από πολλούς κάθετους αγωγούς μικρής διαμέτρου (20-56mm) διατεταγμένων έτσι ώστε να σχηματίζουν πάνελ. Τα πάνελ συγκολλούνται μεταξύ τους πλευρικά, έτσι ώστε η τελική μορφή του δέκτη να προσεγγίζει την κυλινδρική, ενώ στη βάση και κορυφή των αγωγών συνδέονται κεφαλές τροφοδότησης και συλλογής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας αντίστοιχα. Οι σωλήνες, κατασκευασμένοι συνήθως από ανοξείδωτο ατσάλι και κράματα νικελίου, επικαλύπτονται εξωτερικά με μαύρη βαφή υψηλής απορροφητικότητας Pyromark®. [21]

Οι εξωτερικοί δέκτες τυπικά χαρακτηρίζονται από λόγο ύψους προς διάμετρο μεταξύ 1:1 και 2:1 [21]. Η επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερη κατά τη σχεδίαση, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας. Η ελάχιστη επιφάνεια που μπορεί να έχει ο δέκτης καθορίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών, και επομένως από την ικανότητα απομάκρυνσης θερμότητας του

ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Όσο μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας έχει το ρευστό, τόσο μεγαλύτερη οφείλει να είναι η επιφάνεια του δέκτη, ώστε να απομακρύνεται αποτελεσματικά η θερμότητα.

Συστήματα εξωτερικού κυλινδρικού δέκτη έχουν χρησιμοποιηθεί στις εγκαταστάσεις Solar One και Solar Two στις ΗΠΑ, καθώς και σε πειραματικές εγκαταστάσεις σε Ευρώπη και Ιαπωνία. Δέκτης εξωτερικού τύπου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.7 Σχέδιο του εξωτερικού δέκτη στην εγκατάσταση Solar One στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Πηγή : <http://www.powerfromthesun.net/> [18])

Στους δέκτες κοιλότητας η επιφάνεια απορρόφησης τοποθετείται στο εσωτερικό μιας μεταλλικής διαμόρφωσης τύπου κοιλότητας. Η ακτινοβολία περνά μέσα από το άνοιγμα, το οποίο καλύπτεται από διαφανές υλικό, σε μια κοίλη διάταξη στο εσωτερικό της κατασκευής και με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες θερμότητας της επιφάνειας λόγω συναγωγής. Οι μη ενεργές επιφάνειες, στο εσωτερικό της κοιλότητας, δηλαδή η οροφή και ο πυθμένας πρέπει να μονώνονται πολύ αποτελεσματικά για να περιορίζουν στο ελάχιστο τις απώλειες θερμότητας του δέκτη.

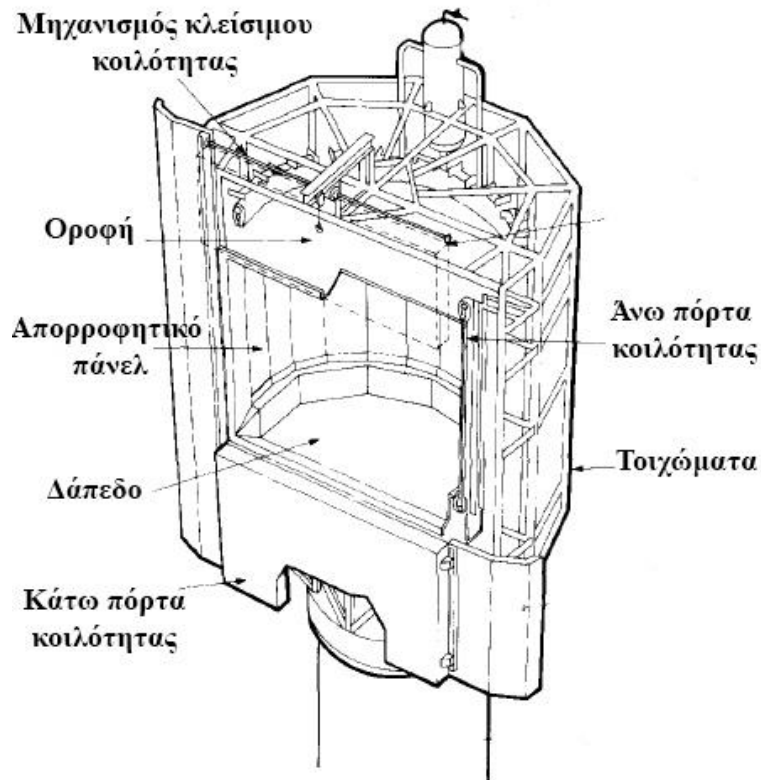
Τυπικές διαστάσεις των ανοιγμάτων κυμαίνονται μεταξύ τους ενός τρίτου και ενός δευτέρου της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη, ενώ τα ανοίγματα μπορούν να δέχονται ακτινοβολία από ένα κυκλικό τομέα γωνίας μεταξύ 60° και 120° . Ως εκ τούτου, το πεδίο των ηλιοστατών περιορίζεται σε αυτό τον κυκλικό τομέα, ή σε περίπτωση που απαιτούνται περισσότεροι ηλιοστάτες, ο δέκτης μπορεί να διαθέτει περισσότερα του ενός ανοίγματα, καθένα από τα οποία να κοιτάζει προς μία διαφορετική κατεύθυνση του ηλιοστατικού πεδίου. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες πάνω στους δέκτες κοιλότητας αποδεικνύουν, ότι η βέλτιστη λειτουργία τους προκύπτει για ένα μόνο άνοιγμα, με βόρειο προσανατολισμό, για

ηλιοστατικά πεδία που εκτείνονται βόρεια του πύργου. Το άνοιγμα σχεδιάζεται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, ενώ οι διαστάσεις του προκύπτουν από τις διαστάσεις του ειδώλου κατοπτρισμού από το μακρινότερο ηλιοστάτη, συν τις απώλειες ανακοπής (περίπου 1-4%).

Αναλόγως των ιδιοτήτων του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και της προσπίπτουσας στο δέκτη ροή θερμότητας, οι σωληνώσεις του δέκτη μπορεί υποβληθούν σε υψηλές θερμομηχανικές τάσεις. Επειδή η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω της σωληνοειδούς επιφάνειας, είναι δύσκολη η λειτουργία του δέκτη για ροές θερμότητας πάνω από 600kW/m (μέγιστη τιμή ροής).

Γενικά, ο εξωτερικός δέκτης προτιμάται σε ηλιοστατικά πεδία κυκλικά του πύργου, ενώ ο δέκτης κοιλότητας για ηλιοστατικά πεδία με διάταξη βόρεια του πύργου. Με μία πρώτη σύγκριση μεταξύ τους, θα μπορούσε κανείς να πει ότι οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερες εξωτερικούς δέκτες απ' ότι στους δέκτες κοιλότητας λόγω μεγαλύτερης έκθεσης στο περιβάλλον, ενώ οι τελευταίοι παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες διαρροής, καθώς οι ανακλώμενες ακτίνες πρέπει να περάσουν μέσα από το σχετικά μικρό άνοιγμα, πριν προσπέσουν στην απορροφητική επιφάνεια. Επιπρόσθετα, το εμβαδόν της απορροφητικής επιφάνειας ενός δέκτη κοιλότητας είναι περίπου κατά 25% μεγαλύτερο από αυτό για έναν εξωτερικό δέκτη για ίδια εισερχόμενη θερμική ισχύ και μέγιστο όριο ροής θερμότητας, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του. Το βάρος και το πλήθος των εξαρτημάτων είναι συνήθως μεγαλύτερα σε έναν δέκτη κοιλότητας απ' ότι σε έναν εξωτερικό δέκτη, ωστόσο οι σωληνώσεις του δέκτη κοιλότητας προστατεύονται πολύ περισσότερο από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Συστήματα δέκτη κοιλότητας αρχικά δοκιμάστηκαν στη Γαλλία (Themis) και στην Ισπανία (LEA-SSPS-CRS project) ενώ όλο και περισσότερες μονάδες κεντρικού ηλιακού δέκτη φαίνεται να προτιμάνε αυτό το είδος συλλέκτη. Ένας τυπικός δέκτης κοιλότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3.8 Τυπικός σχεδιασμός δέκτη κοιλότητας (Πηγή : «A handbook for solar central receiver design». Patricia Kuntz Falcone, Sandia National Laboratories Livermore)

Ογκομετρικός δέκτης

Εκτός από τους προηγούμενους δύο τύπους δεκτών, υπό ανάπτυξη βρίσκεται και ένας τρίτος τύπος δέκτη, ο ογκομετρικός δέκτης (volumetric receiver). Στους δέκτες αυτούς, η επιφάνεια απορρόφησης δεν αποτελείται από αγωγούς, αλλά από εξαιρετικά πορώδες υλικό, μεταλλικό ή κεραμικό, σε μορφή πλέγματος, αφρού ή πολλαπλών στρώσεων (σχήμα 3.9). Το ρευστό λειτουργίας περνά από το πορώδες του υλικού, απορροφώντας την εστιασμένη ακτινοβολία και θερμαίνεται μέσω συναγωγής. Ένα κριτήριο για την ποιότητα του απορροφητικού υλικού είναι το πόσο βαθιά επιτρέπει στην ακτινοβολία να εισχωρήσει μέσα στην κατασκευή.

Λεπτές υπό-κατασκευές (καλώδια, τοίχοι ή στηρίγματα) διασφαλίζουν την καλή μεταφορά της θερμότητας. Χαρακτηριστικό ενός καλού δέκτη είναι η δημιουργία του ογκομετρικού φαινομένου, κατά το οποίο η πλευρά του δέκτη που δέχεται την ακτινοβολία βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το μέσο το οποίο φεύγει από τον απορροφητή. Κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας οι ογκομετρικοί δέκτες τείνουν να έχουν ασταθή κατανομή της ροής μάζας. Κατάλληλες ρυθμίσεις με στοιχεία διαμόρφωσης της ροής (π.χ. διάτρητες πλάκες) τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα πίσω από τον δέκτη, η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας καθώς και το υλικό του απορροφητή μπορούν να περιορίσουν τέτοια φαινόμενα.



Σχήμα 3.9 Κεραμικά υλικά κυψελοειδούς διαμόρφωσης (Πηγή : www.stobbe.com)

Οι ογκομετρικοί δέκτες είναι καταλληλότεροι για χρήση με συμπιεσμένα αέρια, όπως ο αέρας και το ήλιο, λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται. Το αέριο εξαναγκάζεται να περάσει από την πορώδη δομή και να θερμανθεί μέσω συναγωγής. Οι ογκομετρικοί δέκτες συναντώνται σε δύο βασικές μορφές, είτε εκτεθειμένοι στο περιβάλλον, είτε περιβαλλόμενοι από ένα διαφανές παράθυρο. Η διάταξη αυτή υπόσχεται την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών αναλόγως με το υλικό της επιφάνειας απορρόφησης, και συγκεκριμένα:

- 800 – 1000°C, με χρήση μετάλλων
- 1200°C με χρήση κεραμικών SiSiC και 1500°C με κεραμικά SiC.
- Έως και 2000°C με χρήση αλουμίνιας (οξείδιο του αργιλίου).[19]

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των αερόψυκτων ογκομετρικών δεκτών είναι [22]:

- Ο αέρας είναι δωρεάν και βρίσκεται πάντα διαθέσιμος
- Δεν υπάρχει κίνδυνος στερεοποίησης του εργαζόμενου μέσου
- Δυνατότητα επίτευξης πολύ υψηλών θερμοκρασιών και χρησιμοποίηση της θερμότητας σε ποιο αποδοτικούς κύκλους
- Το εργαζόμενο μέσο δεν παρουσιάζει αλλαγή φάσης
- Απλό σύστημα με ευκολία συντήρησης
- Άμεση απόκριση του συστήματος σε μεταβολές της εισερχομένης ροής θερμότητας
- Δεν είναι απαραίτητη η λήψη ειδικών μέτρων ασφαλείας
- Απουσία περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων.

Παρ' όλα αυτά, οι ογκομετρικοί δέκτες χρειάζονται περαιτέρω βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης και της γενικότερης αξιοπιστίας που παρουσιάζουν. Οι απώλειες ακτινοβολίας πρέπει να μειωθούν και η αντοχή τους στο χρόνο να τεθεί υπό διερεύνηση. Τα οφέλη τους είναι προφανή, ωστόσο, μέχρι σήμερα, η χρήση τους βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό κυρίως στάδιο, με δοκιμές που έχουν δείξει θετικές προοπτικές. Προς το

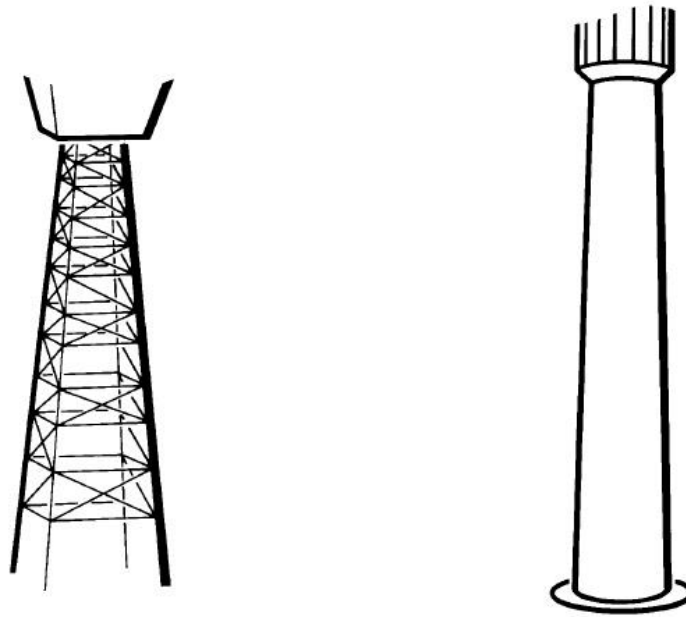
παρόν, δεν έχουν βρει εμπορική εφαρμογή, αλλά από το 2009 γίνονται δοκιμές ενός τέτοιου κεραμικού δέκτη στο Julich της Γερμανίας, σε μία εγκατάσταση επίδειξης, ισχύος 1,5MWe.

Πύργος

Ο πύργος παρέχει υποστήριξη για τον ηλιακό δέκτη στο απαιτούμενο ύψος πάνω από το πεδίο συλλεκτών. Το ύψος του πύργου είναι κυρίως συνάρτηση του σημείου σχεδιασμού της εγκατάστασης, ωστόσο επηρεάζεται σημαντικά και από τη διαμόρφωση του δέκτη και την επιλογή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Ο πύργος προσφέρει επίσης υποστήριξη για το σύστημα εντοπισμού ακριβείας των ηλιοστατών, τις σωληνώσεις, και το συναφή μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Μεταφέρει τα φορτία βαρύτητας από τον πύργο και τον υπόλοιπο εξοπλισμό στο έδαφος στα θεμέλια του πύργου. Μεταφέρει επίσης τα πλευρικά ανεμικά φορτία και τα σεισμικά φορτία στο υπέδαφος.

Η πρόσβαση στο εσωτερικό του πύργου γίνεται μέσω ενός ανελκυστήρα για τη μεταφορά προσωπικού συντήρησης της μονάδας και φορητού εξοπλισμού. Ο ανελκυστήρας ανέρχεται από το ισόγειο στο δωμάτιο εξοπλισμού, που βρίσκεται κοντά στην κορυφή του πύργου, με ενδιάμεσες στάσεις αν χρειαστεί. Σε περίπτωση εξοπλισμού πάρα πολύ μεγάλου μεγέθους ή βάρους υπάρχει σύστημα τροχαλίας. Μια σκάλα παρέχει πρόσβαση από το δωμάτιο εξοπλισμού προς την κορυφή του πύργου. Τέλος υπάρχει και πρόσβαση έκτακτης ανάγκης για τον πύργο μέσω ειδικής σκάλας ασφαλείας. Φώτα προειδοποίησης αεροσκαφών και αλεξικέραυνα παρέχονται επίσης στον πύργο.

Οι πύργοι είναι συνήθως κατασκευασμένοι από χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι πύργοι χάλυβα είναι παρόμοιας διαμόρφωσης με τους πύργους τηλεοπτικής μετάδοσης ή πύργους αναμετάδοσης ραδιοκυμάτων. Οι τσιμεντένιοι πύργοι είναι παρόμοιοι με τις ψηλές καπνοδόχους σε συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα. Η επιλογή μεταξύ των δύο σχεδίων εξαρτάται κυρίως από το απαιτούμενο ύψος του πύργου. Οι πύργοι χάλυβα φαίνεται να είναι οικονομικά αποτελεσματικότεροι όταν το ύψος είναι μικρότερο των 120 m. Οι πύργοι με οπλισμένο σκυρόδεμα έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποδοτικοί για ύψη μεγαλύτερα από 120 m. Τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει και ένας εναλλακτικός σχεδιασμού πύργου από σκυρόδεμα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.11, με το κενό στην κατασκευή επιτυγχάνεται μια οικονομικότερη κατασκευή και ταυτόχρονα περιορίζεται η σκίαση από τη βάση του πύργου.



Σχήμα 3.10 Αριστερά : βάση πύργου από χάλυβα, Δεξιά : βάση από σκυρόδεμα (Πηγή : «A handbook for solar central receiver design». Patricia Kuntz Falcone, Sandia National Laboratories Livermore)



Σχήμα 3.11 Ο πύργος του σταθμού PS10, Σεβίλλη Ισπανία

Τα θεμέλια το πύργο εξαρτώνται από το σχεδιασμό του πύργου, τα φορτία και τις συνθήκες του εδάφους. Σε γενικές γραμμές, τα θεμέλια είναι κατασκευασμένα από

οπλισμένο σκυρόδεμα ώστε να μεταφέρουν τα βαρυντικά φορτία και τις ροπές ανατροπής από τον πύργο προς το έδαφος σε ασφαλές πίεςεις για ρουλεμάν. Τα θεμέλια πύργου που βρίσκονται πάνω από μαλακό ή χαλαρό χώμα στηρίζονται σε πασσάλους που μεταφέρουν τα φορτία σε ένα βαθύτερο στρώμα του εδάφους με κατάλληλα χαρακτηριστικά.

Ο σχεδιασμός των πύργων ακολουθεί τους καθιερωμένους κώδικες, πρότυπα ασφαλείας και προδιαγραφές. Τα φορτία σχεδιασμού για τον πύργο περιλαμβάνουν το ωφέλιμο φορτίο, το φορτίο του ανέμου και σεισμικό φορτίο. Τα τελευταία είναι και τα πιο επικίνδυνα μιας και οι σεισμοί παράγουν πλευρικά αλλά και κάθετα φορτία στο πύργο. Τα σεισμικά φορτία ποικίλουν ανάλογα με τη σεισμική ζώνη κινδύνου της τοποθεσίας, το ύψος και το βάρος του πύργου, το βάρος και τη θέση του δέκτη, το εργαζόμενο ρευστό, και τον εξοπλισμό.

2. Ηλιοστάτες

Οι ηλιοστάτες αποτελούν ένα από τα βασικότερα τμήματα του ηλιακού πεδίου ενός συστήματος κεντρικού δέκτη. Σκοπός του κάθε ηλιοστάτη είναι, με την ανεξάρτητη κίνησή του σε σχέση με τους υπόλοιπους του πεδίου, να καταφέρνει να τοποθετεί την ανακλαστική του επιφάνεια, κάθε στιγμή, με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνει την όσο το δυνατόν καλύτερη συγκέντρωση της άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον κεντρικό δέκτη. Κάθε ηλιοστάτης αποτελείται από :

- Την ανακλαστική επιφάνεια
- Το σύστημα στήριξης-μηχανισμός κίνησης
- Τοπικό σύστημα ελέγχου

Τύποι ηλιοστατών

Ο σχεδιασμός των ηλιοστατών είναι ένα κομμάτι που εξελίσσεται τα τελευταία 40 χρόνια, από τις αρχές της εμφάνισης της τεχνολογίας κεντρικού δέκτη. Νέα σχέδια προκύπτουν συνεχώς κυρίως με βάση τις εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών, ωστόσο δυο βασικές διαμορφώσεις έχουν επικρατήσει :

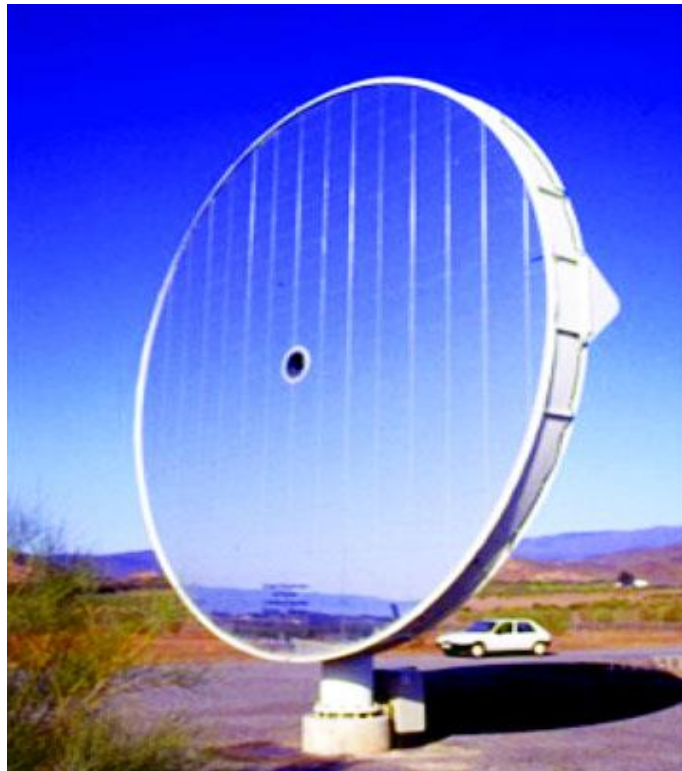
- Οι ηλιοστάτες τανυσμένης μεμβράνης, και
- Οι ηλιοστάτες γυαλιού/μετάλλου.

Οι ηλιοστάτες μεμβράνης είναι μία σχετικά νέα τεχνολογία σχεδιασμού ηλιοστατών. Προέκυψαν από την ανάγκη μείωσης του κόστους του ηλιοστατικού πεδίου, μιας και η κατασκευή όλο και μεγαλύτερων ηλιοθερμικών μονάδων τεχνολογίας κεντρικού δέκτη, με ισχύ ακόμα και πάνω από 100 MW, απαιτεί ηλιοστατικά πεδία με χιλιάδες κάτοπτρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε πολύ υψηλά κατασκευαστικά κόστη.[23]

Οι ηλιοστάτες αυτοί διαφέρουν πολύ κατασκευαστικά από τους συμβατικούς ηλιοστάτες γυαλιού. Η επιφάνειά τους είναι ένα τεντωμένο μεταλλικό φύλλο τοποθετημένο γύρω από ένα δακτύλιο στήριξης. Η μπροστινή επιφάνεια της μεμβράνης επικαλύπτεται με ένα υλικό υψηλής ανακλαστικότητας, έτσι ώστε να διαδραματίζει το ρόλο του καθρέπτη. Για να προσδοθεί ένα κοίλο περίγραμμα στον ανακλαστήρα, δημιουργείται ένα ελάχιστο κενό μεταξύ των δυο μεταλλικών μεμβρανών, το οποίο σε περίπτωση ανάγκης μπορεί να ασκήσει πίεση για να ανατρέψει την εστίαση του ηλιοστάτη.

Αν και το βάρος των ηλιοστατών αυτών είναι σαφώς λιγότερο από των συμβατικών ηλιοστατών με γυαλί, υπάρχουν κάποια σημεία στα οποία μειονεκτούν :

- Σε περίπτωση δυνατών ανέμων, αλλοιώνεται το σχήμα της επιφάνειας της μπροστινής μεμβράνης, με αποτέλεσμα να αποκλίνει από το σημείο εστίασης. Το πρόβλημα αυτό μετριάζεται με χρήση ενός δακτυλίου, σκοπός του οποίου είναι να προκαλεί τάση στην μεμβράνη και να βοηθά στην αποφυγή του φαινομένου αυτού.
- Εξαιτίας της φύσης της μεμβράνης, οι διάφορες επικαθίσεις ενεργούν ανασταλτικά στην αποτελεσματικότητα του συλλέκτη. Έτσι κρίνεται ως επιτακτική ανάγκη ο συχνός καθαρισμός τους.



Σχήμα 3.12 Ηλιοστάτης μεμβράνης της εταιρείας Solar Kinetics,Inc

Σε ότι αφορά τους ηλιοστάτες γυαλιού, που είναι και οι πιο διαδεδομένοι, έχουμε αρκετές διαφορετικές διαμορφώσεις και συνεχώς νέα σχέδια δοκιμάζονται σε πειραματικές εγκαταστάσεις ανά την υφήλιο. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται το συμβατικό σχέδιο ηλιοστάτη γυαλιού/μέταλλου, αλλά και κάποια άλλα που βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο.



Σχήμα 3.13 Τυπικός σχεδιασμός ηλιοστάτη με κενά (Πηγή : <http://www.solarpaces.org/>)



Σχήμα 3.14 Ο συνηθέστερος σχεδιασμός ηλιοστάτη, μοντέλο ASUP 140 της εταιρείας Abengoa (Πηγή : <http://informeanual.abengoa.com/>)



Σχήμα 3.15 Μοντέλα ηλιοστατών σε πειραματικό στάδιο : αριστερά της εταιρείας SAIC, δεξιά το μοντέλο Stellio της εταιρείας Schlaich Sergermann und Partner (Πηγή : «Large-Scale Solar Thermal Power Plants». Werner Vogel, Henry Calb)

Υλικά Κατασκευής

Γενικώς, τα κύρια υλικά ενός ηλιοστάτη γυαλιού/μετάλλου είναι κατά 87% προϊόντα χάλυβα και καθρέπτες. Η ανακλαστική επιφάνεια βρίσκεται πίσω από ένα διαφανές υπόστρωμα. Η δομή της αποτελείται από μία στήριξη από χάλυβα, ένα συγκολλητικό στρώμα, ένα προστατευτικό στρώμα από χαλκό, μία στρώση από ανακλαστικό ασήμι και ένα προστατευτικό στρώμα από χοντρό γυαλί. Το ανακλαστικό υλικό πρέπει να αντανακλά τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες και οι οπτικές ιδιότητές του έχουν μεγάλη σημασία. Η ανάκλαση πρέπει να είναι ανεξάρτητη από την ατμοσφαιρική υγρασία και θερμοκρασία, την υπεριώδη ακτινοβολία, και γενικά άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Για την επιλογή του ανακλαστικού υλικού πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος και η διαθεσιμότητά του.

Τις καλύτερες επιδόσεις από τα ανακλαστικά μέταλλα έχουν το αλουμίνιο και το ασήμι με ηλιακή ανάκλαση μεγαλύτερη από 0.9. Το υλικό που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την επιφάνεια ανάκλασης είναι το ασήμι εξαιτίας της υπάρχουσας εμπειρίας από τη βιομηχανία καθρεπτών και εξαιτίας της ανεπιθύμητης ζώνης απορρόφησης του αλουμινίου. Σε γενικές γραμμές η ηλιακή ανάκλαση κυμαίνεται από 0.95 σε 0.97 για επιφάνειες ασημιού μετά από σωστή επεξεργασία.[21]

Μια σημαντική ανησυχία είναι η τάση των επιστρώσεων από ασήμι να διαβρώνονται και να υποβαθμίζονται. Παρατηρήσεις του ηλιοστατικού πεδίου έχουν αποκαλύψει ένα δυνητικά σοβαρό πρόβλημα. Ανακλαστικές επιφάνειες βρέθηκαν να έχουν επιδεινωθεί έπειτα από χρόνους έκθεσης μικρότερους από ένα έτος. Υπάρχουν διαφορετικά είδη επιδείνωσης. Η πιο κοινή μορφή είναι η εμφάνιση μαύρων κηλίδων τυχαία κατανεμημένων οι οποίες συνδέονται με την έλλειψη ή την συσσώρευση χαλκού και ασημιού. Υποβαθμίσεις έχουν επίσης παρατηρηθεί και σε θέματα σχετικά με τα συγκολλητικά υλικά.

Έχουν γίνει πάρα πολλές προσπάθειες για να αναλυθούν οι διαβρωμένες ή υποβαθμισμένες περιοχές προκειμένου να εντοπισθούν οι υπεύθυνοι μηχανισμοί αλλά ακόμα δεν έχουν γίνει κατανοητοί. Μερικές από τις σημαντικότερες παρατηρήσεις είναι : το νερό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, η φύση του συγκολλητικού υλικού είναι αρκετά σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις, ο χαλκός συχνά απουσιάζει πλήρως από υποβαθμισμένες περιοχές και το θειάφι και το χλώριο συνδέονται συχνά με την υποβάθμιση. Ενώ οι έρευνες με στόχο να κατανοηθούν και να εξαλειφθούν οι μηχανισμοί αυτοί συνεχίζονται, ενδιάμεσες λύσεις θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Για παράδειγμα έχουν προταθεί σχέδια στα οποία η ανακλαστική επιφάνεια είναι εντελώς σφραγισμένη από δυναμικά βλαβερά χημικά που βρίσκονται στο περιβάλλον.[21]

Το ανακλαστικό υλικό εναποτίθεται μέσα σε ένα διαφανές γυάλινο υπόστρωμα το οποίο χρησιμεύει ως πρώτο στάδιο προστασίας. Το γυαλί πρέπει να έχει χαμηλή απορροφητικότητα επειδή πιθανές απώλειες ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας της απορρόφησης του γυαλιού επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος και το κόστος. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το γυαλί αποδίδεται σε προσμίξεις σιδήρου. Η πιο απλή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η εξάλειψη του σιδήρου ως πρόσμιξη. Δυστυχώς όμως ο σίδηρος είναι μια κοινή πρόσμιξη σε πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή γυαλιών. Με τη συνετή επιλογή των υλικών για τη παραγωγή γυαλιού μπορεί να μειωθεί η συγκέντρωση σε σίδηρο αλλά δεν μπορεί να εξαλειφθεί. Ωστόσο το γυαλί με μικρή συγκέντρωση σιδήρου είναι εξαιρετικά ακριβό.

Οι απώλειες λόγω απορρόφησης μπορούν επίσης να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση λεπτότερων στρωμάτων γυαλιού. Ένα δεύτερο όφελος που προέρχεται από τη χρήση λεπτού γυαλιού είναι η μείωση του βάρους, που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο κόστος και η αύξηση της ακρίβειας του ηλιοστατικού οδηγού και του μηχανισμού ελέγχου. Ωστόσο το λεπτό γυαλί είναι σχετικά δαπανηρό και μπορεί να αποδεχτεί δύσκολο για να διαχειριστεί σε μεγάλα φύλλα.

Υλικά πρέπει να εφαρμοστούν στην εκτεθειμένη πλευρά της ανακλαστικής επίστρωσης για να τη προστατέψουν από περιβαλλοντικά στοιχεία. Οι τυποποιημένες διαδικασίες περιλαμβάνουν την απόθεση ενός στρώματος χαλκού με τη τεχνική της ηλεκτρόλυσης που ακολουθείται από την εφαρμογή ενός στρώματος βαφής. Όπως σχολιάσαμε παραπάνω αυτή η τεχνική δεν είναι αποτελεσματική για να προστατεύσει από τη διάβρωση και είναι επιτακτική η ανάγκη να προσδιοριστούν περισσότεροι ανθεκτικοί συνδυασμοί υλικών. Μια εναλλακτική μέθοδος θα ήταν να σχεδιαστεί ο καθρέπτης έτσι ώστε να είναι λιγότερο ευαίσθητος στη διείδυση ενοχλητικών σωματιδίων όπως για παράδειγμα με το σφράγισμα των άκρων του. Ωστόσο, είναι πιο ελκυστικό να εντοπιστούν και να χρησιμοποιηθούν υλικά που είναι εγγενώς ανθεκτικά στην υποβάθμιση.

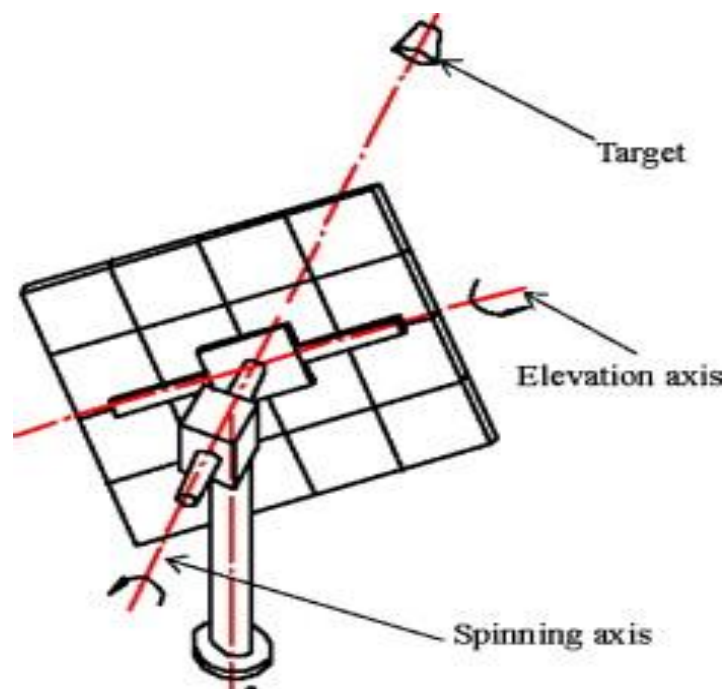
Όσο αφορά τα υλικά στήριξης πρέπει να είναι σταθερών διαστάσεων, ελαφριά και να έχουν χαμηλό κόστος. Υποψήφια υλικά στήριξης είναι το αφρώδες πολυστυρένιο και το αφρώδες γυαλί. Ο καθρέπτης είναι εγκατεστημένος πάνω στη στήριξη με υλικά συγκόλλησης τα οποία μπορεί να αποδειχθούν ως ο αδύναμος κρίκος για την αντοχή του ηλιοστάτη. Παρόλο που ο ρόλος του συγκολλητικού υλικού δεν είναι κατανοητός όσο αφορά τη διάβρωση της ανακλαστικής επιφάνειας, πρόκειται σαφώς για ένα τομέα που αξίζει ιδιαίτερη προσοχή.

Εναλλακτικά σχέδια για τους ηλιοστάτες περιλαμβάνουν έρευνες για σύγχρονα συγκολλητικά υλικά και λεπτά φιλμ που μειώνουν το κόστος και το βάρος της κατασκευής. Κάποια παραδείγματα τέτοιων εναλλακτικών σχεδίων είναι ανακλαστήρες με επαργυρωμένα πολυμερή, ίνες γυαλιού ενισχυμένου πολυεστέρα και επαργιλωμένοι ανακλαστήρες. Προβλήματα που υπάρχουν με αυτά τα πιο καινούρια σχέδια περιλαμβάνουν αποκόλληση των προστατευτικών επιχρισμάτων, μείωση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται σε μεγάλες περιόδους έκθεσης στον ήλιο και υψηλά κόστη παραγωγής.[21]

Συστήματα στήριξης και κίνησης του ηλιοστάτη

Ο κάθε ηλιοστάτης του ηλιοστατικού πεδίου στερεώνεται στο έδαφος με ένα σύστημα δύο πυλώνων ,εγκάρσιων μεταξύ τους. Ο κατακόρυφος πυλώνας πακτώνεται σταθερά μέσα στη γη. Στην ουσία, πρόκειται για τους δύο άξονες ,γύρω από τους οποίους πραγματοποιείται η κίνηση του ηλιοστάτη, για την δεδομένη γωνία ηλιακού ύψους και αζιμούθιου ,κάθε στιγμή.

Ο μηχανισμός κίνησης του ηλιοστάτη είναι υπεύθυνος για την ανεξάρτητη κίνηση τόσο ως προς τη γωνία αζιμούθιου όσο και ως προς τη γωνία ανύψωσης, με τέτοιο τρόπο ώστε οι ανακλαστικές επιφάνειες να ακολουθούν τη θέση του ήλιου και να ανακλούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο δέκτη. Το σύστημα εντοπισμού πρέπει να χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή ακρίβεια.

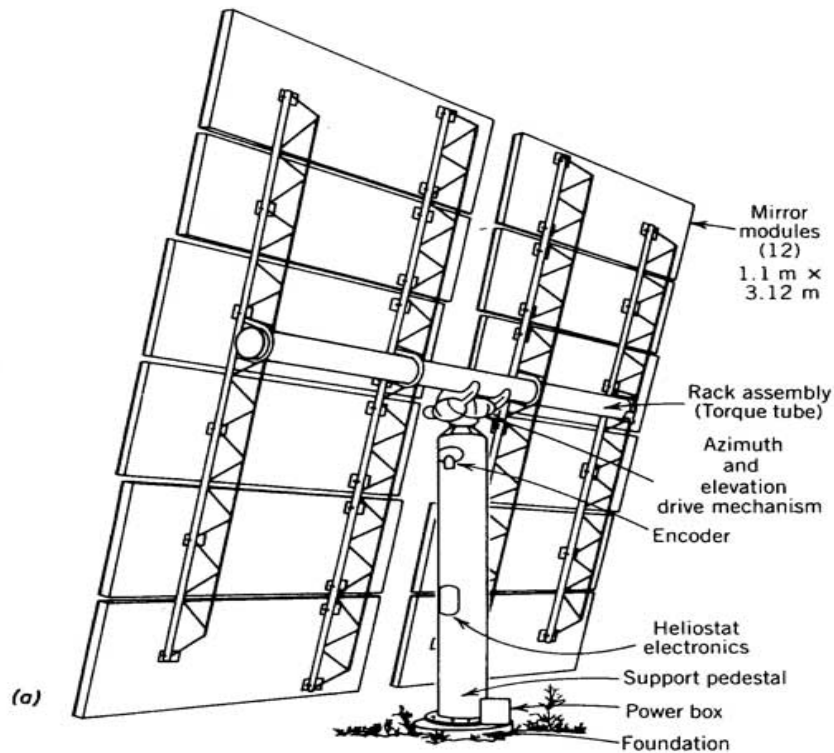


Σχήμα 3.17 Άξονες συστήματος στήριξης-κίνησης (Πηγή : «Structural Design and Analysis of the Toroidal Heliostat». Chuncheng Zang, Zhifeng Wang, Wenfeng Liang and Xiaoyu Wang)

Ο μηχανισμός κίνησης του ηλιοστάτη πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [23]:

- Μέγιστη ακρίβεια κίνησης, ακόμα και για πολύ μικρές μεταβολές της γωνιακής μετατόπισης.
- Ικανότητα εκτέλεσης πολύ αργών κινήσεων, με λόγους μείωσης της τάξης του 40000:1.
- Να είναι στιβαρή κατασκευή ικανή να αντέχει το δικό του βάρος, το βάρος του συστήματος στήριξης καθώς και τα υψηλά ανεμικά φορτία. Ακόμα πρέπει να είναι άκαμπτος ώστε να μην επηρεάζεται από δονήσεις χαμηλών συχνοτήτων
- Ανθεκτικότητα σε συνθήκες εξωτερικού χώρου.
- Δυνατότητα γρήγορης επαναφοράς του ηλιοστάτη στην ανενεργή οριζόντια θέση σε περίπτωση ακατάλληλων καιρικών συνθηκών
- Εύκολη συντήρηση.
- Μικρό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

Το σύστημα κίνησης που συναντάμε πιο συχνά σε διατάξεις αυτού του τύπου χρησιμοποιεί μειωτήρες στροφών με γρανάζι ατέρμονα άξονα τόσο για τον άξονα ανύψωσης όσο και στον άξονα αζιμούθιου. Και οι δυο διατάξεις μειωτήρων είναι απαραίτητο να είναι όμοιοι ως προς το σχήμα των δοντιών τους και του λόγου μείωσης. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει πρώτα ένα πλανητικό σύστημα μειωτήρα το οποίο ακολουθείται από έναν δεύτερο μειωτήρα με χρήση γραναζιών ατέρμονα άξονα, στην έξοδο. Το πλεονέκτημα του πλανητικού συστήματος μειωτήρα στροφών είναι η δυνατότητα για μεγάλους λόγους μείωσης σε περιορισμένο χώρο. Ενώ ο μειωτήρας με ατέρμονα οδοντωτό τροχό παρέχει δυνατότητα για υψηλούς λόγους πίεσης σε μεγάλες ορμές. Ωστόσο οι ατέρμονες κοχλίες χαρακτηρίζονται από μικρότερες αποδόσεις λόγω πιέσεων που οφείλονται στις αυξημένες τριβές. Η πίεση αυτή έχει τελικά θετικό αποτέλεσμα, καθώς το σύστημα κίνησης σταμάτα την κίνηση του, όταν η γωνία τριβής μεταξύ του ατέρμονα άξονα και του οδοντωτού τροχού είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική γωνία σχεδιασμού.



Σχήμα 3.18 Οπίσθια όψη ηλιοστάτη-σύστημα στήριξης (Πηγή : <http://www.powerfromthesun.net/> [18])

1. Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής ενέργειας

Με τον όρο «σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας» αναφερόμαστε σε όλα εκείνα τα υποσυστήματα που θα διατρέξει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιώντας τις απαραίτητες συναλλαγές θερμότητας, εκτελώντας στην ουσία έναν θερμοδυναμικό κύκλο. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις σωληνώσεις, τις αντλίες πίεσης, τα τύμπανα, τον συμπυκνωτή, τον απαεριοτή, τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας, τους αμοστροβίλους και τη γεννήτρια.

Η επιλογή του εργαζόμενου ρευστού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία λειτουργίας του σταθμού και από το μέσο αποθήκευσης της ενέργειας (αν υπάρχει σύστημα αποθήκευσης). Σημαντικά κριτήρια είναι επίσης το κόστος του ρευστού και το πόσο ασφαλές είναι για χρήση σε ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις με υψηλές συνθήκες πίεσης.

Τα επικρατέστερα ρευστά για τη μεταφορά της θερμότητας σε τέτοιες εγκαταστάσεις είναι το νερό-ατμός, τα τετηγμένα άλατα, το υγρό νάτριο, τα θερμικά έλαια και πιο σπάνια ο αέρας.

Το νερό χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, αλλά και μεταγενέστερα (στις εγκαταστάσεις PS10 και PS20 στην Ισπανία). Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει το προτέρημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας, ως ρευστό λειτουργίας στον κύκλο ισχύος ενός αμοστροβίλου, χωρίς την παρουσία ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας, ωστόσο παρουσιάζει προβλήματα ως ρευστό αποθήκευσης ενέργειας λόγω των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσει στη φάση του ατμού.

Το υγρό νάτριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, ενώ βρίσκει χρήση και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης, λόγω της χαμηλής τάσης ατμών στην υγρή φάση. Ωστόσο, στερεοποιείται σε θερμοκρασία 100°C, επομένως απαιτεί θέρμανση κατά την αποθήκευσή του.

Τα θερμικά έλαια έχουν αρκετά μεγάλη παράδοση στη μεταφορά θερμικού φορτίου και κατέχουν τη μερίδα του λέοντος στα εν λειτουργία υβριδικά συστήματα. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους είναι ότι έχουν τη χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς αποδομούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 425°C και έτσι περιορίζουν το βαθμό απόδοσης. Άλλα μειονεκτήματα είναι η πιθανότητα ανάφλεξης σε περίπτωση διαρροής και το υψηλό κόστος προμήθειας. Ωστόσο εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της χαμηλής τους τάσης ατμών, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν και σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός.

Μια αξιόπιστη επιλογή είναι η χρήση τηγμένων αλάτων διότι μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασία πάνω από 450°C και πίεση 100 bar αντίστοιχα. Το πιο διαδεδομένο είναι το λεγόμενο ηλιακό άλας με σύνθεση Ni 60%-Κα 40% το κόστος του οποίου είναι αρκετά χαμηλότερο από των ελαίων και βρίσκει ευρεία εφαρμογή τόσο στην τεχνολογία του ηλιακού πύργου ισχύος όσο και στα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας. Βασικό τους μειονέκτημα είναι η υψηλή θερμοκρασία τήξεως γεγονός που υποχρεώνει τη χρήση αντιστάσεων για τη διατήρησή τους σε ρευστή κατάσταση τις ώρες απουσίας ηλιοφάνειας.

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής και συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής και περιγράφονται παρακάτω.

Σύστημα Άμεσης Ατμοπαραγωγής (Direct Steam Generation –DSG) [26]

Πρόκειται για ένα σύστημα που ακόμα βρίσκεται στα αρχικά του βήματα, καθώς δοκιμάστηκε σε πειραματικούς σταθμούς την τελευταία μόλις δεκαετία.

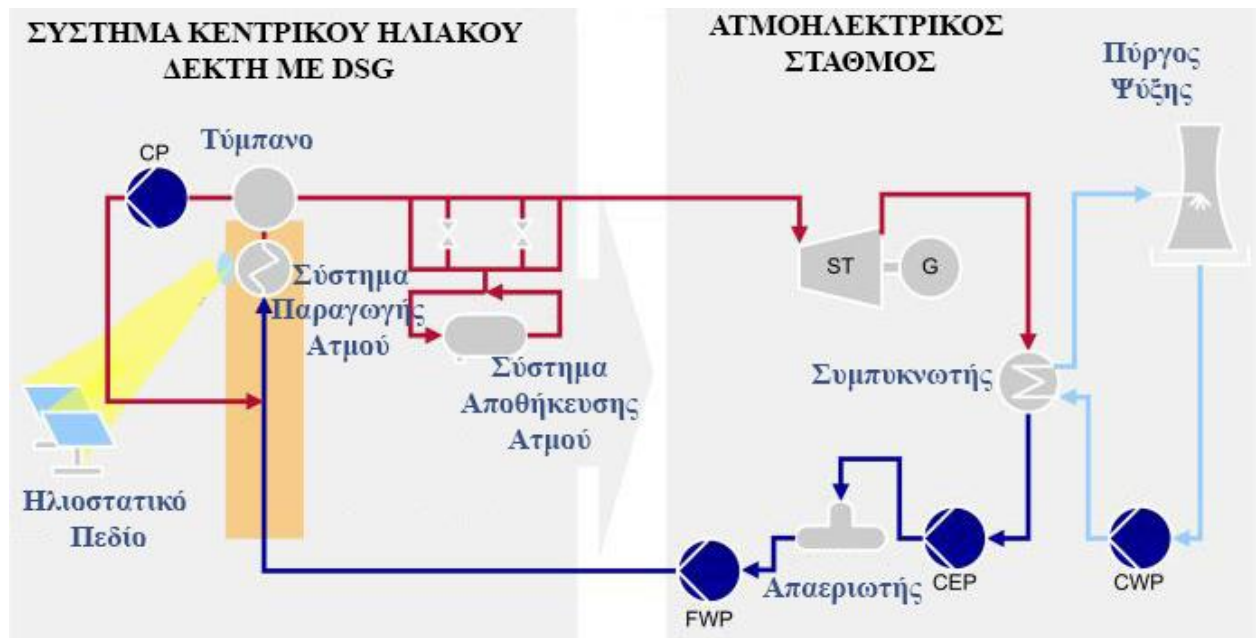
Στα συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής, όλο το μήκος των σωληνώσεων διαρρέεται αποκλειστικά από νερό-ατμό. Ο ατμός παράγεται άμεσα στην έξοδο του ηλιακού δέκτη, καθώς το νερό που φτάνει στις σωληνώσεις του αλλάζει φάση, απορροφώντας τη θερμότητα που αναπτύσσεται εκεί από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Ο κορεσμένος, ή και σε πολλές περιπτώσεις υπέρθερμος, ατμός, στη συνέχεια, εκτονώνεται απ' ευθείας στο στρόβιλο ,παράγοντας μηχανικό έργο και κατ' επέκταση ηλεκτρικό ρεύμα στη γεννήτρια. Αφότου αποτονωθεί, ο ατμός υφίσταται συμπίκνωση ,σε έναν αερόψυκτο ή υδρόψυκτο συμπυκνωτή, και υγροποιείται ξανά. Το τροφοδοτικό νερό μπορεί να προθερμαίνεται έπειτα, μέσω ενός συστήματος απομαστεύσεων ατμού και εναλλακτών θερμότητας, πριν συμπιεστεί από αντλία, στην πίεση λειτουργίας του σταθμού, για να ανέβει και πάλι προς τις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη.

Το σύστημα DSG παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα :

- Δεν έχουμε την παρεμβολή εναλλακτών, άρα λιγότερες απώλειες
- Μεγάλη εμπειρία γύρω από τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του νερού-ατμού ως εργαζόμενο μέσο σε κυκλώματα ατμοπαραγωγής
- Το νερό ως εργαζόμενο μέσο έχει χαμηλό σημείο τήξης και φθινό κόστος
- Δυνατότητα παραγωγής ατμού θερμοκρασίας πάνω από 500°C
- Χαμηλό κόστος συντήρησης των κυκλωμάτων.

Στα αρνητικά :

- Καταπόνηση των σωληνώσεων από το νερό, λόγω υψηλών πιέσεων
- όχι ιδιαίτερα αποδοτικό μέσο για αποθήκευση θερμότητας
- δεν έχει ακόμα εξακριβωθεί η δυνατότητα εφαρμογής της σε σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη



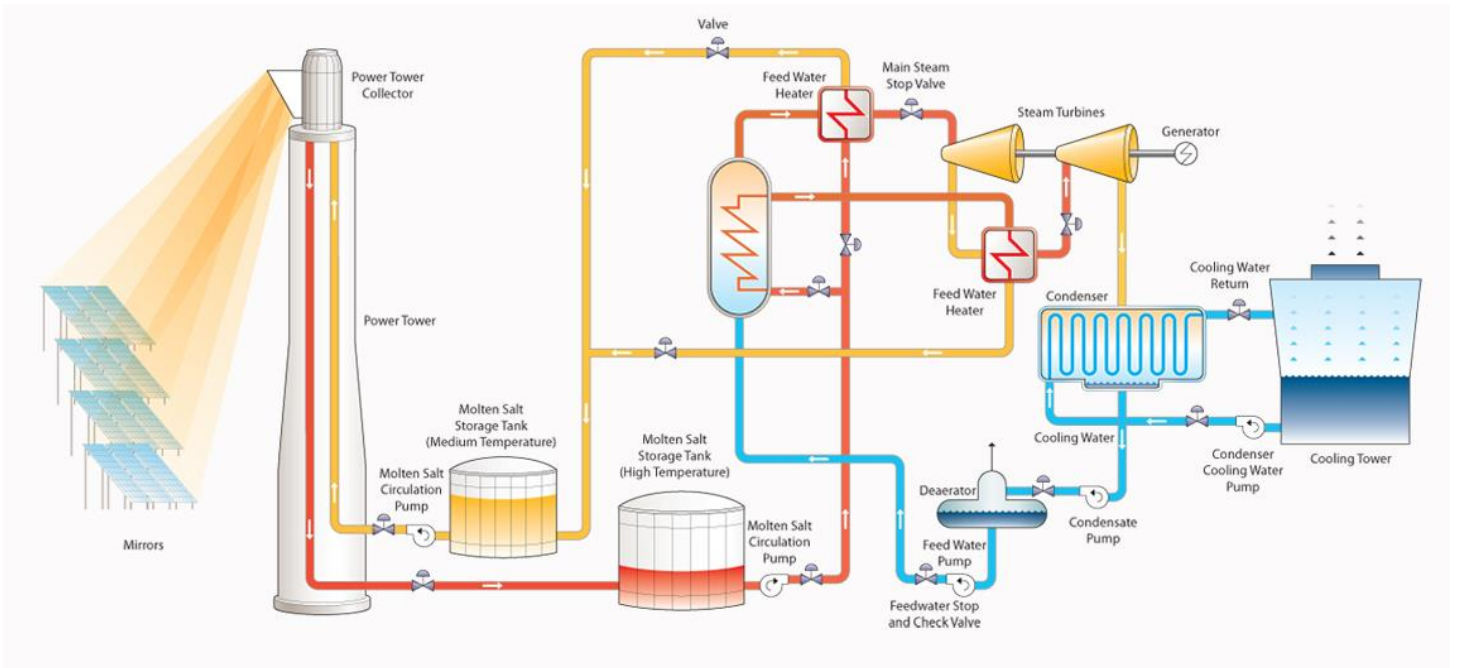
Σχήμα 3.19 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Άμεση Ατμοπαραγωγή

Σύστημα Έμμεσης Ατμοπαραγωγής

Στο σύστημα έμμεσης ατμοπαραγωγής έχουμε δυο ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα που διατρέχουν ανεξάρτητα κυκλώματα και συνδέονται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Από τη μια είναι το κύκλωμα του κεντρικού ηλιακού δέκτη και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που σκοπό έχει να μεταφέρει τη συγκεντρωμένη θερμική ενέργεια μέσω των σωληνώσεων προς τον εναλλάκτη θερμότητας. Από την άλλη είναι το σύστημα της ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης που διαρρέεται από νερό-ατμό. Η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται στον εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος είναι υπεύθυνος και για την ατμοπαραγωγή.

Αφού εισέλθει στον εναλλάκτη, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας ψύχεται και αντλείται στην κορυφή του πύργου, στις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη για να θερμανθεί ξανά. Σε εγκατάσταση όπου γίνεται χρήση συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διέρχεται πρώτα από τη δεξαμενή αποθήκευσης.

Το νερό αφού ατμοποιηθεί, εισέρχεται πλέον ως υπέρθερμος ατμός στο κύκλωμα της εγκατάστασης και εκτελεί τις ίδιες μεταβολές που περιγράψαμε στο σύστημα DSG, εκτελώντας δηλαδή έναν πλήρη θερμοδυναμικό κύκλο. Οι τελικές μεταβολές περιλαμβάνουν τη συμπύκνωση και συμπίεση του νερού από μια αντλία προτού εισέλθει και πάλι στον εναλλάκτη θερμότητας.



Σχήμα 3.20 Σύστημα έμμεσης ατμοπαραγωγής με δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας
(Πηγή : www.greenovg.com)

3.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη αποτελεί την πιο υποσχόμενη τεχνολογία στην κατηγορία των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Προς το παρόν μπορεί η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων να είναι πιο διαδεδομένη και να εξακολουθεί να θεωρείται η πιο σημαντική τεχνολογία στο εγγύς μέλλον, αλλά αυτό αναμένεται να αλλάξει μακροπρόθεσμα. Ήδη τα συστήματα ηλιακού πύργου ισχύος αυξάνουν συνεχώς το μερίδιό τους στην παραγωγή ενέργειας διότι παρουσιάζουν περισσότερες δυνατότητες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλότερο κόστος. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά από πλεονεκτήματα που συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Δυνατότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών: Όπως ήδη αναφέραμε χάρη στους πολύ υψηλούς λόγους συγκέντρωσης της ακτινοβολίας (500 –1000 ήλιους, έναντι 80 ήλιων για τα παραβολικά κάτοπτρα) και θερμοκρασίες, που περιορίζονται μόνο από τη θερμική αντοχή των υλικών του δέκτη . Ο υψηλός λόγος συγκέντρωσης, με τη σειρά του, επιτρέπει στο εργαζόμενο μέσο να αποκτά υψηλές θερμοκρασίες στον δέκτη, γεγονός που αυξάνει και τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.
- 2) Δυνατότητα κίνησης των κατόπτρων σε δύο άξονες [27]: Ο εντοπισμός της τροχιάς του ήλιου γίνεται σε δύο άξονες, καθώς οι ηλιοστάτες δύνανται να περιστρέφονται τόσο γύρω από τον κατακόρυφο, όσο και τον οριζόντιο άξονα. Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες συνημιτόνου, καθώς τα κάτοπτρα παρακολουθούν

επακριβώς την ηλιακή κίνηση. Ακόμα και σε χαμηλές γωνίες ηλιακού ύψους επιτυγχάνονται σημαντικά υψηλότεροι λόγοι συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη, σε σχέση με τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα μονού άξονα, όπως τα παραβολικά.

- 3) Δυνατότητα Υβριδισμού [25]: Οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να ενσωματωθούν σε ήδη υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές μονάδες, λειτουργώντας έτσι σε έναν συνδυασμένο κύκλο, παρέχοντας θερμότητα μέσω εναλλακτών, ή με απευθείας έγχυση ατμού. Με χρήση νέων κεραμικών υλικών και ογκομετρικών δεκτών, οι ηλιακοί πύργοι θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (καθώς μπορούν να επιτευχθούν και θερμοκρασίες άνω των 1000°C), όπως η παραγωγή υδρογόνου και η συνεργασία με κύκλο αεριοστροβίλου Brayton υψηλών θερμοκρασιών.
- 4) Δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης [25]: Οι εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων μπορούν να σχεδιαστούν έτσι, ώστε μέρος του ρευστού μεταφοράς θερμότητας να αποθηκεύεται σε μία ή περισσότερες δεξαμενές για χρήση στον κύκλο ισχύος, όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή κατά τις νυχτερινές ώρες, αυξάνοντας τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνουν καθιστούν δυνατή την άμεση χρήση ρευστών με εξαιρετικές δυνατότητες αποθήκευσης, όπως είναι τα τήγματα νιτρικών αλάτων. Τέλος, λόγω της υψηλής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας αποθήκευσης απαιτείται μικρότερη μάζα αποθήκευσης, άρα μικρότερη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης και κατά συνέπεια λιγότερο κόστος.
- 5) Συγκριτικά μικρές θερμικές απώλειες και ιδιοκαταναλώσεις : Το σύστημα πύργου ηλιακής ισχύος διαθέτει συνολικά σύστημα σωληνώσεων μικρότερου μήκους και καλύτερα μονωμένο σε σχέση με το σύστημα παραβολικών κατόπτρων. Έτσι παρουσιάζει μικρότερες θερμικές απώλειες. Παράλληλα η αντλία που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση του εργαζόμενου ρευστού στο δέκτη, καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από την αντίστοιχη αντλία στο σύστημα παραβολικών κατόπτρων που πρέπει να διακινήσει το εργαζόμενο ρευστό σε ολόκληρο το σύστημα σωληνώσεων του συστήματος.

Όπως είναι φυσικό το σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα [28] :

- 1) Κόστος : Οι οικονομικές μελέτες δείχνουν ότι το σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος είναι δεν είναι οικονομικά αποδοτικό για εγκαταστάσεις με ισχύ μικρότερη από 30MW. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας το κόστος παραγωγής των υποσυστημάτων αναμένεται να μειωθεί σημαντικά.
- 2) Απαίτηση για σημαντικές εκτάσεις: Συνήθως, η επιφάνεια των ηλιοστατών είναι ιδιαίτερα υψηλή σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η πραγματική έκταση που καταλαμβάνουν οι συλλέκτες είναι πολλές φορές

υπερδιπλάσια της επιφάνειάς τους (ώστε να περιορίζονται οι απώλειες σκίασης), αυξάνει το κόστος κεφαλαίου και περιορίζει την εγκατάστασή τους σε περιοχές όπου τέτοιες εκτάσεις είναι διαθέσιμες.

- 3) Απαίτηση Νερού [27]: Τα ηλιοστατικά πεδία χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες νερού (κυρίως για τον καθαρισμό των ηλιοστατών), το οποίο είναι πρόβλημα σε ερημικές περιοχές. Χρησιμοποιώντας ψύξη χωρίς νερό έχουμε μεγάλη αύξηση του κόστους των εγκαταστάσεων CSP. Σαν λύση έχει προταθεί η χρήση θαλασσινού νερού, ωστόσο μένει να δούμε αν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί αυτή τη λύση, καθώς αυτό θα σήμαινε την κατασκευή σταθμών πολύ κοντά στην ακτογραμμή.
- 4) Οπτική ενόχληση : Το ύψος του ηλιακού πύργου συχνά ξεπερνάει τα 100m, ενώ και οι ηλιοστάτες συχνά έχουν ύψος κοντά στα 10m. Το μόνο σίγουρο είναι ότι ένα σύστημα ηλιακού πύργου δεν περνάει απαρατήρητο. Ευτυχώς οι γνώμες του κόσμου σχετικά με την οπτική ενόχληση ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι αποθαρρυντικές.
- 5) Πρόκληση κινδύνου σε πανίδα [29]: Δυστυχώς σε διάφορους σταθμούς ηλιακού πύργου παρατηρήθηκε το φαινόμενο θανάτου σε είδη πουλιών που πετούσαν στη γύρω περιοχή. Πράγμα λογικό αν αναλογιστεί κανείς τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κοντά στο δέκτη. Σύμφωνα με τους ειδικούς τα πουλιά ενδεχομένως να χάνουν την όραση τους όταν πετούν κοντά στην επιφάνεια του δέκτη, η οποία έχει έντονη φωτεινότητα λόγω της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να πέφτουν πάνω στους ηλιοστάτες.

3.2.3 Πύργοι ηλιακής ισχύος ανά την υφήλιο

Προκειμένου να δοκιμασθεί τεχνολογικά η τεχνολογία του ηλιακού πύργου ισχύος κατασκευάστηκαν σε διάφορες χώρες του κόσμου αρκετοί πειραματικοί σταθμοί. Η περίοδος δοκιμών ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '80 και διήρκησε περισσότερο από 10 χρόνια. Χάρη σε αυτές τις εγκαταστάσεις εξελίχτηκε και ωρίμασε η τεχνολογία του κεντρικού ηλιακού δέκτη, αφού εκεί αποδείχθηκε η τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα της τεχνολογίας. Οι κυριότερες από αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΧΩΡΑ	MW	ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ
SSPS	Spain	0,5	1981
EURELIOS	Italy	1	1981
SUNSHINE	Japan	1	1981
Solar One	USA	10	1982
CESA-1	Spain	1	1983
MSEE/Cat B	USA	1	1984
THEMIS	France	2,5	1984
SPP-5	Russia	5	1986
TSA	Spain	1	1993
Solar Two	USA	10	1996

Πίνακας 3.1 Λίστα πειραματικών σταθμών τεχνολογίας ηλιακού πύργου (Πηγή <http://www.nrel.gov/>)

Όπως βλέπουμε και στον πίνακα 3.1 , ένας από τους πρώτους σταθμούς με τεχνολογία ηλιακού πύργου που ανέδειξε τη δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ήταν η εγκατάσταση Solar One στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η εγκατάσταση αποτελούνταν από 1818 ηλιοστάτες, εμβαδού ανακλαστικής επιφάνειας 39m² ο καθένας και από ηλιακό πύργο ύψους 91m. Η εγκατάσταση παρήγαγε ατμό σε θερμοκρασία 516°C, και είχε μέγιστη θερμική ισχύ 42MW. Αρκετά χρόνια αργότερα, ετέθη σε λειτουργία ο σταθμός Solar Two, βασισμένος στο σχεδιασμό Solar One. Ο πύργος, ο ατμοστρόβιλος και το πεδίο ηλιοστατών του Solar One δε δέχθηκαν σημαντικές τροποποιήσεις, αλλά ο δέκτης και το σύστημα αποθήκευσης επανασχεδιάστηκαν ώστε να κάνουν χρήση τήγματος νιτρικών αλάτων, κάτι που βελτίωσε σημαντικά την απόδοση και τη δυνατότητα του συστήματος να παράγει ισχύ και κατά τις ώρες που δεν υπήρχε ηλιοφάνεια.

Οι σταθμοί Solar One και Solar Two αποτέλεσαν το έναυσμα για το σχεδιασμό και υλοποίηση των πρώτων εμπορικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με τεχνολογία κεντρικού ηλιακού δέκτη. Σήμερα υπάρχουν 17 τέτοιοι σταθμοί και άλλοι τόσοι περίπου βρίσκονται

σε φάση κατασκευής ή σχεδιασμού (έως Σεπτέμβριο του 2015). Οι σταθμοί που βρίσκονται σε λειτουργία έχουν αθροιστική ισχύ σχεδόν 500MW, οπότε καταλαβαίνει εύκολα κανείς τι προοπτικές μας δίνει σαν τεχνολογία.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΧΩΡΑ	MW
Acme Rajasthan Solar Power 1	India	2.50
BrightSource SEDC	Israel	6.00
Chevron/ BrightSource Coalinga	USA	29.00
CSIRO Solar Field 1	Australia	0.50
CSIRO Solar Field 2	Australia	1.00
Dahan Power Plant	China	1.00
Gemasolar	Spain	20.00
Greenway CSP Tower	Turkey	5.00
Ivanpah Solar Electric Generating Station I	USA	126.00
Ivanpah Solar Electric Generating Station II	USA	133.00
Ivanpah Solar Electric Generating Station III	USA	133.00
Jülich	Germany	1.50
Lake Cargelligo	Australia	3.00
PÉGASE	France	1.30
PS10	Spain	11.00
PS20	Spain	20.00
SierraSunTower	USA	5.00

Πίνακας 3.2 Λίστα σταθμών ηλιακού πύργου σε λειτουργία (Πηγή: <http://www.nrel.gov/>)

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΧΩΡΑ	MW
Ashalim Plot B	Israel	121.00
Atacama-1 (Planta Solar Cerro Dominador)	Chile	110.00
Golmud (Qinghai CSP Group)	China	200.00
Jemalong Solar Thermal Station	Australia	6.00
Khi Solar One	South Africa	50.00
Noor III	Morocco	150.00
Supcon	China	50.00
TIA Helio100	South Africa	0.10

Πίνακας 3.3 Λίστα σταθμών ηλιακού πύργου υπό κατασκευή (Πηγή: <http://www.nrel.gov/>)

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΧΩΡΑ	MW
Atacama-2 (Planta Solar Cerro Dominador)	Chile	110.00
Dervish CSP Plant (IRCC)	Turkey	50.00
Kiwano Solar Power Plant (Eskom)	South Africa	100.00
M.I.N.O.S. CSP	Greece	50.00
Qhinghai Tower	China	10.00
Qinghai Delingha CSP Generation Project (Unit 2)	China	135.00
Redstone CSP Project	South Africa	100.00
Vallermosa	Italy	20.00

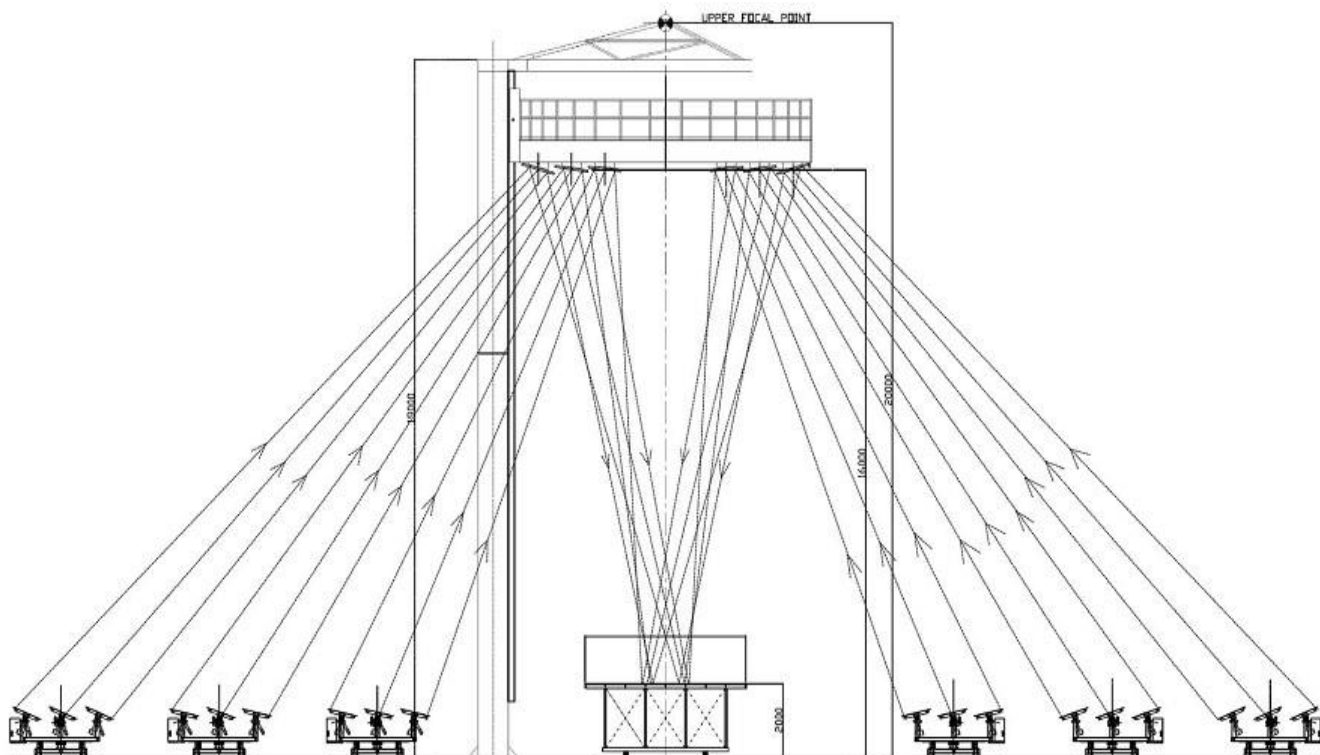
Πίνακας 3.4 Λίστα σταθμών ηλιακού πύργου σε φάση σχεδιασμού (Πηγή: <http://www.nrel.gov/>)

3.2.4 Πεδίο ηλιοστατών με κεντρικό Ανακλαστήρα (Beam Down Optics)

Μία διαφορετική προσέγγιση στο σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη αποτελεί το πεδίο ηλιοστατών με κεντρικό ανακλαστήρα. Η ανάγκη για χρήση λιγότερων ηλιοστατών ήταν η γενεσιουργός αιτία αυτού του σχεδιασμού που βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Τα βασικά μέρη του συστήματος είναι το πεδίο των ηλιοστατών, ο κεντρικός ανακλαστήρας και ο κεντρικός ηλιακός δέκτης.

Παρότι ανήκει στην ίδια κατηγορία με το σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος, η βασική αρχή λειτουργία τους διαφέρει. Σε αυτό το σύστημα η συλλογή της ηλιακής ενέργειας δεν γίνεται σε δέκτη που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου, αλλά σε δέκτη που βρίσκεται στο κατώτερο εστιακό σημείο κοντά στο έδαφος. Πρόκειται για εφαρμογή της οπτικής Cassegrain, που εφαρμόζεται κυρίως σε τηλεσκόπια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21, αφού η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρωθεί στο πρώτο κομβικό σημείο (F1) θα κατευθυνθεί προς το κατώτερο εστιακό σημείο (F2). Υπάρχουν τρεις διαμορφώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν [30]:

1. Χρήση ελλειπτικού δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Αυτή η σχεδίαση απαιτεί την τοποθέτηση του ανακλαστήρα ακόμη υψηλότερα από το σημείο (F1), πετυχαίνει υψηλό βαθμό συγκέντρωσης αλλά αυξάνεται το κόστος κατασκευής.
2. Τοποθέτηση δευτερεύοντα ανακλαστήρα με υπερβολοειδές σχήμα ανάμεσα στα σημεία (F1) και (F2).
3. Τοποθέτηση επίπεδου ανακλαστήρα ακόμα χαμηλότερα από το σημείο της 2^{ης} περίπτωσης, δηλαδή ακόμα πιο κοντά στο σημείο (F2).



Σχήμα 3.21 (Πηγή: [31])

Επικρατέστερη φαίνεται να είναι η δεύτερη περίπτωση. Συνήθως ως δευτερεύοντας ανακλαστήρας τοποθετείται μια σειρά από επίπεδα κάτοπτρα που προσεγγίζουν γεωμετρικά την καμπύλη μιας υπερβολής. Τα κάτοπτρα αντανακλούν την ακτινοβολία πίσω προς το κάτω σημείο εστίασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.21. Η χρήση πολλαπλών κατόπτρων αντί για έναν ενιαίο καθρέπτη υπερβολοειδούς σχήματος έχει το πλεονέκτημα καλύτερης αντοχής απέναντι σε ανεμικά φορτία, της μείωσης του κόστους παραγωγής και της παροχής φυσικού δροσισμού για τα κάτοπτρα μειώνοντας έτσι τις θερμικές καταπονήσεις.

Το σύστημα κεντρικού ανακλαστήρα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, με το σημαντικότερο να είναι η τοποθέτηση του δέκτη και των σωληνώσεων του στο έδαφος. Αυτό κάνει την πρόσβαση για τον έλεγχο του και την συντήρησή του ευκολότερη. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης δεκτών κοιλότητας. Με δεδομένο ότι όλη η ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στο δέκτη από μια στενή γωνία μικρότερη από 20° , οι δέκτες κοιλότητας είναι ιδανική επιλογή για τέτοια διαμόρφωση. Έτσι έχουμε μειωμένες θερμικές απώλειες και κατά συνέπεια επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες.[31]

Παρόλα τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε παραπάνω, το πεδίο ηλιοστατών με χρήση κεντρικού ανακλαστήρα έχει αρκετά εμπόδια να ξεπεράσει προτού θεωρηθεί τεχνολογικά αξιόπιστο. Μερικά από τα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι : οι απώλειες που προκύπτουν λόγω της διπλής αντανάκλασης, η μηχανική ακεραιότητα του κεντρικού ανακλαστήρα απέναντι σε ανεμικά φορτία σε σχέση με τους ηλιακούς πύργους ισχύος, η διάχυση της συγκεντρωμένης δέσμης ακτινοβολίας λόγω της επιπλέον απόστασης που πρέπει να καλύψει και τέλος η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου που δεν έχει βελτιστοποιηθεί ακόμα.

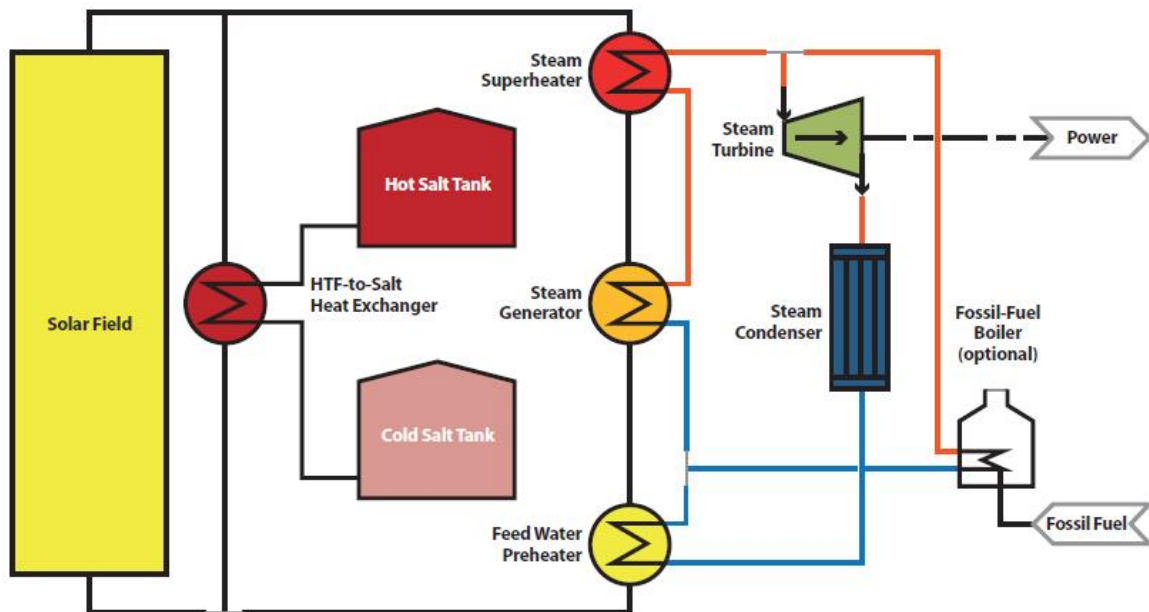
3.3 Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Οι τεχνολογίες CSP αρχικά δεσμεύουν την ηλιακή ενέργεια ως θερμότητα και έτσι υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης αυτής την θερμότητας για ένα χρονικό διάστημα προτού χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αποδόσεις των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι πολύ υψηλές, της τάξης του 95% ή και υψηλότερες, γεγονός που καθιστά την επιλογή αποθήκευσης για CSP πολύ πιο ελκυστική επιλογή σε σύγκριση π.χ. με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρειάζονται μπαταρίες για την εφαρμογή αποθήκευσης.

Η χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας μιας εγκατάστασης CSP μπορεί να εκφραστεί με βάση τον αριθμό ωρών που η μονάδα μπορεί να λειτουργεί στην ισχύ του σημείου σχεδιασμού της χρησιμοποιώντας μόνο τη θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης. Για παράδειγμα, η θερμική αποθήκευση των έξι ωρών σημαίνει ότι το εργοστάσιο CSP μπορεί να λειτουργήσει για έξι ώρες σε ονομαστική ισχύ του χρησιμοποιώντας μόνο τη θερμική ενέργεια από το σύστημα αποθήκευσης (χωρίς ενέργεια από το ηλιακό πεδίο). Λαμβάνοντας υπόψη το σημαντικό πλεονέκτημα της αποθήκευσης ενέργειας που μας παρέχουν οι τεχνολογίες αυτές θα περιγράψουμε τα συνηθέστερα συστήματα αποθήκευσης που συναντάμε καθώς και τα πλεονεκτήματα που μας παρέχουν.

Βραχυπρόθεσμη αποθήκευση θερμικής ενέργειας [21,32]

Δύο τύποι βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας σε σταθμούς CSP είναι ήδη σε εμπορική χρήση. Ο πρώτος εκμεταλλεύεται την εγγενή θερμική αδράνεια του υγρού μεταφοράς θερμότητας, ειδικά στις σωληνώσεις συστήματος παραβολικών κοίλων συλλεκτών. Αυτή η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση είναι σημαντική για την απόσβεση των διακυμάνσεων της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται με τις βραχυπρόθεσμες διαταραχές όπως περαστικά σύννεφα. Ο δεύτερος τύπος βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης χρησιμοποιεί συσσωρευτές ατμού (δοχεία υπό πίεση που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ατμού). Αυτοί οι συσσωρευτές είναι ιδανικοί για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση και έχουν το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν ένα συνηθισμένο, φθινό μέσο αποθήκευσης. Ωστόσο επειδή αυτή η επιλογή απαιτεί δεξαμενές υπό πίεση, η αποθηκευτική της ικανότητα είναι περιορισμένη- της τάξης της μιας ώρα αποθήκευσης. Επιπλέον, οι συσσωρευτές ατμού έχουν το μειονέκτημα ότι είναι αναποτελεσματικοί και δεν παράγουν ατμό σταθερής πίεσης. Ο σταθμός PS10 στην Ισπανία χρησιμοποιεί τέσσερις συσσωρευτές ατμού για να παρέχει 20MWh αποθήκευσης.



Σχήμα 3.22 Σύστημα έμμεσης ατμοπαραγωγής δυο δεξαμενών (Πηγή : www.nrel.gov)

Μακροπρόθεσμη αποθήκευση θερμικής ενέργειας [21,32]

Το σχήμα 3.22 απεικονίζει τη βασική στρατηγική για μακροπρόθεσμη αποθήκευση θερμικής ενέργειας στις τεχνολογίες CSP. Συγκεκριμένα, δείχνει ένα διάγραμμα ροής με έμμεσο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με δύο δεξαμενές για ένα σταθμό CSP. Σε αυτό το παράδειγμα, το υγρό θερμό μεταφοράς θερμότητας (HTF) από το ηλιακό πεδίο μπορεί είτε να αποστέλλεται απ' ευθείας για την παραγωγή ατμού ή μπορεί να εκτραπεί προς έναν εναλλάκτη θερμότητας για τη θέρμανση ενός ρευστού αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES), τυπικά ένα τηγμένο άλας. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, το υγρό από τη δεξαμενή κρύου άλας θερμαίνεται καθώς αντλείται προς την δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού άλας. Το υγρό από τη θερμή δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του HTF όταν η παραγωγή από το ηλιακό πεδίο δεν είναι επαρκής.

Η έμμεση αποθήκευση με δύο δεξαμενές χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλούς σταθμούς CSP, συμπεριλαμβανομένου του εργοστασίου Solana στις ΗΠΑ και του εργοστασίου Arenales στην Ισπανία. Το εργοστάσιο Solana έχει έξι ώρες αποθήκευσης και το εργοστάσιο Arenales επτά. Αυτό το έμμεσο σύστημα δύο δεξαμενών αντιπροσωπεύει την τρέχουσα πρακτική στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευκολία λειτουργίας και την ικανότητα πολύ μεγάλες δυνατότητες αποθήκευσης. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα έμμεσης αποθήκευσης με δυο δεξαμενές είναι δαπανηρά και υφίσταται απώλειες αποδοτικότητας λόγω των απωλειών θερμότητας στον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (HTF) και ρευστού αποθήκευσης θερμότητας (TES). Ως αποτέλεσμα, ένας αριθμός άλλων συστημάτων θερμικής αποθήκευσης είναι υπό εξέταση και σε διάφορα στάδια ανάπτυξης.

Η απλούστερη παραλλαγή του έμμεσου συστήματος αποθήκευσης δύο δεξαμενών είναι η άμεση διασύνδεση δύο δεξαμενών, η οποία εξαλείφει τον εναλλάκτη θερμότητας και την άμεση σύνδεση μεταξύ της θερμής και ψυχρής δεξαμενής αποθήκευσης. Αντ' αυτού, η

θερμή και ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης έχουν εισαχθεί απευθείας στο κύκλωμα σωλήνων που προέρχονται από και προς το ηλιακό πεδίο, αντίστοιχα. Εκτός από το προφανές πλεονέκτημα της εξάλειψης της ανάγκης για έναν εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά θερμικής ενέργειας από την HTF στο ρευστό TES, το άμεσο σύστημα δύο δεξαμενών μπορεί να λειτουργήσει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και να αποθηκεύσει μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Αυτά τα δύο πλεονεκτήματα προκύπτουν από τη χρήση τετηγμένων αλάτων, που επιτρέπουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες, για τις δύο λειτουργίες HTF και TES. Η χρήση των τετηγμένων αλάτων έχει το μειονέκτημα ότι πρέπει να εμποδιστεί το αλάτι από το πάγωμα, π.χ. με τη χρήση ηλεκτρικής ιχνηλάτησης στις σωληνώσεις.

Μεταξύ του 1985 και του 1999, οι σταθμοί SEGS στην Καλιφόρνια χρησιμοποίησαν σύστημα αποθήκευσης με άμεση σύνδεση δύο δεξαμενών, αλλά με ένα εύφλεκτο ορυκτέλαιο για HTF και TES αντί για τηγμένο άλας. Έκτοτε αυτό το ρευστό δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί. Οι πιο πρόσφατες μονάδες CSP χρησιμοποιούν το σύστημα άμεσης διασύνδεσης δεξαμενών για αποθήκευση ενέργειας. Για παράδειγμα, ο σταθμός Crescent στη Νεβάδα χρησιμοποιεί ως σύστημα αποθήκευσης τηγμένο άλας σε δύο δεξαμενές άμεσης διασύνδεσης, για θερμική αποθήκευση 10 ωρών.

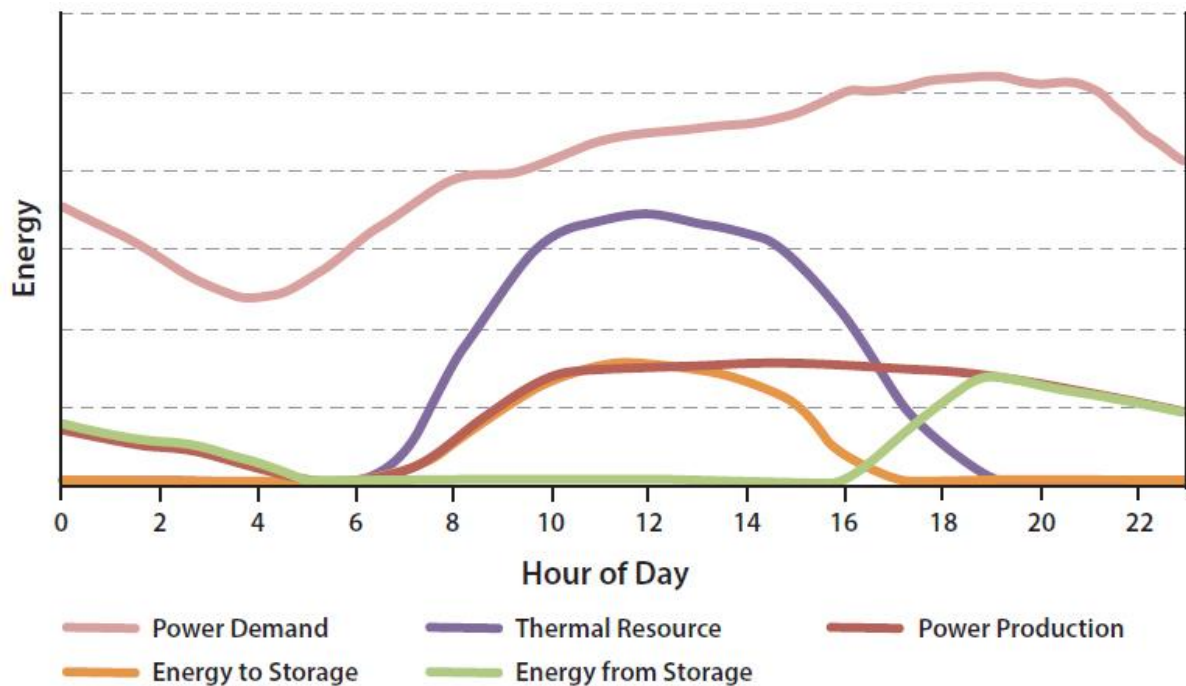
Η χρήση σκυροδέματος ως μέσου αποθήκευσης σε συστήματα παραβολικής σκάφης έχει ερευνηθεί σε μονάδες μικρής κλίμακας. Οι συμπαγείς όγκοι γραφίτη έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο ως υλικό του δέκτη όσο και ως μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ωστόσο αυτή η προσέγγιση περιορίζεται σε σχετικά μικρά συστήματα λόγω του όγκου και του κόστους της απαιτούμενης ποσότητας του γραφίτη.

ΟΦΕΛΗ

Η χρήση συστήματος θερμικής αποθήκευσης ως μέρος του σχεδιασμού του συστήματος CSP αποφέρει πολλά οφέλη, μεταξύ άλλων:

1. δυνατότητα μετασχηματισμού μιας μονάδας CSP από διακοπτόμενη πηγή παραγωγής ενέργειας σε συνεχή
2. την ικανότητα καλύτερης ανταπόκρισης στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας
3. καλύτερη αξιοποίηση και αυξημένη αποδοτικότητα της μονάδας παραγωγής
4. τη δυνατότητα να αυξήσει την ετήσια παράγωγη ισχύος του σταθμού

Το βασικό πλεονέκτημα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε CSP απεικονίζεται στο Σχήμα 3.23 το οποίο συγκρίνει την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια, την πιθανή παραγωγή ενέργειας ενός σταθμού CSP με σύστημα αποθήκευσης και τη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 3.23 Τυπική κατανομή ενεργειακής παραγωγής και ζήτησης σε μια ημέρα
(Πηγή <http://www.solarpaces.org/>)

Το σχήμα απεικονίζει τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης που αναφέρονται παραπάνω. Πρώτον, το σύστημα αποθήκευσης δίνει τη δυνατότητα ενίσχυσης της ηλεκτροπαραγωγής προκειμένου να εξομαλυνθεί η λειτουργία του σταθμού που επηρεάζεται από διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία λόγω περαστικών σύννεφων. Αυτή η εξομάλυνση επιτρέπει στο κύκλωμα του σταθμού να λειτουργήσει σε ένα πιο σταθερό ρυθμό και πιο κοντά στην μέγιστη αποτελεσματικότητα. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για το κύκλωμα ατμοπαραγωγής του σταθμού και χαμηλότερο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE). Δεύτερον, το σύστημα αποθήκευσης καθιστά δυνατή την επέκταση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να καλυφθεί η ευρύτερη περίοδος της αιχμής της ζήτησης και των υψηλότερων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας. Τρίτον, η χρονική στιγμή της μέγιστης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μετατοπιστεί από τη στιγμή της μέγιστης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να καλύψει τη στιγμή που θα προκύψει μέγιστη ζήτηση, ακόμη και με περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης.

Φυσικά, η προσθήκη συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ένα σταθμό CSP δεν είναι δωρεάν. Κατασκευαστικές και λειτουργικές δαπάνες προστίθενται σε εκείνες που συνοδεύουν έτσι κι αλλιώς μια εγκατάσταση χωρίς αποθήκευση. Ως εκ τούτου, οι αποφάσεις για την προσθήκη συστήματος αποθήκευσης σε ένα σύστημα CSP και, σε τι μέγεθος, είναι αντικείμενο τεχνο-οικονομικής βελτιστοποίησης. Σημειώνεται ότι η προσθήκη αποθήκευσης θερμότητας σε ένα σύστημα ηλιακού πύργου προσφέρει μεγαλύτερα οφέλη από τα υπόλοιπα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, επειδή οι ηλιακοί πύργοι προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό σημαίνει ότι μία μικρότερη ποσότητα υγρού TES είναι απαραίτητη για την αποθήκευση του ίδιο ποσού θερμικής ενέργειας.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Concentrating solar power technology principles, developments and applications
- [2] Siting guidelines for concentrating solar power plants in the Sahel- Case study of Burkina Faso
- [3] Garcia, P., 2007. Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur. PhD Thesis, PROMES-CNRS, University of Perpignan, France.
- [4] Meyer R., Hoyer C., Diedrich E., 2005. Use of long-term solar irradiance products derived from satellite for solar power project development.
- [5] Ferrière, A., 2006. Les centrales solaires thermodynamiques. In: Sabonnadière, J., Nouvelles technologies de l'énergie: Les énergies renouvelables, Traité EGEM, Génie électrique.
- [6] Meyer, R., Hoyer, C., Diedrich, E., Schillings, C., Lohmann, S., Schroedter-Homscheidt, M., Buell, R., Trieb, F., 2004. Solar energy mining: a high-quality satellite-based service to provide direct solar radiation for Europe, Brazil, Africa and Asia.
- [7] Kearney, D., Svoboda, P., Nava, P., 1997. Impact of design choices and site influences on solar thermal electric plant economics and performance.
- [8] Al-Soud, M.S., Hrayshat, E.S., 2009. A 50MW concentrating solar power plant for Jordan. Journal of Cleaner Production 17 (6), 625–635.
- [9] Kelly, B., 2006. Nexant Parabolic Trough Solar Power Plant Systems Analysis. Task 2: Comparison of Wet and Dry Rankine Cycle Heat Rejection. Report for January 20, 2005–December 31, 2005, US, 32p.
- [10] Calde/s, N., Varela, M., Santamaría, M., Sa/ez, R., 2009. Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain.
- [11] Hang, Q., Jun, Z., Xiao, Y., Junkui, C., 2008. Prospect of concentrating solar power in China—the sustainable future.
- [12] Effect of wind Speed on the efficiency of the ISCC pp
- [13] «Renewables 2015, Global Status Report», Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2015»
- [14] www.renewableenergyworld.com (Ηλεκτρονικό)
- [15] Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts , Sargent & Lundy LLC Consulting Group Chicago, Illinois
- [16] <http://www.sandia.gov/> (Ηλεκτρονικό)
- [17] <http://energy.gov/eere/sunshot/csp-systems-analysis-0> (Ηλεκτρονικό)

- [18] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter10/chapter10.html#10.1.2%20%20%20Receiver-Tower>
- [19] Alvarez, Romero Manuel. Concentrating Solar Thermal Power. Frank Kreith. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. s.l. : Taylor& Francis Group,LLC, 2007
- [20] Structural Design and Analysis of the Toroidal Heliostat. Chuncheng Zang, Zhifeng Wang, Wenfeng Liang and Xiaoyu Wang
- [21] Patricia Kuntz Falcone. A handbook for solar central receiver design. Sandia National Laboratories, Livermore, December 1986.
- [22] Vogel,W. Henry Calb. Large-Scale Solar Thermal Power Plants. s.l. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010
- [23] Stretched-Membrane Heliostat Technology, L. M. Murphy, J. Sol. Energy Eng 108(3), 230-238 (Aug 01, 1986)
- [24] RE<C: Heliostat Control and Targeting (google.org) (Ηλεκτρονικό)
- [25] http://www.solarpaces.org/images/pdfs/solar_tower.pdf
- [26] Eduardo Zarza, CIEMAT-Plataforma Solar de Almeria.
«Overview on Direct Steam Generation (DSG) and Experience at the Plataforma Solar de Almeria (PSA)»
- [27] Geyer Dr.Michael. Concentrated Solar Thermal Power-Now! s.l.: SolarPaces, September 2005
- [28] <http://www.greenworldinvestor.com/2011/07/07/advantages-and-disadvantages-of-solar-thermal-energy-power-towersparabolic-troughs/> (Ηλεκτρονικό)
- [29] <http://www.natureworldnews.com/articles/12918/20150223/solar-farm-set-hundreds-birds-ablaze.htm> (Ηλεκτρονικό)
- [30] The Beam-Down Solar Thermal Concentrator: Experimental Characterization and Modeling. Marwan Basem Mokhtar,© 2011 Masdar Institute of Science and Technology
- [31] H. Hasuike, M. Yuasa, H. Wada, K. Ezawa, K. Oku, T. Kawaguchi, N. Mori, W.Hamakawa, H. Kaneko, and Y. Tamaura, “Demonstration of Tokyo Tech Beam-Down Solar Concentration Power System in 100kW Pilot Plant,” Proceedings of 15th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Germany: 2009
- [32] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana Lázaro, Pablo Dolado, Belén Zalba, Luisa F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010),31–55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ & ΥΒΡΙΔΙΣΜΟΣ

4.1 Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας

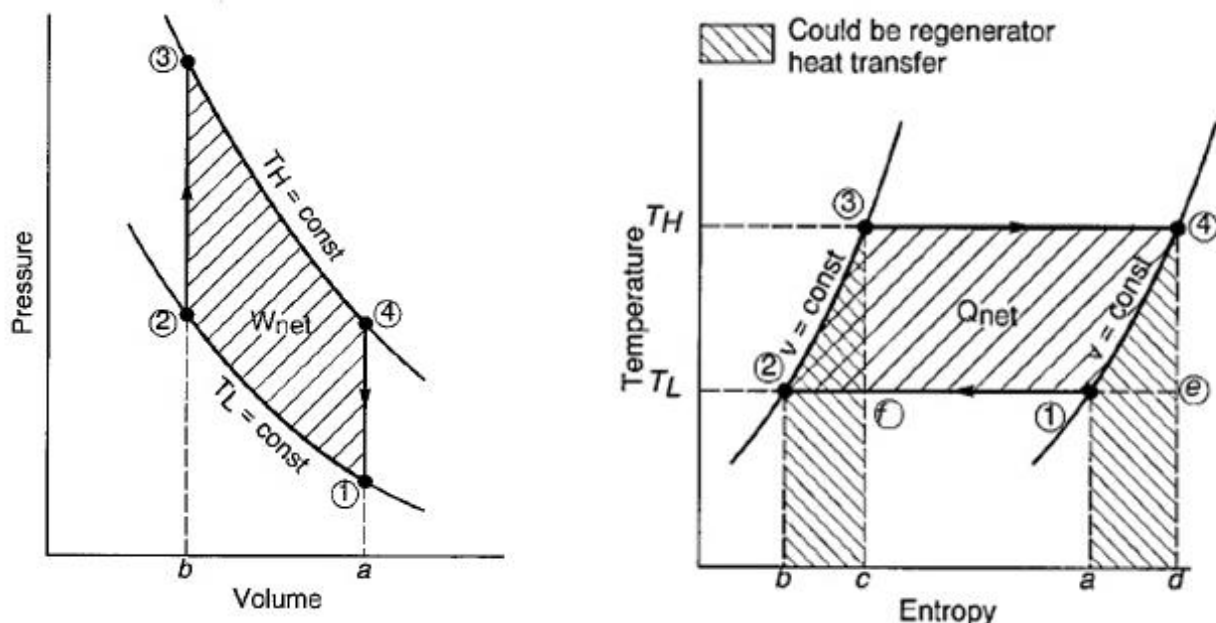
Στο κεφάλαιο 3 αναφέραμε τις διαθέσιμες τεχνολογίες οι οποίες συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν σε άλλη μορφή ενέργειας. Κοινό χαρακτηριστικό των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι η πρόσδοση θερμότητας σε ένα εργαζόμενο μέσο. Στη συνέχεια το εργαζόμενο μέσο μπορεί να εκτελέσει ένα θερμοδυναμικό κύκλο, αποδίδοντας την παραπάνω θερμότητα προς παραγωγή έργου. Ο θερμοδυναμικός κύκλος αποτελείται από μια σειρά θερμοδυναμικών διεργασιών μεταφοράς θερμότητας και έργου και ποικίλει ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο αλλά και το είδος του σταθμού. Μια ταξινόμηση των κύκλων μπορεί να γίνει με βάση το αν είναι *ανοιχτοί* ή *κλειστοί*. Σε έναν ανοιχτό κύκλο το εργαζόμενο μέσο ανανεώνεται στο τέλος κάθε κύκλου μεταβολών, ενώ στον κλειστό κύκλο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και επαναχρησιμοποιείται.

Στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα προτιμούνται κύκλοι που παρέχουν τη δυνατότητα πρόσδοσης εξωτερικής θερμότητας. Οι συνηθέστερες επιλογές είναι : ο κύκλος Stirling, ο κύκλος Joule-Brayton και ο κύκλος Rankine.

Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling [1]

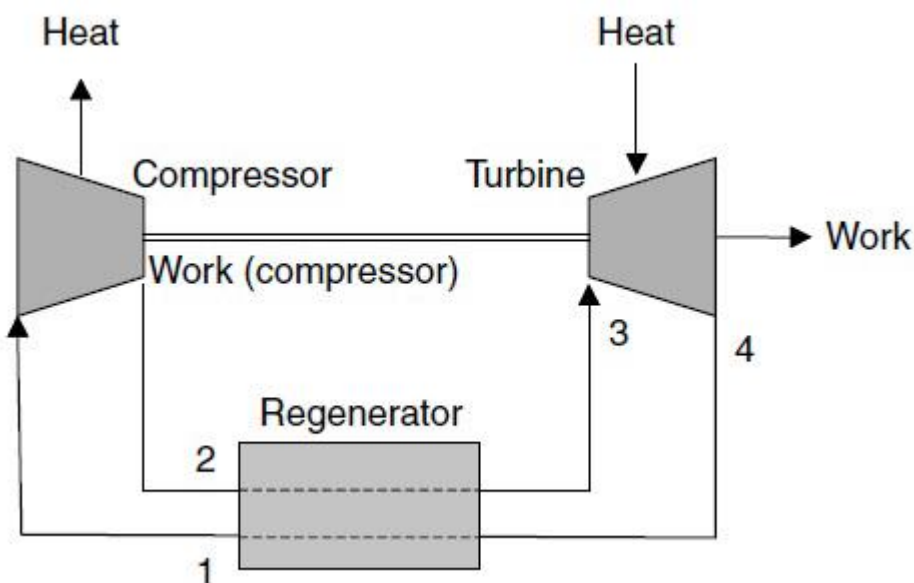
Στον ιδανικό κύκλο Stirling το εργαζόμενο ρευστό θερμαίνεται και ψύχεται εναλλάξ ενώ συμπιέζεται και διαστέλλεται. Ο κύκλος αυτός αποτελείται από 4 θερμοδυναμικές μεταβολές, 2 ισοθερμοκρασιακές και 2 ισόογκες. Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα πίεσης-όγκου και θερμοκρασίας-εντροπίας (σχήμα 4.1.(α), 4.1.(β)). Το καθαρό έργο του κύκλου αυτού προκύπτει από το γεγονός ότι χρειάζεται λιγότερο έργο για τη συμπίεση του ρευστού σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας σε σχέση με τη συμπίεσή του σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Στον ιδανικό κύκλο η θερμότητα αποβάλλεται και το έργο γίνεται στο εργαζόμενο ρευστό κατά την ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (μεταβολή 1→2). Το έργο που απαιτείται για αυτή τη μεταβολή αντιπροσωπεύεται στο εμβαδόν (α-1-2-β) στο διάγραμμα πίεσης-όγκου (σχήμα α). Η επόμενη μεταβολή είναι ισόογκη πρόσδοση θερμότητας (2→3) όπου η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνει από τη θερμοκρασία εισόδου T_L ως τη θερμοκρασία αποβολής θερμότητας T_H . Η μεταβολή αυτή είναι άεργη και η προσθήκη θερμότητας αντιστοιχεί στο εμβαδόν (β-2-3-γ) στο διάγραμμα T-S (σχήμα β). Εν συνεχεία είναι η ισοθερμοκρασιακή μεταβολή (3→4) όπου έχουμε διαστολή του εργαζόμενου μέσου και παραγωγή έργου. Το έργο αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν (β-3-4-α) στο P-V διάγραμμα και (γ-3-4-δ) στο διάγραμμα T-S. Ο κύκλος ολοκληρώνεται από την ισόογκη μεταβολή (4→1) όπου έχουμε αποβολή θερμότητας, δεν παράγεται έργο και η απόρριψη της θερμότητας αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν (α-1-4-δ) στο T-S διάγραμμα.



Σχήμα 4.1. (α) Διάγραμμα Πίεσης-Όγκου για κύκλο Stirling, (β) Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Εντροπίας για κύκλο Stirling (Πηγή : http://poisson.me.dal.ca/~dp_08_04/Theory.html)

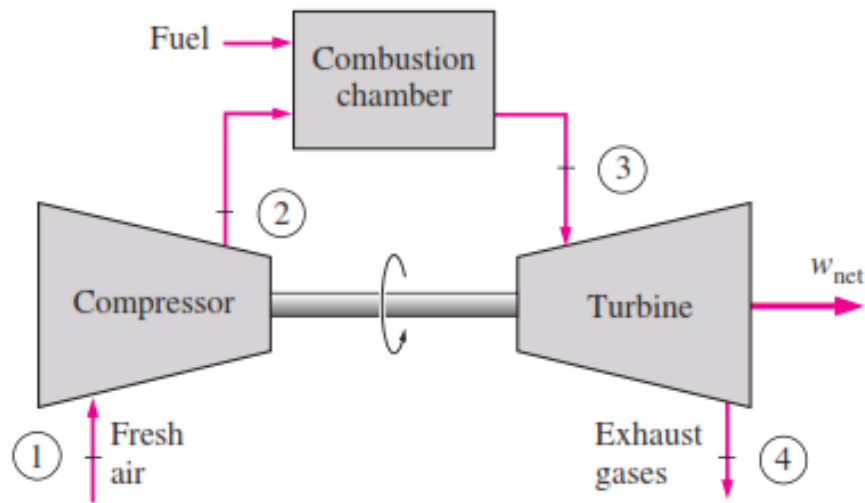
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του κύκλου Stirling είναι η δυνατότητα χρήσης ενός αναγεννητή με πλήρη αξιοποίησή του, εξαλείφοντας δηλαδή όλες τις αναποτελεσματικές μεταφορές θερμότητας. Όπως φαίνεται γραφικά στο διάγραμμα T-S, η απορριπτόμενη θερμότητα κατά την ισόογκη αποβολή θερμότητας (εμβαδόν α-1-4-d) μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί κατά την ισόογκη πρόσδοση θερμότητας (εμβαδόν b-2-3-c). Έτσι η θερμότητα προστίθεται ή απορρίπτεται μόνο σε αποδοτικές ισοθερμοκρασιακές μεταβολές που είναι το σημαντικότερο στοιχείο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης του κύκλου Stirling. Στην ουσία με την αναγέννηση αυτή η αποδοτικότητα του κύκλου Stirling ισοδυναμεί με αυτή του κύκλου Carnot-του αποδοτικότερου θερμοδυναμικού κύκλου.



Σχήμα 4.2. Κύκλος Stirling με αναγέννηση θερμότητας (Πηγή: <http://www.thermopedia.com/>)

Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton [2],[3]

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton σχετίζεται με την πλειοψηφία των αεροστροβιλικών συστημάτων.



Σχήμα 4.3 Ανοιχτός κύκλος Brayton (Πηγή: <http://sounak4u.weebly.com/gas-power-cycle.html>)

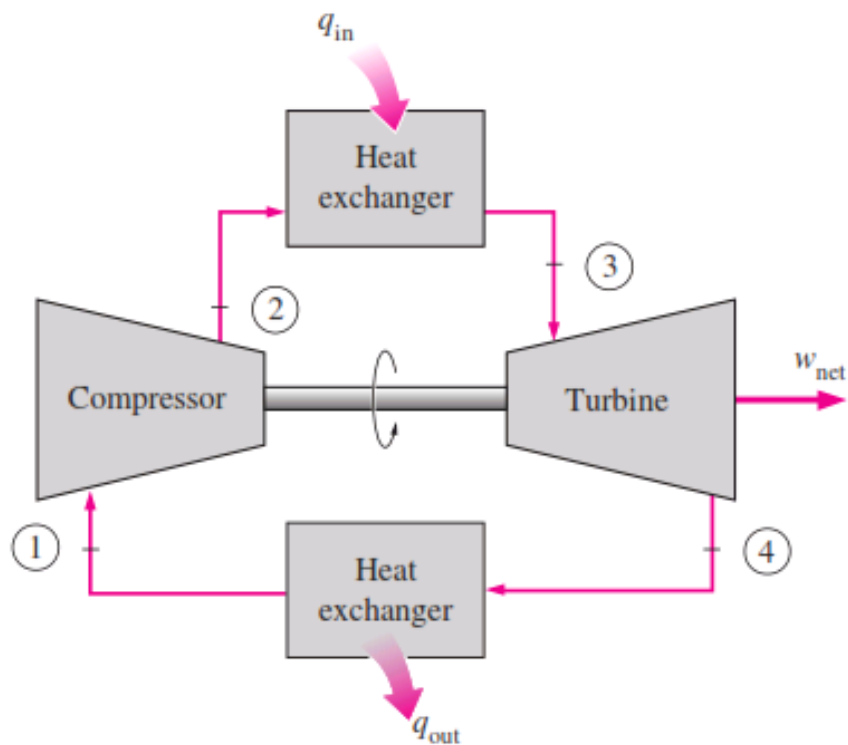
Η λειτουργία του κύκλου γίνεται με τις εξής μεταβολές :

- Ο συμπιεστής παίρνει τον ατμοσφαιρικό αέρα (κατάσταση 1) και τον συμπιέζει σε μια υψηλότερη θερμοκρασία και πίεση (κατάσταση 2).
- Ο αέρας υψηλότερης πίεσης από τον συμπιεστή μαζί με προστιθέμενο καύσιμο οδηγούνται στον θάλαμο καύσης, όπου έχουμε καύση υπό σταθερή πίεση. Τα εκλυόμενα αέρια υψηλής θερμοκρασίας στέλνονται στον στρόβιλο (κατάσταση 3).
- Τα αέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο μέχρι να έχουν ατμοσφαιρική πίεση (κατάσταση 4) και παράγεται ισχύς.
- Τα καυσαέρια εξέρχονται από τον στρόβιλο.

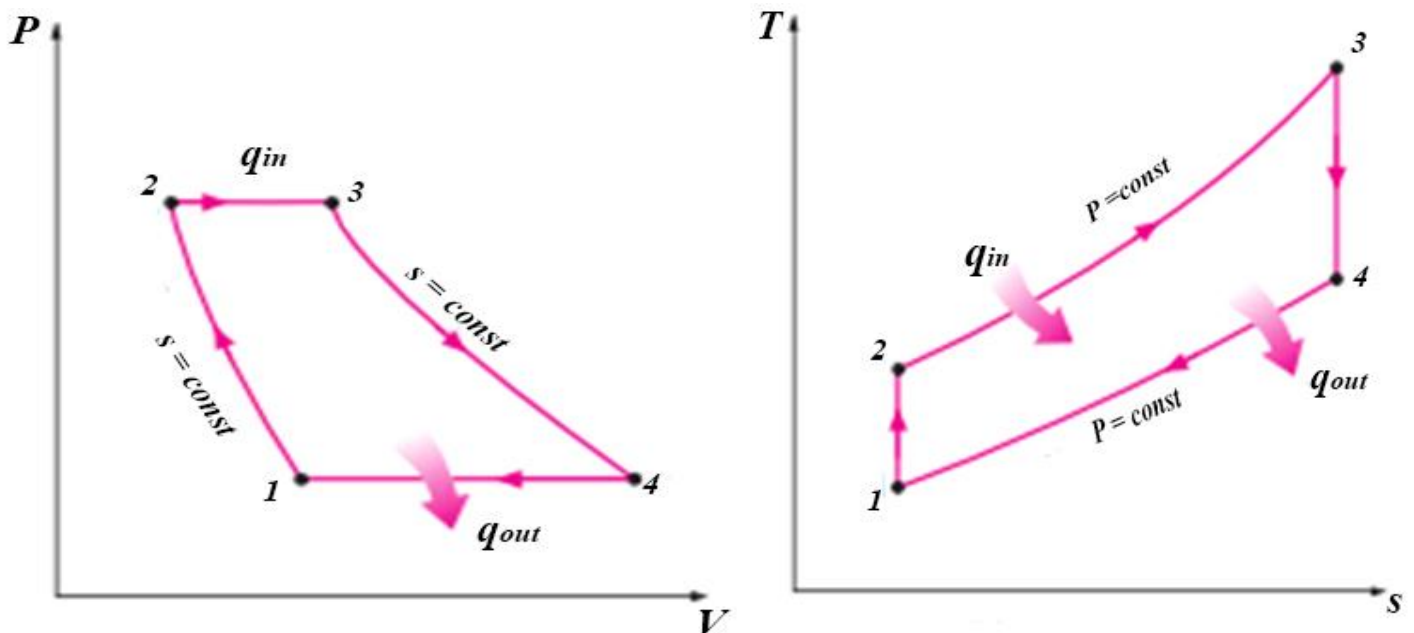
Αντικαθιστώντας το θάλαμο καύσης (άρα και τη διαδικασία καύσης) με προσθήκη θερμότητας υπό σταθερή πίεση, και αντικαθιστώντας τη διαδικασία εκκένωσης των καυσαερίων με αποβολή θερμότητας υπό σταθερή πίεση ο ανοιχτός κύκλος που περιγράψαμε παραπάνω πλέον έχει μετατραπεί σε κλειστό. Ο κλειστός αυτός κύκλος αποκαλείται ιδανικός κύκλος Brayton και περιγράφεται από τις εξής μεταβολές :

- (1 →2) Ισεντροπική συμπίεση
- (2 →3) Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας
- (3 →4) Ισεντροπική εκτόνωση
- (4 →1) Ισοβαρής αποβολή θερμότητας

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του ιδανικού κύκλου Joule-Brayton και τα διαγράμματα μεταβολών P-V και T-S.



Σχήμα 4.4. Ιδανικός κύκλος Brayton



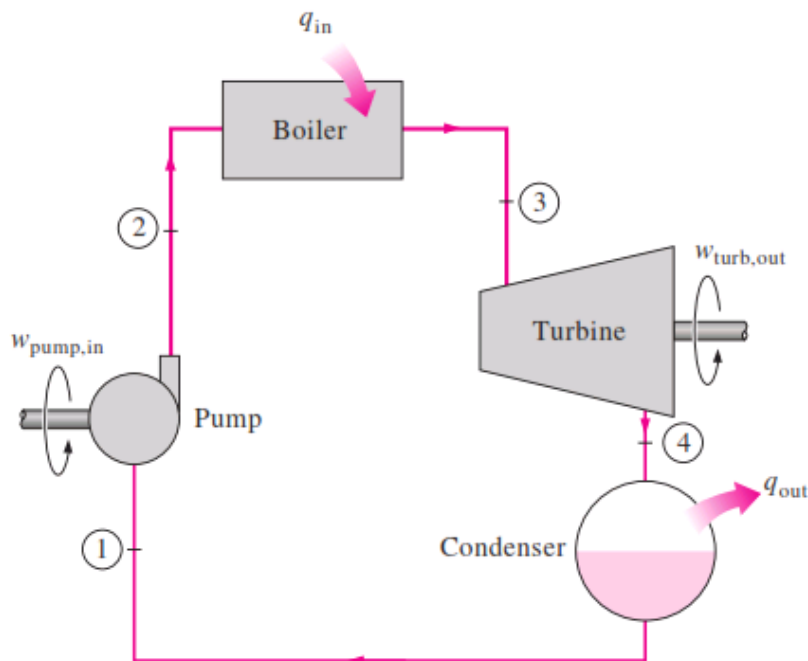
Σχήμα 4.5 (α) Διάγραμμα P-V ιδανικού κύκλου Brayton, (β) Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Brayton (Πηγή: <http://sounak4u.weebly.com/gas-power-cycle.html>)

Η θερμική απόδοση του κύκλου Brayton εκφράζεται ως :

$$\eta = \frac{\text{Net work}}{\text{Heat in}} = \frac{C_p[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \quad (4.1.1)$$

Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine [4]

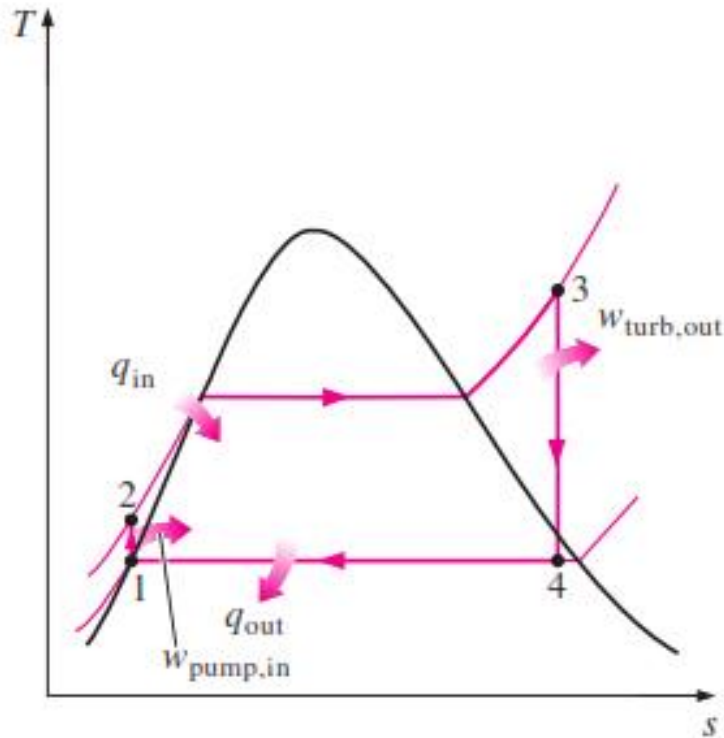
Ο κύκλος Rankine είναι ο θεμελιώδης κύκλος λειτουργίας όλων των σταθμών παραγωγής ενέργειας όπου το εργαζόμενο ρευστό συνεχώς εξατμίζεται και συμπυκνώνεται. Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου εξαρτάται κυρίως από τη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας του κύκλου. Είναι με διαφορά ο πιο διαδεδομένος θερμοδυναμικός κύκλος σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και χρησιμοποιείται στις μέρες μας για το 90% της ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως.



Σχήμα 4.6 Ιδανικός κύκλος Rankine (Πηγή: <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>)

Η λειτουργία του κύκλου γίνεται με τις εξής μεταβολές :

- (1 →2) Συμπύεση
- (2→3) Ισοβαρής πρόσδοση θερμότητας
- (3→4) Αποτόνωση
- (4→5) Ισόθερμη-ισοβαρής αποβολή θερμότητας



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine (Πηγή: <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>)

Το εργαζόμενο μέσο (νερό) όντας σε κατάσταση κορεσμένου υγρού εισέρχεται στην αντλία (σημείο 1) και ακολουθεί ισεντροπική συμπίεση στην πίεση λειτουργίας του βραστήρα. Η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται ελαφρώς κατά τη διάρκεια αυτής της ισεντροπικής συμπίεσης εξαιτίας μιας ελαφρής μείωσης του ειδικού του όγκου. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2 στο διάγραμμα T-s απεικονίζεται μεγαλύτερη σε σχέση με την πραγματική για λόγους ευκρίνειας. Το νερό εισέρχεται στο βραστήρα ως συμπιεσμένο υγρό (κατάσταση 2) και εξέρχεται ως υπερθερμος ατμός στην κατάσταση 3. Ο λέβητας λειτουργεί στην ουσία σαν ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας, στον οποίο η θερμότητα προερχόμενη από τα αέρια καύσης ή άλλες πηγές μεταφέρεται στο νερό υπό συνθήκες σταθερής πίεσης. Ο υπέρθερμος ατμός στην κατάσταση 3 εισέρχεται στον στρόβιλο όπου εκτονώνεται ισεντροπικά και παράγει έργο μέσω της περιστροφής του άξονα συνδεδεμένου με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού μειώνονται κατά τη μεταβολή αυτή και έτσι ο ατμός εισέρχεται στον συμπυκνωτή στην κατάσταση 4, στην οποία το μείγμα βρίσκεται συνήθως σε κατάσταση μίγματος κορεσμένου υγρού-ατμού. Ο ατμός κατόπιν συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση στον συμπυκνωτή, ο οποίος λειτουργεί επίσης ως ένας εναλλάκτης θερμότητας, απορρίπτοντας θερμότητα σε ένα ψυκτικό μέσο, όπως για παράδειγμα σε μια λίμνη ή έναν ποταμό. Τέλος, ο ατμός εξέρχεται του συμπυκνωτή ως κορεσμένο υγρό και εισέρχεται στην αντλία, ολοκληρώνοντας τον κύκλο Rankine. Σε περιοχές όπου το νερό είναι δυσεύρετο οι σταθμοί παραγωγής ψύχονται με αέρα αντί για νερό. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ξηρή ψύξη.

4.2 Σταθμοί Συνδυασμένου Κύκλου (CSP)

Η διαδικασία για τη μετατροπή της ενέργειας που περιέχεται σε ένα καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια περιλαμβάνει αρχικά τη δημιουργία μηχανικού έργου, το οποίο στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική ενέργεια από μία γεννήτρια. Ανάλογα με τον τύπο καυσίμου και τη θερμοδυναμική διεργασία που λαμβάνει χώρα, η αποδοτικότητα αυτής της μετατροπής μπορεί να είναι αρκετά χαμηλή, έως και μόλις 30%. Αυτό σημαίνει ότι περίπου δύο-τρίτα από τη λανθάνουσα θερμότητα του καυσίμου δεν αξιοποιείται και το μεγαλύτερο μέρος της καταλήγει ως θερμική ενέργεια στα θερμά καυσαέρια από τη διαδικασία καύσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής που χρησιμοποιούν λέβητες για την καύση ορυκτών καυσίμων με μέσο θερμικό βαθμό απόδοσης 33%. Οι σταθμοί με απλό κύκλο αεριοστροβίλου έχουν θερμικό βαθμό απόδοσης κάτω από 30% με καύσιμο φυσικό αέριο και περίπου 25% για πετρέλαιο.

Προκειμένου να αυξηθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πολλαπλές διεργασίες μπορούν να συνδυαστούν για να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί η απομένουσα θερμική ενέργεια που βρίσκεται στα θερμά καυσαέρια. Ο όρος «συνδυασμένος κύκλος» αναφέρεται στο συνδυασμό θερμοδυναμικών κύκλων για την παραγωγή ενέργειας. Αποτελείται από μια διάταξη θερμικών μηχανών (βλέπε σχήμα 4.8) και η βασική αρχή λειτουργίας του είναι ότι τα θερμά καυσαέρια που εξέρχονται από μία θερμική μηχανή χρησιμοποιούνται ως πηγή θερμότητας για μία άλλη. Κατά αυτόν τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε περισσότερο τη διαθέσιμη θερμότητα και αυξάνεται η συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή οι θερμικές μηχανές είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν ένα μόνο μέρος της ενέργειας που παράγει η καύσιμη ύλη τους (συνήθως λιγότερο από 50%).

Η λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου βασίζεται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Λ.Α.Θ.) που συλλαμβάνει τη θερμότητα από την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου με σκοπό την παραγωγή ατμού. Ο παραγόμενος ατμός με τη σειρά του τροφοδοτεί έναν ατμοστρόβιλο και παράγεται επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία που περιγράφηκε βασίζεται στο θερμοδυναμικό κύκλο Rankine και οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου μπορούν να επιτύχουν βαθμούς ηλεκτρικής απόδοσης έως και 60%.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής, που ορίζεται ως το κλάσμα της εισερχόμενης θερμικής ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο, περιορίζεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμότητας που εισέρχεται στον κινητήρα και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων. Σε ένα σταθμό συνδυασμένου κύκλου, όπου η θερμότητα των καυσαερίων του αεριοστροβίλου χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού μέσα από ένα ΛΑΘ, έχουμε θερμοκρασίες ατμού στο εύρος 420-580°C. Ο συμπυκνωτής του κύκλου Rankine συνήθως ψύχεται με νερό από μια εξωτερική πηγή (π.χ. λίμνη, ποτάμι, θάλασσα) ή από έναν πύργο ψύξης σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλή, έως και 15°C.

Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (ΛΑΘ) είναι στην ουσία ένας εναλλάκτης θερμότητας, ή μάλλον ένα σύνολο από εναλλάκτες θερμότητας. Η αγγλική ονομασία HRSG (Heat Recovery Steam Generator) περιλαμβάνει την έννοια του ατμοποιητή. Αυτό

οφείλεται στο ότι ο ΛΑΘ δημιουργεί ατμό για τον αμοστρόβιλο με αξιοποίηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο και τη διέλευση τους μέσα από σωλήνες των εναλλακτών θερμότητας. Η διέλευση των καυσαερίων στους σωλήνες των εναλλακτών μπορεί να γίνει με φυσική κυκλοφορία αλλά συχνά γίνεται χρήση αντλιών για καλύτερα αποτελέσματα.

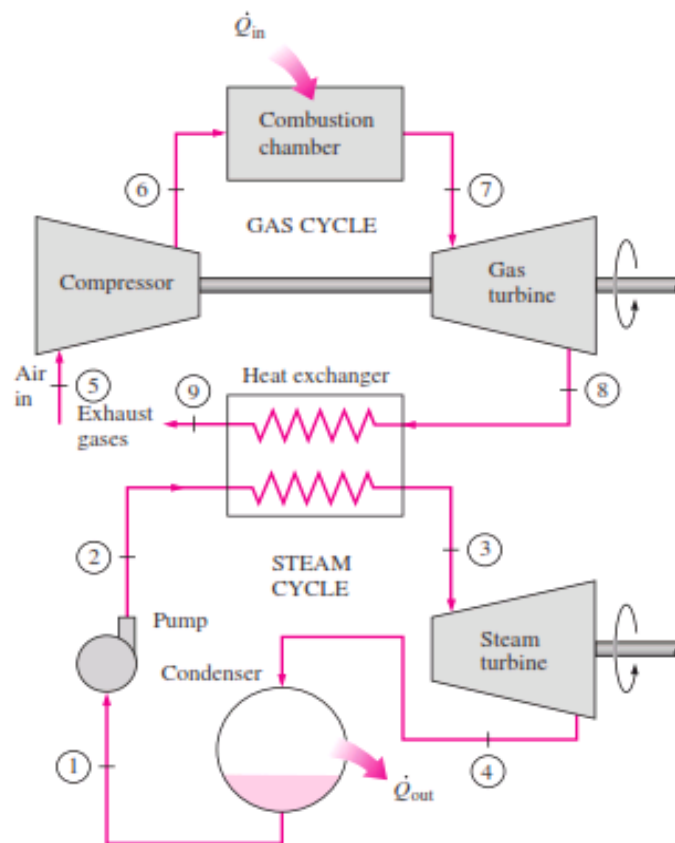
Η βασική αρχή λειτουργίας του ΛΑΘ είναι ότι τα θερμά καυσαέρια διέρχονται από τους σωλήνες των εναλλακτών στους οποίους κυκλοφορεί ζεστό νερό, η θερμότητα απορροφάται και προκαλεί την παραγωγή ατμού στους σωλήνες. Η διάταξη των σωλήνων είναι οργανωμένη σε τμήματα, το καθένα από τα οποία εξυπηρετεί μια διαφορετική λειτουργία στην παραγωγή ξηρού υπέρθερμου ατμού. Τα τμήματα αυτά αναφέρονται ως οικονομητήρες, εξατμιστές, υπερθερμαντές/αναθερμαντές και προθερμαντήρες.

Ο οικονομητήρας είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που προθερμαίνει το νερό ώστε να προσεγγίσει τη θερμοκρασία κορεσμού (σημείο βρασμού), το οποίο τροφοδοτείται σε ένα τύμπανο ατμού. Το τύμπανο βρίσκεται δίπλα σε λεπτούς σωλήνες του εξατμιστή που κυκλοφορούν το θερμαινόμενο νερό. Η διέλευση των καυσαερίων δίπλα από τους σωλήνες προκαλεί τη δημιουργία ατμού στους σωλήνες και το μείγμα νερού-ατμού εισέρχεται στο τύμπανο. Εκεί ο ατμός διαχωρίζεται από το καυτό νερό χρησιμοποιώντας διαχωριστές υγρασίας. Το διαχωρισμένο νερό ανακυκλώνεται στους σωλήνες εξάτμισης. Τα τύμπανα ατμού εκτελούν επίσης λειτουργίες αποθήκευσης και επεξεργασίας νερού.

Ο κορεσμένος ατμός από τα τύμπανα ατμού αποστέλλεται στον υπερθερμαντήρα για να παραχθεί ο ξηρός ατμός που απαιτείται για τον αμοστρόβιλο. Οι προθερμαντήρες βρίσκονται στο ψυχρότερο άκρο της διαδρομής του ΛΑΘ και απορροφούν ενέργεια για την προθέρμανση των υγρών μεταφοράς θερμότητας (HTF), αποκομίζοντας έτσι την πλέον οικονομικά βιώσιμη ποσότητα θερμότητας από τα καυσαέρια.

Ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται από το ΛΑΘ τροφοδοτεί τον αμοστρόβιλο όπου διαστέλλεται διαμέσου των πτερυγίων του στρόβιλου και προσδίδει περιστροφική κίνηση στον άξονα του στρόβιλου. Η ενέργεια που παραδίδεται στον κινητήριο άξονα της γεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Μετά την έξοδό του από τον στρόβιλο ατμού, ο ατμός αποστέλλεται σε ένα συμπυκνωτή ο οποίος κατευθύνει το συμπυκνωμένο νερό πίσω στο ΛΑΘ.

Σε ορισμένα σχέδια, έχουμε χρήση συμπληρωματικών καυστήρων που χρησιμοποιούνται για την προσθήκη θερμότητας στο ρεύμα των καυσαερίων ώστε να αυξηθεί η παραγωγή ατμού, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ατμού ακόμη και αν δεν υπάρχει επαρκής ροή καυσαερίων.



Σχήμα 4.8 Βασικός σχεδιασμός συνδυασμένου κύκλου (CCGT)
(Πηγή: <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>)

ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση του συστήματος ΛΑΘ και ατμοστρόβιλου εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων καυσαερίων, τις απαιτήσεις για ατμοπαραγωγή και τη λειτουργία του σταθμού. Για παράδειγμα, τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο μπορεί να φτάσουν θερμοκρασία 600°C δίνοντας τη δυνατότητα στο ΛΑΘ να παράγει ατμό σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης βελτιώνοντας την ανάκτηση θερμότητας. Έτσι συχνά έχουμε τρία τμήματα από εναλλάκτες θερμότητας- ένα για ατμό υψηλής πίεσης (HP), ένα για ενδιάμεσης πίεσης (IP) και ένα για χαμηλής πίεσης (LP). Ο ατμός υψηλής πίεσης σε ένα μεγάλο εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου μπορεί να φτάσει 40-110 bar.

Με ένα ΛΑΘ πολλαπλών τμημάτων πίεσης ο ατμοστρόβιλος θα έχει πολλαπλά σημεία εισαγωγής ατμού. Σε έναν ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων, ο ατμός υψηλής πίεσης (HP), θα τροφοδοτείται στον στρόβιλο σε διαφορετικό σημείο από τον ατμό IP και LP.

Ένα μειονέκτημα των ΛΑΘ είναι ότι παρουσιάζουν λειτουργικούς περιορισμούς σε μια μονάδα παραγωγής συνδυασμένου κύκλου. Ο λόγος είναι ότι βρίσκονται ακριβώς κατάντι των αεριοστρόβιλων, με αποτέλεσμα οι αλλαγές στη θερμοκρασία και πίεση των καυσαερίων να προκαλεί θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις. Άλλο πρόβλημα

παρουσιάζεται όταν ο σταθμός μπαίνει σε λειτουργία μερικού φορτίου, για να καλύψει καταστάσεις έκτακτης ηλεκτρικής ζήτησης, όπου έχουμε συχνές εκκινήσεις και παύσης λειτουργίας. Αυτές οι απότομες μεταβολές λειτουργίας μπορεί να προκαλέσουν θερμική καταπόνηση και ενδεχομένως ζημιά σε ορισμένα στοιχεία του ΛΑΘ. Το τύμπανο ατμού υψηλής πίεσης και ο υπερθερμαντήρας είναι τα πιο επιρρεπή τμήματα σε μηχανικές βλάβες επειδή υπόκεινται στις υψηλότερες θερμοκρασίες των καυσαερίων. Σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας είναι οι θερμοκρασίες του ατμού και του φυσικού αερίου που μπορούν να αντέξουν τα υλικά της μονάδας, η διάβρωση των σωλήνων του ΛΑΘ και η πίεση του ατμού που μπορεί να απαιτήσει παχύτερο τοίχωμα στα τύμπανα. Προκειμένου να ελεγχθεί ο απότομος ρυθμός αύξησης της πίεσης και της θερμοκρασίας στα εξαρτήματα ενός ΛΑΘ, χρησιμοποιούνται συστήματα παράκαμψης που αποτρέπουν την είσοδο των καυσαερίων στο ΛΑΘ κατά την εκκίνηση.

Όπως είναι λογικό, ο ΛΑΘ χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να προθερμανθεί όταν βρίσκεται σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας από ότι σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας. Ως αποτέλεσμα, το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από την τελευταία παύση λειτουργίας επηρεάζει το χρόνο εκκίνησης. Όταν οι αεριοστρόβιλοι φτάνουν σε πλήρες φορτίο γρήγορα, η θερμοκρασία και η ροή στο ΛΑΘ δεν έχουν φτάσει ακόμα στις απαιτούμενες τιμές για την παραγωγή ατμού, και σαν συνέπεια προκαλείται υπερθέρμανση στα μέταλλα δεδομένου ότι δεν υπάρχει ροή ψύξης του ατμού. Οι αποδεκτές συνθήκες ατμού για τον αμοστρόβιλο καθορίζονται από τα θερμικά όρια του δρομέα, των πτερυγίων και το σχεδιασμό του περιβλήματος. Τέλος, εξοπλισμός ελέγχου για τα οξειδία του αζώτου (NOx) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ενσωματωμένος στο ΛΑΘ. Δεδομένου ότι αυτά τα συστήματα λειτουργούν αποτελεσματικά σε στενά θερμοκρασιακά όρια του αερίου συνήθως εγκαθίστανται μεταξύ των τμημάτων του εξατμιστή.

Σταθμός συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο (CCGT)

Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων θερμοδυναμικών κύκλων έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης ενός σταθμού και τη μείωση του κόστους των καυσίμων. Ένας συνδυασμός που χρησιμοποιείται ευρέως σε εμπορικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι ένας αεριοστρόβιλος (λειτουργία σε κύκλο Brayton) με καύση φυσικού αερίου ή συνθετικού αερίου από άνθρακα, τα καυσαέρια του οποίου τροφοδοτούν έναν αμοπαραγωγό (λειτουργία σε κύκλο Rankine). Αυτό ονομάζεται μονάδα συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου (CCGT) και μπορεί να επιτύχει θερμική απόδοση της τάξης του 60%, σε αντίθεση με μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με απλό κύκλο ατμού που περιορίζεται σε αποδόσεις της τάξης του 35-42%.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις για τους σταθμούς CCGT, αλλά τυπικά ο κάθε αεριοστρόβιλος συνδέεται με το δικό του ΛΑΘ και το σύνολο των ΛΑΘ τροφοδοτεί με ατμό έναν ή περισσότερους αμοστρόβιλους. Για παράδειγμα, σε ένα σταθμό με διαμόρφωση 2x1 εννοούμε ότι έχουμε δυο αεριοστρόβιλους σε σύνδεση με ΛΑΘ (έκαστος σε ξεχωριστό ΛΑΘ) και έναν αμοστρόβιλο. Ομοίως μπορεί να έχουμε διαμορφώσεις 1x1, 3x1, 4x1 κ.ο.κ. Το μέγεθος του αμοστρόβιλου βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από το πλήθος αεριοστρόβιλων-ΛΑΘ και της παροχής ατμού.

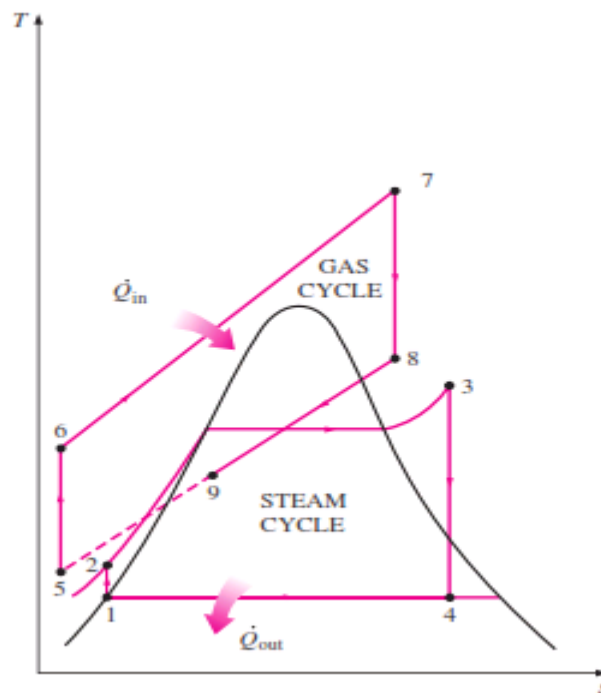
Θερμοδυναμικός κύκλος συνδυασμένου κύκλου [4]

Η συνεχιζόμενη αναζήτηση για υψηλότερες θερμικές αποδόσεις είχε ως αποτέλεσμα κάποιες καινοτόμες τροποποιήσεις στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δημοφιλέστερη τροποποίηση είναι ένας κύκλος αερίου και ένας κύκλος ατμού, με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον να παρουσιάζεται στην περίπτωση αεριοστροβίλου (Brayton) για τον κύκλο αερίου και αμμοστροβίλου (Rankine) για τον κύκλο ατμού. Στην εν λόγω περίπτωση παρουσιάζεται υψηλότερη θερμική απόδοση απ'ότι παρουσιάζει ξεχωριστά ο κάθε κύκλος.

Οι κύκλοι αεριοστροβίλων συνήθως λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τους κύκλους ατμού. Η μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου είναι περίπου 620°C για σύγχρονες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αμμοστροβίλου, αλλά πάνω από 1425°C για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αεριοστροβίλου. Λόγω της υψηλότερης μέσης θερμοκρασίας κατά την οποία παρέχεται θερμότητα, οι κύκλοι αεριοστροβίλων έχουν μεγαλύτερες προοπτικές για υψηλότερες θερμικές αποδόσεις. Ωστόσο, οι κύκλοι αεριοστροβίλων έχουν ένα εγγενές μειονέκτημα: το αέριο αφήνει τον στροβίλο σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (συνήθως πάνω από 500°C), με αποτέλεσμα να διαγράφονται οποιαδήποτε πιθανά κέρδη στην θερμική απόδοση. Η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση αναγεννητή, αλλά η βελτίωση είναι περιορισμένη. Ωστόσο μπορούμε να επωφεληθούμε από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του κύκλου αεριοστροβίλων σε υψηλές θερμοκρασίες και να χρησιμοποιήσουμε τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας ως πηγή ενέργειας για τον κύκλο ισχύος ατμού. Το αποτέλεσμα είναι ένα συνδυασμένο κύκλο αερίου-ατμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9.

Ο κύκλος 5-6-7-8 που βρίσκεται στο πάνω τμήμα του διαγράμματος είναι ο κύκλος του αεριοστροβίλου. Απεικονίζει τις θερμικές μεταβολές και συναλλαγές έργου που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή υψηλών θερμοκρασιών. Ο κύκλος 1-2-3-4 που βρίσκεται στο κάτω μέρος είναι ο κύκλος ατμού Rankine και λαμβάνει χώρα στην περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων στο νερό και ατμό πραγματοποιείται από το λέβητα ανάκτησης θερμότητας στον κάτω κύκλο. Κατά την ισοβαρή μεταβολή (8→5) τα καυσαέρια του στροβίλου αποβάλλουν θερμότητα. Το τροφοδοτικό νερό, ο υγρός και υπέρθερμος ατμό απορροφούν ένα μέρος αυτής της θερμότητας κατά τις μεταβολές (2→3) και (3→4).

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία αεριοστροβίλων έχουν κάνει το συνδυασμένο κύκλο φυσικού αερίου-ατμού μια πολύ ελκυστική επιλογή οικονομικά. Ο συνδυασμένος κύκλος αυξάνει την απόδοση χωρίς να αυξάνεται το αρχικό κόστος σε μεγάλο βαθμό. Ως εκ τούτου, πολλές νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής λειτουργούν με συνδυασμένο κύκλο ισχύος, και πολλές άλλες υπάρχοντες μονάδες παραγωγής αεριοστροβίλου είτε αμμοστροβίλου μετατρέπονται σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με τις θερμικές αποδόσεις ξεπερνούν το 40% κατά περιπτώσεις.



Σχήμα 4.9 Θερμοδυναμικός κύκλος συνδυασμένου κύκλου
(Πηγή: <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>)

4.2.1 Πλεονεκτήματα μονάδων συνδυασμένου κύκλου

Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα :

- **Υψηλότερος βαθμός απόδοσης:** η απόδοση ενός σταθμού συνδυασμένου κύκλου είναι της τάξεως των περίπου 45 έως 50%. Δηλαδή περίπου 20% υψηλότερη σε σύγκριση την απόδοση παραδοσιακών θερμικών μονάδων.[5]
- **Γρήγορη απόκριση σε διαταραχές:** οι αεριοστρόβιλοι έχουν μεγάλο ρυθμό ανάληψης φορτίου (20% ανά λεπτό). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι ατμοστρόβιλοι έχουν ρυθμούς ανάληψης φορτίου της τάξης του 2% ανά λεπτό. Στις σημερινές αγορές ενέργειας όπου η ζήτηση του φορτίου είναι συχνά αβέβαιη οι αεριοστοβλικές μονάδες μπορούν να αντιμετωπίσουν διαταραχές στην ισορροπία παραγωγής ισχύος και φορτίου αρκετά γρήγορα.[7]
- **Ευελιξία:** Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορα καύσιμα, μεταξύ των οποίων φυσικό αέριο και πετρελαϊκά προϊόντα. Οι μονάδες αυτού του τύπου έχουν γενικά υψηλότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης από τις συμβατικές ατμοηλεκτρικές μονάδες λόγω της τεχνολογίας καθώς και των υλικών που χρησιμοποιούνται, ωστόσο καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και απαιτούν μικρότερο χρόνο εγκατάστασης. Επιπλέον, οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου είναι

καταλληλότερες για την ταχεία εκκίνηση και τον τερματισμό λειτουργίας σε σχέση με τους συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Ως εκ τούτου, αυτές οι μονάδες δέχονται τις μεταβολές φορτίου γρήγορα και βοηθούν στη διατήρηση της σταθερότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο.[5]

- **Φιλικοί προς το περιβάλλον:** η εκπομπή CO₂, καθώς και άλλων αερίων που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι αρκετά χαμηλότερη από άλλες θερμικές μονάδες ορυκτών καυσίμων λόγω του σχετικά υψηλού βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου, καθώς και της υψηλής αναλογίας υδρογόνου σε σχέση με τον άνθρακα στο μεθάνιο (CH₄), το οποίο είναι βασικό συστατικό του φυσικού αερίου. Οι τυπικές εκπομπές μονάδων συνδυασμένου κύκλου παράγουν περίπου 0.8lb CO₂/KWh ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές μονάδων που χρησιμοποιούν γαιάνθρακες είναι 2lb CO₂/KWh [6]. Επιπλέον με χρήση καταλυτών οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και θείου, καθώς και μονοξειδίου του άνθρακα μειώνονται σε επίπεδα πολύ χαμηλότερα σε σχέση με αυτά άλλων θερμικών μονάδων παραγωγής.

4.3 Υβριδοποίηση ατμοηλεκτρικών σταθμών [8],[9],[10]

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα αποτελούν ότι πιο σύγχρονο έχει να μας προσφέρει η τεχνολογία στον τομέα της θερμικής ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, ερωτηματικό παραμένει η εγκατάσταση συστημάτων με ισχύ άνω των 100 MW, καθώς και η δυνατότητα να μειώσουμε το κόστος τους προκειμένου να καταστεί η χρήση τους πιο ευρεία.

Μια ποικιλία διαφορετικών τεχνολογιών λαμβάνονται υπόψη ως μέθοδοι για τη βελτίωση του βαθμού αποδοτικότητας για τη μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια και ως μέθοδοι μείωσης του κόστους, αλλά οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες θέτουν θεωρητικούς και πρακτικούς περιορισμούς. Όταν η συγκεντρωμένη ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιηθεί σε υψηλή θερμοκρασία, ο θερμικός κύκλος έχει υψηλή απόδοση μετατροπής. Οι συλλέκτες όμως έχουν μειωμένη απόδοση και έχουν ακριβότερο κόστος παραγωγής (προκειμένου να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες). Από την άλλη πλευρά, όταν η ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε μία χαμηλότερη θερμοκρασία, οι ηλιακοί συγκεντρωτές έχουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής, αλλά η αποτελεσματικότητα του θερμικού κύκλου μειώνεται σημαντικά.

Ένα άλλο βασικό ζήτημα για τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται αποκλειστικά σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι ότι παρουσιάζουν διακυμάνσεις ως προς την απόδοση ισχύος, διακύμανση που οφείλεται στη μεταβαλλόμενη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η διαλείπουσα φύση των συστημάτων ηλιακής ενέργειας μπορεί να ξεπεραστεί με χρήση κάποιας μορφής αποθήκευσης ενέργειας (βλέπε κεφάλαιο 3.5). Μία άλλη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος διακύμανσης ισχύος είναι η ενσωμάτωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων (CSP) σε συμβατικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων, γνωστή και ως υβριδοποίηση. Η υβριδοποίηση μας προσφέρει μεγάλες δυνατότητες, επιτρέποντας την αποδοτική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας με βάση της ενεργειακές απαιτήσεις.

Οι υβριδοποιημένοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που χρησιμοποιούν θερμική ενσωμάτωση και σε αυτούς που χρησιμοποιούν θερμοχημική ενσωμάτωση. Στις διεργασίες θερμικής ενσωμάτωσης, το υβριδοποιημένο σύστημα χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση νερού, κορεσμένου ή υπέρθερμου ατμού σε συνδυασμό με την καύση ορυκτών καυσίμων. Στη θερμοχημική ενσωμάτωση, τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται για χημικές αντιδράσεις, ενώ η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται μέσω μιας θερμικής διεργασίας για την αναβάθμιση των ορυκτών καυσίμων. Η υβριδοποίηση με θερμική ενσωμάτωση χρησιμοποιείται ήδη για βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ η θερμοχημική υβριδοποίηση είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο.

Σε αντίθεση με σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής αποκλειστικά ηλιοθερμικούς, ένας ηλιακός υβριδικός σταθμός μπορεί να αξιοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή ενός συμβατικού σταθμού μειώνοντας έτσι το επενδυτικό κόστος για εξοπλισμό και κατ'επέκταση μειώνοντας το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, αποφεύγεται το πρόβλημα διακύμανσης στην παραγωγή ισχύος και είναι ένας τρόπος για να περιοριστεί η κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων που βρίσκονται σε έλλειψη. Ένα τελευταίο πλεονέκτημα, αλλά ιδιαίτερα σημαντικό, των υβριδικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ειδικά του CO₂. Έτσι,

βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, η ανάπτυξη υβριδοποιημένων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα αποτελεί ένα πρακτικό μέσο για την ταχύτερη υιοθέτηση της ηλιοθερμικής τεχνολογίας σε σταθμούς μεγαλύτερης κλίμακας.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές μορφές υβριδοποίησης για σταθμούς με άνθρακα και φυσικό αέριο και εξετάζονται οι μέθοδοι ενσωμάτωσης. Η μελέτη υβριδοποίησης περιλαμβάνει το σχεδιασμό του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος που θα ενσωματώσουμε και τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί.

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών βασικών προσεγγίσεων για υβριδισμό σταθμών ορυκτών καυσίμων με ηλιακή ενέργεια. Οι ακόλουθες προσεγγίσεις που αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό είτε έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε εμπορικές εγκαταστάσεις, είτε βρίσκονται ακόμα υπό εξέλιξη.

1. Ηλιοθερμικός σταθμός με ορυκτά καύσιμα ως εφεδρική πηγή ενέργειας

Πολλοί ηλιοθερμικοί σταθμοί χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ως εφεδρική πηγή ενέργειας σε περιόδους έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή είναι και η πιο κοινή μορφή της υβριδοποίησης. Οι εννέα εμπορικοί ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής στην έρημο Mojave με την ονομασία SEGS είναι η πιο επιτυχημένη εφαρμογή υβριδοποίησης ηλιακών σε κύκλο Rankine. Οι σταθμοί αυτοί βασίζονται στην τεχνολογία παραβολικών συλλεκτών σκάφης και διαθέτουν εφεδρικούς λέβητες αερίου που χρησιμοποιούνται όταν η θερμοκρασία του ατμού είναι μικρότερη από εκείνη που απαιτείται από τους στρόβιλους ατμού.

2. Ηλιακά υποβοηθούμενη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα

Η ηλιακή υβριδοποίηση ενός συστήματος ατμοπαραγωγής βασιζόμενου σε καύση άνθρακα είναι ιδανική επιλογή για χώρες με μεγάλα κοιτάσματα άνθρακα, όπως οι ΗΠΑ, η Ρωσία και η Αυστραλία. Στην Ελλάδα έχουμε αφθονία κοιτασμάτων λιγνίτη (ο λιγνίτης, καλούμενος και φαιάνθρακας, είναι οργανικής προελεύσεως πέτρωμα του οποίου το κύριο στοιχείο είναι ο άνθρακας) και η χώρα μας κατέχει τη δεύτερη θέση σε παραγωγή λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την έκτη θέση παγκοσμίως.

Σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα η ηλιακή θερμότητα μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα και να λειτουργήσει παράλληλα με τον λέβητα ή τους προθερμαντήρες του τροφοδοτικού νερού. Για παράδειγμα, η ηλιακή θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού χωρίς να χρειαστεί η εξαγωγή ατμού από το στρόβιλο. Αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για την επαναλειτουργία παλαιότερων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής άνθρακα/λιγνίτη με ισχύ κάτω των 300MW. Ένα βασικό πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η ενίσχυση της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού άνθρακα χωρίς την ανάγκη αύξησης του μεγέθους του ατμοστρόβιλου.

3. Σταθμός Ολοκληρωμένου ηλιακού συνδυασμένου κύκλου (ISCC)

Οι συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιούν έναν κύκλο αεριοστρόβιλου (κύκλος Brayton) στον οποίο το ορυκτό καύσιμο καίγεται σε σειρά σε έναν κύκλο Rankine με βάση ατμό. Αυτό το είδος μονάδων παραγωγής ορυκτού καυσίμου προσφέρουν την υψηλότερη απόδοση μετατροπής από όλες τις

διαδεδομένες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με καύση ορυκτών καυσίμων. Σε ένα σταθμό ISCC η συγκεντρωμένη ηλιακή θερμότητα εισάγεται στο συνδυασμένο κύκλο της μονάδας παραγωγής, αντικαθιστώντας τα εξερχόμενα θερμά καυσαέρια από τον αεριοστροβίλο ή προσδίδοντάς τους θερμότητα για την παραγωγή κορεσμένου ή υπέρθερμου ατμού. Γενικά ένα σύστημα ISCC με την προσθήκη ηλιακής θερμότητας στον κύκλο ατμού επιδιώκει να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα τόσο της ηλιακής ενέργειας όσο και του ορυκτού καυσίμου με την μεγαλύτερη δυνατή αποδοτικότητα. Αναλυτικότερη παρουσίαση των σταθμών ISCC θα έχουμε στο κεφάλαιο 4.3.1.

4.3.1 Τεχνολογία Ολοκληρωμένου Ηλιακού Συνδυασμένου Κύκλου (ISCC)

Η τεχνολογία ISCC ή «Ολοκληρωμένου Ηλιακού Συνδυασμένου Κύκλου», όπως μεταφράζεται στα ελληνικά, είναι ένα πάντρεμα δύο τεχνολογιών που έχουν εδραιωθεί στον τομέα ηλεκτροπαραγωγής εδώ και αρκετές δεκαετίες. Από τη μία έχουμε το σύστημα συνδυασμένου κύκλου παραγωγής που έχει εγκατασταθεί σε εκατοντάδες σταθμούς παραγωγής για την παραγωγή ενέργειας με υψηλή απόδοση. Από την άλλη έχουμε τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, που έχουν ωριμάσει σαν τεχνολογία τις τελευταίες δεκαετίες και παρουσιάζουν σταθερά αυξανόμενα ποσοστά εγκατάστασης σε εμπορικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής τα τελευταία είκοσι χρόνια.

Οι σταθμοί με τεχνολογία ISCC βασίζονται λοιπόν σε μια καινοτόμο ιδέα ηλεκτροπαραγωγής, κατά την οποία ηλιακή θερμότητα προστίθεται σε μια συμβατική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου αυξάνοντας την τελική ηλεκτρική ισχύ. Το συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα μπορεί να ενσωματωθεί στην ήδη υπάρχουσα μονάδα παραγωγής συνεισφέροντας είτε στην εξοικονόμηση καυσίμου είτε ως επιπρόσθετη παροχή ισχύος.

Η Ελλάδα ιστορικά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στο λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μόλις τα τελευταία χρόνια έχουμε διείσδυση του φυσικού αερίου στην παραγωγή ενέργειας. Η τεχνολογία ISCC θα επιτρέψει μια ομαλή μετάβαση των ήδη υπάρχοντων σταθμών συνδυασμένου κύκλου με ορυκτά καύσιμα ή φυσικό αέριο σε μελλοντικούς σταθμούς που θα βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ηλιακή ενέργεια.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ [11]

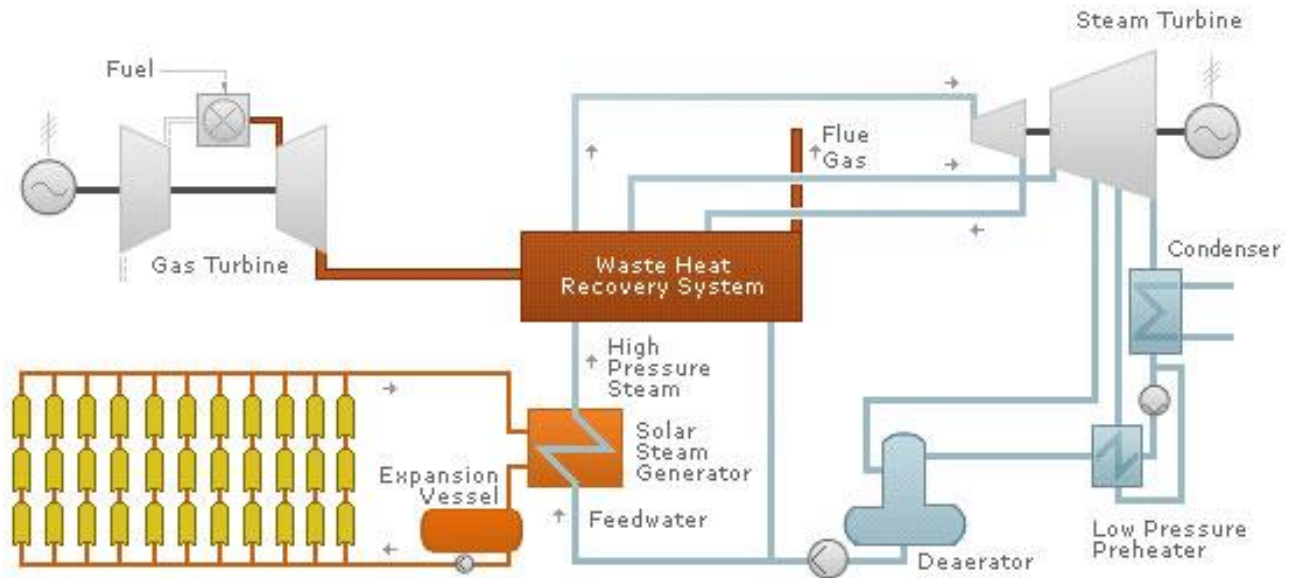
Το σύστημα ολοκληρωμένου ηλιακού συνδυασμένου κύκλου (ISCC) προτάθηκε αρχικά ως μέσο ενσωμάτωσης της τεχνολογίας παραβολικών συλλεκτών σκάφης σε σύγχρονες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου. Αργότερα συμπεριλήφθησαν και άλλα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Αρχικός σκοπός ήταν η αύξηση του μεγέθους του αμοστροβίλου, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για αμοπαραγωγή και τέλος η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων του αεριοστροβίλου για την προθέρμανση και υπερθέρμανση του ατμού. Οι πρώτοι σταθμοί ISCC λειτουργούσαν με την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου όταν δεν υπήρχε αρκετή ηλιοφάνεια, ενώ όταν υπήρχε διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια αύξαναν την παραγωγή ισχύος έως και περίπου 30%. Ωστόσο, αν ο σταθμός συνδυασμένου κύκλου λειτουργεί σε προφίλ λειτουργίας βασικού φορτίου, τότε το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής από ηλιακή ενέργεια θα είναι μόνο περίπου 10%.

Με την πάροδο των χρόνων έχουν γίνει αρκετές μελέτες προκειμένου να εξεταστούν οι καλύτερες προσεγγίσεις για την ενσωμάτωση. Απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός του συστήματος ώστε να βεβαιωθούμε ότι η ηλιακή υβριδοποίηση δεν θα έχει σημαντικές επιπτώσεις και μεταβολές στη λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου ορυκτού καυσίμου. Πλέον, οι σταθμοί ISCC εγγυόνται την παροχή μιας ελάχιστης παροχής ρεύματος ανεξάρτητα από το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοσή τους, ωστόσο, εξαρτάται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μέθοδο μεταφοράς θερμότητας στο συνδυασμένο κύκλο.

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη μετατροπή της ηλιακής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι η απόσπαση τροφοδοτικού νερού από τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Λ.Α.Θ.) κατάντη του οικονομητήρα, η παραγωγή υψηλής πίεσης κορεσμένου ατμού χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια, και η επιστροφή του ατμού στον Λ.Α.Θ. για υπερθέρμανσή του με τη θερμότητα των καυσαερίων του αεριοστροβίλου.

Ο σχεδιασμός μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής ISCC είναι μάλλον πολύπλοκος, καθώς περιλαμβάνει το συνδυασμό των τριών βασικών συστημάτων: του κύκλου Brayton, του ηλιακού πεδίου και του κύκλου Rankine. Ο κύκλος Brayton αποτελείται από τον συμπιεστή, το θάλαμο καύσης και τον αεριοστροβίλο. Ο αέρας συμπιέζεται από το συμπιεστή και στη συνέχεια αποστέλλεται στο θάλαμο καύσης, όπου αναμιγνύεται με καύσιμο. Μετά την ανάφλεξη, θερμά καυσαέρια μετακυλίνουν στον αεριοστροβίλο αναγκάζοντας τα πτερυγίων του να περιστραφούν. Ο άξονας του στροβίλου είναι συνδεδεμένος με την ατράκτο μιας ηλεκτρικής γεννήτριας, παράγοντας έτσι ενέργεια. Τα βασικά μέρη του κύκλου Rankine είναι ο ατμοποιητής, μία ή περισσότερες βαθμίδες του στροβίλου και ο συμπυκνωτής. Ο ατμοποιητής είναι το σύνολο των εναλλακτών θερμότητας σε σειρά με το θερμό εργαζόμενο μέσο να ρέει στη θερμή πλευρά και νερό ή ατμός στην ψυχρή πλευρά. Ο παραγόμενος ατμός κατευθύνεται προς τις βαθμίδες στροβίλου πολλαπλών επιπέδων πίεσης ξεκινώντας με τη βαθμίδα υψηλής πίεσης, όπου διαστέλλεται και σταδιακά μεταφέρει την ενέργεια του προς τον άξονα του στροβίλου. Το συνολικό έργο που δέχεται ο άξονας αντιστοιχεί στη μηχανική ισχύ που δέχεται η ηλεκτρική γεννήτρια. Ο ατμός συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και σχηματίζεται τροφοδοτικό νερό. Τέλος, το τροφοδοτικό νερό μπορεί να απαερωθεί και να προθερμανθεί πριν τροφοδοτηθεί πίσω στον ατμοποιητή. Η ενσωμάτωση του ηλιακού πεδίου γίνεται συνήθως σε βαθμίδα μέσης ή χαμηλής πίεσης, ενώ ένας δεύτερος ατμοποιητής παρεμβάλλεται μεταξύ του τροφοδοτικού νερού και βαθμίδας πίεσης.

Γενικά έχουν προταθεί και εφαρμοστεί διάφορες διατάξεις ενσωμάτωσης συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου, πέρα από αυτή που αναλύσαμε πιο πάνω. Επικρατέστερη όμως παραμένει αυτή που αναλύσαμε και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10. Εκτός φυσικά από σταθμούς ISCC με ορυκτά καύσιμα, έχουμε και σταθμούς ISCC με καύσιμο φυσικό αέριο ή βιομάζα.



Σχήμα 4.8. Τυπική διάταξη σταθμού ISCC (Πηγή : <http://www.gearsolar.com/>)

Σε σταθμούς ISCC είναι δυνατή η παραγωγή ατμού σε υψηλότερη πίεση (~100 bar) και θερμοκρασία (ακόμα και πάνω από 500°) σε σύγκριση με σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (CC) λόγω της επιπλέον ηλιακής ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αποδοτικότητα των σταθμών ISCC να υπερβαίνει αυτή των σταθμών CC. Ακόμα, η ισχύς του ατμοστροβίλου σε συμβατικούς σταθμούς CC είναι το 50% της ισχύς του αεριοστροβίλου, αλλά σε σταθμούς ISCC το ηλιακό πεδίο αυξάνει την ισχύ του ατμοστροβίλου κατά περίπου 50% σε σύγκριση με σταθμούς CC. Η πτώση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που παρατηρείται σε συμβατικούς σταθμούς τους καλοκαιρινούς μήνες και οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αποφεύγεται σε σταθμούς ISCC, καθώς το ηλιακό πεδίο απορροφάει περισσότερη ενέργεια. Έτσι, εξασφαλίζεται μια σταθερή παραγωγή ενέργειας όλο το έτος.

Ένας σταθμός ISCC μπορεί να λειτουργήσει με τους παρακάτω τρόπους:

1. Λειτουργία ολοκληρωμένου ηλιακού συνδυασμένου κύκλου τις ώρες ηλιοφάνειας
2. Συμβατική λειτουργία συνδυασμένου κύκλου στις υπόλοιπες ώρες
3. Λειτουργία αεριοστροβίλου όταν ο ατμοστροβίλος δεν λειτουργεί.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Καταρχάς, πρέπει να αναφέρουμε ότι η αξιολόγηση των σταθμών ISCC με οικονομικούς και θερμοδυναμικούς συντελεστές είναι πολύ πιο περίπλοκη από ότι για συμβατικούς σταθμούς. Αυτό οφείλεται στη μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητο η αξιολόγηση να γίνεται σε ετήσια βάση, και όχι τριμηνιαία ή εξαμηνιαία.

Σε σύγκριση με ήδη υπάρχουσες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής κύκλου Rankine με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (π.χ. σταθμοί SEGS, Καλιφόρνια), οι σταθμοί ISCC προσφέρουν τρία κύρια πλεονεκτήματα :

1. η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια σε υψηλότερη απόδοση
2. τα επιπρόσθετα έξοδα για έναν μεγαλύτερο ατμοστρόβιλο είναι λιγότερα από το συνολικό κόστος κατασκευής μιας καθαρά ηλιακής μονάδας
3. ένας σταθμός ISCC δεν αντιμετωπίζει προβλήματα που σχετίζονται με την καθημερινή εκκίνηση και τερματισμό του ατμοστρόβιλου

Γενικά θερμοδυναμικά και οικονομικά οφέλη των σταθμών ISCC :

- Βαθμός αποδοτικότητας του κύκλου Rankine 95-120% σε σχέση με ενός καθαρά ηλιακού σταθμού, και έως 105% σε σχέση με σταθμό CC
- Δεν υπάρχουν απώλειες από την καθημερινή εκκίνηση του ατμοστρόβιλου
- Η υβριδοποίηση ενός ήδη υπάρχοντος σταθμού συνδυασμένου κύκλου έχει κόστος 25-75% λιγότερο από την κατασκευή μίας νέας μονάδας με τεχνολογία CSP
- Έχουμε βελτίωση του συντελεστή μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς, ενώ οι κύκλοι Brayton και Rankine μένουν αμετάβλητοι.

Από την άλλη πλευρά, ο ατμοστρόβιλος του CC μπορεί να μπει σε λειτουργία μερικού φορτίου όταν δεν υπάρχει αμοπαραγωγή από το ηλιακό πεδίο, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του συστήματος. Επίσης, το υψηλό κόστος εξακολουθεί να είναι ένα σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας για την ευρεία εφαρμογή τέτοιων συστημάτων. Προκειμένου να συνεχιστεί η υβριδοποίηση εμπορικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, εκτός από υψηλά επενδυτικά κεφάλαια, απαραίτητες είναι ευνοϊκές νομοθετικές ρυθμίσεις προς τις εταιρείες. Για παράδειγμα συμβόλαια πώλησης του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, μειωμένη φορολογία και άλλα κίνητρα που θα ενθαρρύνουν τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αυξήσουν το μερίδιο της ενέργειας που παράγεται από συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.

4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] http://poisson.me.dal.ca/~dp_08_04/Theory.html (Ηλεκτρονικό)
- [2] <http://sounak4u.weebly.com/gas-power-cycle.html> (Ηλεκτρονικό)
- [3] <http://www.thermopedia.com/content/901/> (Ηλεκτρονικό)
- [4] <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html> (Ηλεκτρονικό)
- [5] <http://electricalengineeringtutorials.com/advantages-of-combined-cycle-power-plant/>
(Ηλεκτρονικό)
- [6] Bo Lu, Mohammad Shahidehpour, "Short Term Scheduling of Combined Cycle Units", IEEE Transaction on Power Systems, vol.19, No3, August 2004
- [7] Ιωάννης Κ. Μάντζαρης, "Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου" ,ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
- [8] K. Lovegrove & W.Stein, "Concentrating solar power technology principles, developments and applications",[395-419]
- [9] M.S. Jamel, A.A.Rahman, A.H.Shamsuddin. "Advances in the integration of solar thermal energy with conventional and non-conventional power plants" .Centre for Renewable Energy, University Tenaga National,Kajang43009,Selangor,Malaysia
- [10] J. D. Spelling, " Hybrid Solar Gas-Turbine Power Plants: A Thermoeconomic Analysis", Doctoral Thesis. KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology 100 44 Stockholm, Sweden
- [11] Sargent & Lundy , "Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts" ,LLC Consulting Group Chicago, Illinois

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει το κυρίως αντικείμενο της διπλωματικής αυτής, δηλαδή τη διαδικασία σχεδιασμού πεδίου ηλιοστατών για το σύστημα ηλιακού πύργου. Θα αναλύσουμε σε βάθος τις παραμέτρους σχεδίασης ενός ηλιακού πεδίου και θα σχεδιάσουμε ηλιοστατικά πεδία για την μονάδα ηλεκτροπαραγωγής στη Θίσβη. Με το

κόστος του ηλιακού πεδίου να αποτελεί το 40-50% του συνολικού κόστους για ένα σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη, αντιλαμβάνεται κανείς πόσο σημαντικό είναι να γίνεται βέλτιστος ο σχεδιασμός του.

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, ένα ηλιακό πεδίο αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη και υποσυστήματα: τον ηλιακό πύργο, τους ηλιοστάτες και το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε κυρίως τις απώλειες που παρουσιάζει ένα ηλιοστατικό πεδίο και πως μπορούμε να τις περιορίσουμε. Για αυτό θα ασχοληθούμε κυρίως με τα πρώτα δυο υποσυστήματα. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα μας απασχολήσει στο 5ο κεφάλαιο που γίνεται η υβριδοποίηση των δυο συστημάτων.

Εδώ θα ήθελα να αναφέρω ότι ένα από τα πρώτα προβλήματα που συναντάει κάποιος που θέλει να ασχοληθεί με τον σχεδιασμό ενός πεδίου ηλιοστατών είναι η έλλειψη προγραμμάτων που να υλοποιούν την εν λόγω διαδικασία. Παρότι φαίνεται να υπάρχει πλήθος πληροφοριών στο διαδίκτυο σχετικά με μεθοδολογίες διάταξης ηλιοστατικών πεδίων, τα διαθέσιμα προγράμματα είναι προς το παρόν πολύ λίγα. Σχεδόν όλα δε, ανήκουν σε ιδιωτικές εταιρίες πλέον και κανένα από αυτά δεν παρέχεται προς ανοιχτή χρήση. Αυτό αποτέλεσε το έναυσμα για τη δημιουργία ενός προγράμματος που θα δημιουργεί ηλιοστατικά πεδία για διαφορετικά δεδομένα εισόδου. Σκοπός του είναι η δημιουργία πολλών διαφορετικών ηλιακών πεδίων, σε λίγο χρόνο και κυρίως όχι χειροκίνητα όπως γινόταν μέχρι στιγμής, ώστε να εξετάζονται προς την απόδοσή τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος αναλύονται στο κεφάλαιο 5.3.

5.2 Απώλειες και Αξιολόγηση της Απόδοσης

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την απόδοση ενός συστήματος ηλιακού πύργου ισχύος θα πρέπει να υπολογίσουμε τις ενεργειακές απώλειες και τους βαθμούς απόδοσης των υποσυστημάτων που το αποτελούν. Μέσα από αυτή την αξιολόγηση επανεξετάζεται η δομή και ο σχεδιασμός του συστήματος σαν αντικείμενο βελτιστοποίησης. Οι κύριες απώλειες του συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη παρουσιάζονται στο πεδίο των ηλιοστατών και κατά δεύτερον στον κεντρικό δέκτη. Μικρότερες απώλειες έχουμε από ιδιοκαταναλώσεις του συστήματος και από σφάλματα υπολογισμών. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των απωλειών.

5.2.1 Απώλειες του πεδίου ηλιοστατών

Το πρώτο υποσύστημα προς εξέταση απωλειών είναι το πεδίο ηλιοστατών, αφού εκεί προσπίπτει αρχικά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Οι απώλειες στο υποσύστημα είναι στο εύρος 20-30% των συνολικών απωλειών του συστήματος ηλιακού πύργου και είναι οι μεγαλύτερες απώλειες ισχύος σε όλη την εγκατάσταση.

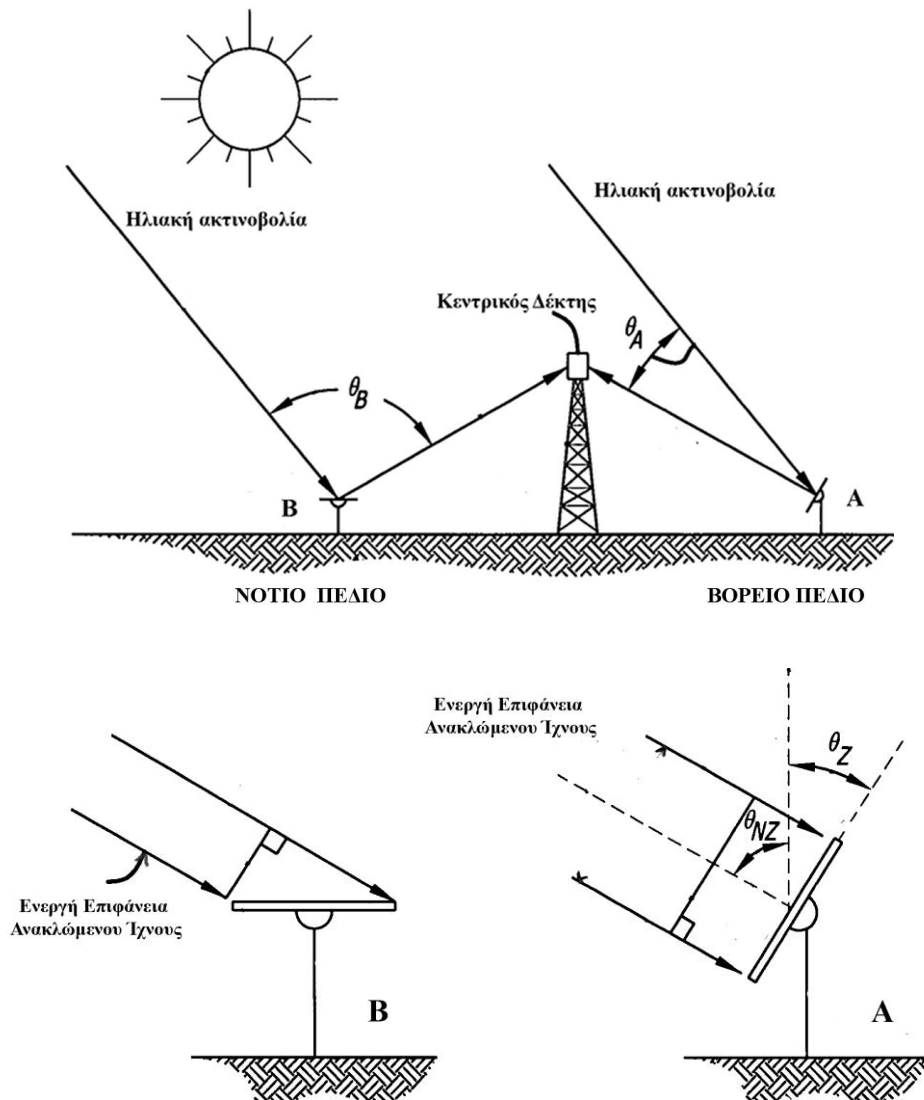
Οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Απώλειες Συνημιτόνου
- Απώλειες Ανακλαστικότητας
- Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας
- Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης
- Απώλειες Διαρροής

Απώλειες Συνημιτόνου (cosine losses)

Στο κεφάλαιο 2.1.2 έγινε μια πρώτη αναφορά στο φαινόμενο συνημιτόνου. Στο πεδίο ηλιοστατών οι απώλειες συνημιτόνου μεταφράζονται ως η μείωση της πραγματικής ανακλαστικής επιφάνειας ενός ηλιοστάτη κατά παράγοντα ίσο με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της καθέτου της επιφάνειάς του και της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι φανερό ότι οι απώλειες συνημιτόνου την ίδια χρονική στιγμή δεν είναι ίδιες για όλους τους ηλιοστάτες. Το μέγεθός τους εξαρτάται από τις συντεταγμένες του κάθε ηλιοστάτη στο χώρο, σε σχέση με τη θέση του ηλίου στον ουρανό και τη θέση του κεντρικού δέκτη. Με τιμές που κυμαίνονται γύρω στο 25% , οι απώλειες συνημιτόνου είναι οι πιο σημαντικές για ένα πεδίο ηλιοστατών.

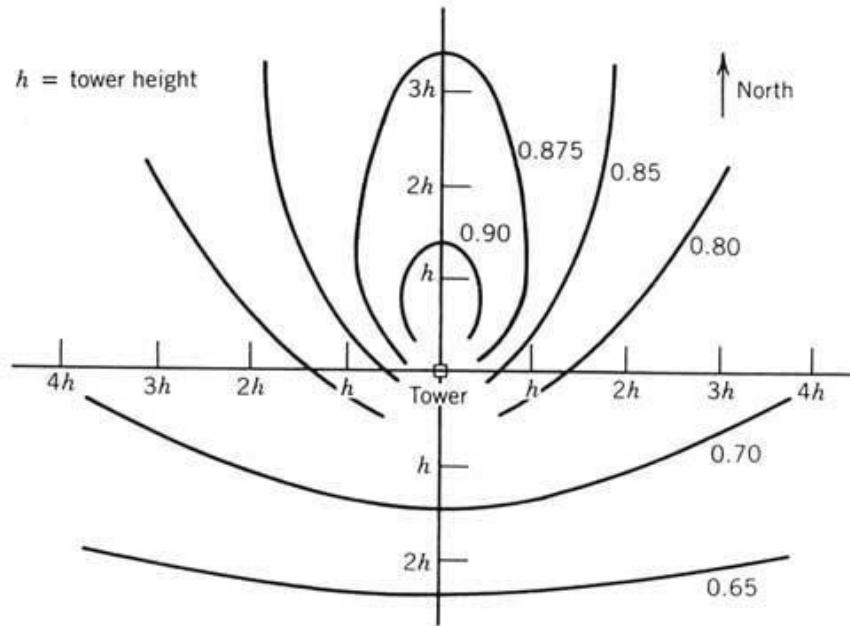
Χάρη στο σύστημα εντοπισμού της κίνησης του ηλίου που φέρουν οι ηλιοστάτες, κάθε στιγμή η κάθετος στην επιφάνειά τους διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και η νοητή ευθεία από τον ηλιοστάτη στο δέκτη. Επομένως, η προβολή της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη σε επίπεδο κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ίση με την επιφάνεια ανοίγματος του ηλιοστάτη επί το συνημίτονο του ήμισυ αυτής της γωνίας, και βαίνει μειούμενη όσο η γωνία αυτή αυξάνεται. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται η διαφορά στην επιφάνεια ανακλώμενου ίχνους σε δύο ίδιους ηλιοστάτες που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις του πεδίου.



Σχήμα 5.1. Το φαινόμενο συνημιτόνου για ηλιοστάτες εκατέρωθεν του ηλιακού πύργου (Πηγή : William B. Stine, Michael Geyer. Power From The Sun. Chapter 10, Central Receiver Systems. Copyright © 2001)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1, ο ηλιοστάτης στα νότια του πύργου παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες απώλειες συνημιτόνου από εκείνον στα βόρεια του, και επομένως ανακλά πολύ μικρότερες ποσότητες ακτινοβολίας στο δέκτη ($\theta_A < \theta_B$). Αυτός είναι και ο λόγος που το πεδίο ηλιοστατών, σε περιπτώσεις ηλιακού δέκτη με ένα άνοιγμα, τοποθετείται βόρεια του πύργου, ώστε η τροχιά που ακολουθεί ο ήλιος να είναι μπροστά από τους ηλιοστάτες. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι το χειμώνα, που ο ήλιος βρίσκεται χαμηλότερα στον ορίζοντα, οι απώλειες συνημιτόνου του ηλιοστατικού πεδίου είναι αρκετά μικρότερες, επηρεάζοντας και τον συνολικό βαθμό απόδοσής του.

Υπολογίζοντας τις απώλειες συνημιτόνου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για διάφορες θέσεις ηλιοστατών, προκύπτουν ζώνες γύρω από τον κεντρικό πύργο στις οποίες οι απώλειες έχουν την ίδια τιμή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 5.2. Ζώνες απωλειών συνημιτόνου γύρω από τον πύργο ηλιακής ισχύος (Πηγή : William B. Stine, Michael Geyer. Power From The Sun. Chapter 10, Central Receiver Systems. Copyright © 2001)

Ο υπολογισμός των απωλειών συνημιτόνου, εκφρασμένων με τη μορφή συντελεστή, για έναν ηλιοστάτη ,μία δεδομένη χρονική στιγμή, μπορεί να γίνει με τον τύπο:

$$\eta_{\cos} = \cos(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{2} [\sin(a) \cos(\lambda) - \cos(\theta_H - A) \cos(a) \sin(\lambda) + 1]^{1/2}$$

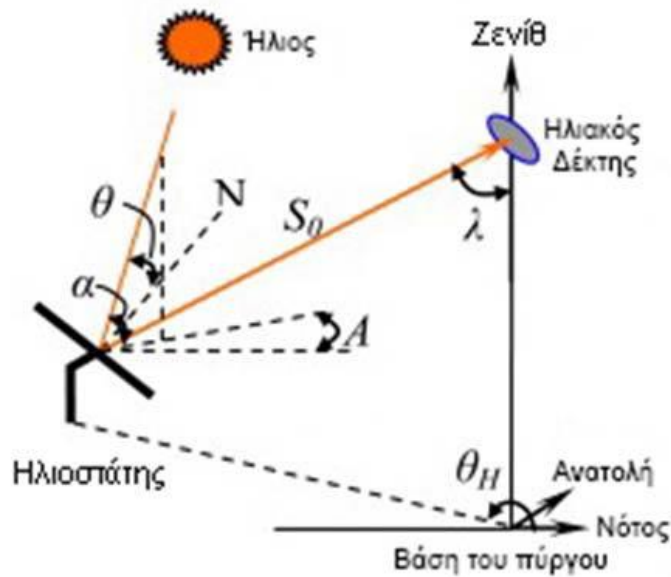
Όπου :

a το ηλιακό ύψος

A το ηλιακό αζιμουθίο

λ η γωνία μεταξύ της ανακλώμενης ακτίνας από τον ηλιοστάτη και της κατακόρυφης διεύθυνσης

θ_H η γωνία αζιμουθίου του ηλιοστάτη αναφορικά με τη βάση του πύργου



Σχήμα 5.3. Γωνίες ηλιοστάτη

Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας (attenuation losses)

Οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας αναφέρονται στην εξασθένηση της ακτινοβολίας που φθάνει από τους ηλιοστάτες στο δέκτη καθώς ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαθλάται και απορροφάται από την ατμόσφαιρα στην πορεία του προς αυτόν. Οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας κυμαίνονται στο 6% ετησίως αλλά δεν είναι σταθερές για όλο το πεδίο. Προφανώς όσο περισσότερο απέχει ένας ηλιοστάτης από τη βάση του πύργου τόσο μεγαλύτερες απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας θα έχει. Για ηλιοστάτες με απόσταση μεγαλύτερη του ενός χιλιομέτρου από το δέκτη οι απώλειες αυτές μπορεί να πάρουν τιμές ακόμα και μεγαλύτερες του 10%.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει άμεσα τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας είναι και τα καιρικά φαινόμενα και τα αερολύματα. Γενικά, όσο πιο ομιχλώδης και γεμάτη υγρασία είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας. Η εγκατάσταση συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη πρέπει να αποφεύγεται σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε πετρελαϊκούς σταθμούς, χαλυβουργίες ή εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων καθώς έχουμε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις σε ατμοσφαιρικά αιωρήματα.

Για τον υπολογισμό των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας εκφρασμένων με τη μορφή συντελεστή, για κάθε ηλιοστάτη, ανάλογα με την καθαρότητά της ατμόσφαιρας έχουν προταθεί οι εξής σχέσεις :

- Για ορατότητα 5 km [2]:

$$\eta_{\text{atten}} = 0,98707 - 0,2448 S_0 + 0,03394 S_0^2$$

- Για ορατότητα 23 km [2]:

$$\eta_{\text{atten}} = 0,99326 - 0,1046 S_0 + 0,017 S_0^2 - 0,002845 S_0^3$$

- Για ορατότητα 40 km [3]:

$$\eta_{\text{atten}} = 0,99321 - 0,0001176 S_0 + (1,97 \times 10^{-8}) S_0^2 \quad (\text{για } S_0 \leq 1000 \text{ m})$$

$$\eta_{\text{atten}} = e^{-0,0001106 S_0} \quad (\text{για } S_0 > 1000 \text{ m})$$

όπου S_0 η απόσταση μεταξύ ηλιοστάτη και ηλιακού δέκτη (βλέπε σχήμα 5.3).

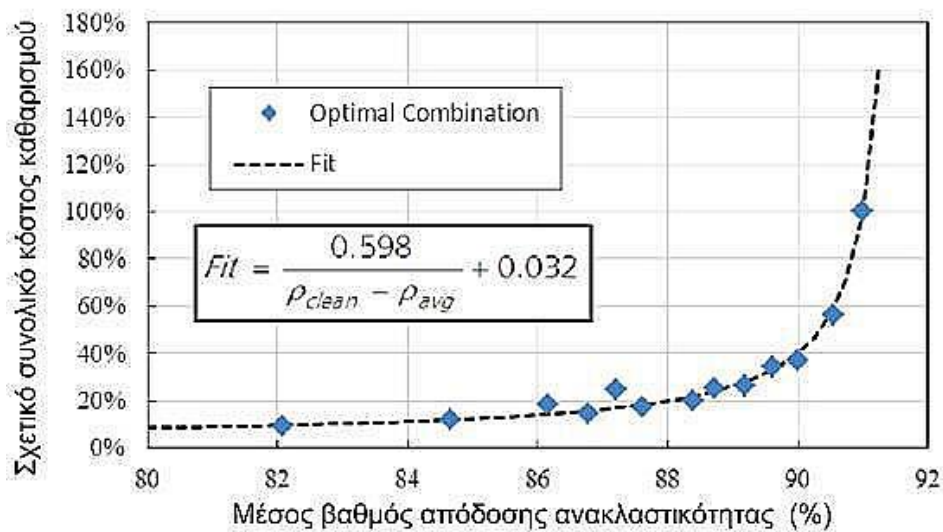
Απώλειες Ανακλαστικότητας (reflectivity losses) [4]

Οι απώλειες ανακλαστικότητας αναφέρονται στην ικανότητα των ηλιοστατών να ανακλούν αποδοτικά την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία και εξαρτώνται από την ποιότητα της κατοπτρικής τους επιφάνειας. Είναι το μόνο είδος απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου που μπορεί να υποτεθεί σταθερό και ίσο για όλους του ηλιοστάτες. Με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας οι σημερινοί ονομαστικοί λόγοι ανάκλασης για κατοπτρικές επιφάνειες αγγίζουν το 95%. Βέβαια το ποσοστό αυτό δεν παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια ενός έτους, καθώς βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, και επίσης φθίνει με το πέρασμα του χρόνου.

Ένας παράγοντας που επιδρά σημαντικά στις απώλειες ανακλαστικότητας των ηλιοστατών είναι και ο βαθμός καθαρότητας τους, ο οποίος έχει σαφή εξάρτηση από τις περιβαλλοντικές συνθήκες του εκάστοτε πεδίου. Ο βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας (η_{refl}) θα μπορούσε να προσδιοριστεί από το γινόμενο του ονομαστικού λόγου ανάκλασης της κατοπτρικής επιφάνειας, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή, με τον βαθμό καθαρότητας, που αποτελεί έναν ετήσιο μέσο όρο καθαρότητας των ηλιοστατών. Ωστόσο, όπως ήδη αναφέραμε, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν αρνητικά την ανακλαστική ικανότητα ενός ηλιοστάτη. Η συσσώρευση σκόνης και ρύπων, όπως και η επικάλυψη υλικών από το περιβάλλον, στην γυάλινη επιφάνεια των ηλιοστατών μειώνουν το βαθμό καθαρότητας της ανακλαστικής επιφάνειας. Παράλληλα σε περιοχές με αμμώδες έδαφος, ίσως έχουμε διάβρωση της επιφάνειας των ηλιοστατών λόγω αμμοβολής που προκαλείται από ισχυρούς ανέμους και αμμοθύελλες. Η διάβρωση κατά τη διάρκεια ζωής ενός ηλιοστάτη μπορεί να μειώσει την ανακλαστική του ικανότητα κατά 2%. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι η σύσταση του εδάφους, οι βροχοπτώσεις και το αιολικό δυναμικό της περιοχής του εκάστοτε ηλιοστατικού πεδίου επηρεάζουν σημαντικά τις απώλειες ανακλαστικότητας.

Για τη διατήρηση του βαθμού καθαρότητας σε υψηλά επίπεδα κρίνεται απαραίτητος ο τακτικός καθαρισμός των ανακλαστικών επιφανειών των ηλιοστατών. Στο κεφάλαιο 5.6 αναφέρονται οι τελευταίες εξελίξεις στα συστήματα καθαρισμού. Όσο συχνότερα καθαρίζονται οι ηλιοστάτες, τόσο καλύτερη ανακλαστικότητα έχουν και το πεδίο παρουσιάζει καλύτερη συνολική απόδοση, αλλά ταυτόχρονα αυξάνονται τα λειτουργικά κόστη λόγω κατανάλωσης νερού. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η συσχέτιση του σχετικού συνολικού κόστους καθαρισμού και του μέσου βαθμού απόδοσης ανακλαστικότητας.

Θεωρώντας σταθερούς ρυθμούς συσσώρευσης σκόνης και τα αντίστοιχα κόστη καθαρισμού των επιφανειών των ηλιοστατών, σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος καθαρισμού για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου μέσου βαθμού απόδοσης ανακλαστικότητας. Σκόπιμο είναι ο καθαρισμός να γίνεται με συχνότητα, τέτοια ώστε η ανακλαστικότητα των ηλιοστατών να υποβαθμίζεται κατά 6-8% πριν τον καθαρισμό τους.

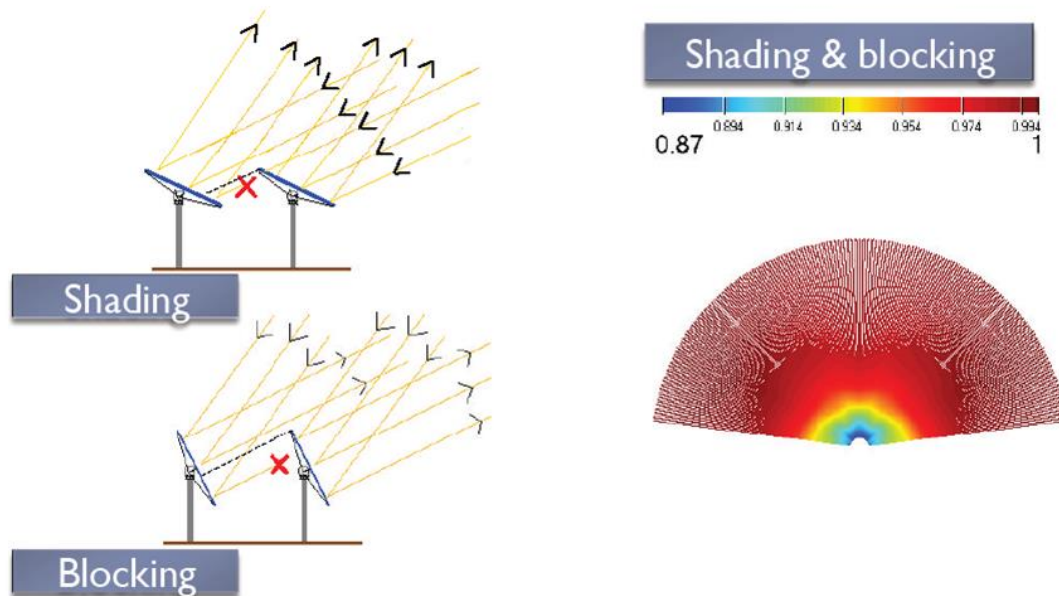


Σχήμα 5.4. Σχέση βαθμού απόδοσης ανακλαστικότητας και κόστους καθαρισμού (Πηγή : K.Kattke, L.Vant-Hull. Optimum Target Reflectivity For Heliostat Washing. SolarPaces Paper 2012)

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας στην ανάλυση που πραγματοποιείται στο 5ο κεφάλαιο, ο βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας των ηλιοστατών θεωρείται ίσος με: $\eta_{refl}=0,95$. Προκειμένου να επιτυγχάνεται αυτός ο υψηλός βαθμός απόδοσης, στο κεφάλαιο 5.3.1 προτείνονται μέθοδοι για τον αποτελεσματικό καθαρισμό των κατόπτρων σε ένα πεδίο ηλιοστατών.

Απώλειες σκίασης και παρεμβολής (shading and blocking) [5],[6]

Οι απώλειες σκίασης αναφέρονται στο φαινόμενο κατά το οποίο η σκιά που δημιουργείται από έναν ηλιοστάτη καλύπτει μέρος της ανακλαστικής επιφάνειας των ηλιοστατών που βρίσκονται στην πίσω σειρά, αποτρέποντας έτσι ένα ποσοστό από την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην ανακλαστική τους επιφάνεια. Στις απώλειες σκίασης συγκαταλέγεται και η σκίαση που προκαλείται από τον πύργο στο πεδίο, όταν οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες έρχονται πίσω από αυτόν. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, οι σχεδιαστές των πύργων αφιερώνουν σημαντικό χρόνο στην εύρεση σχεδίων, που εξασφαλίζουν όσο το δυνατόν λιγότερη σκίαση.

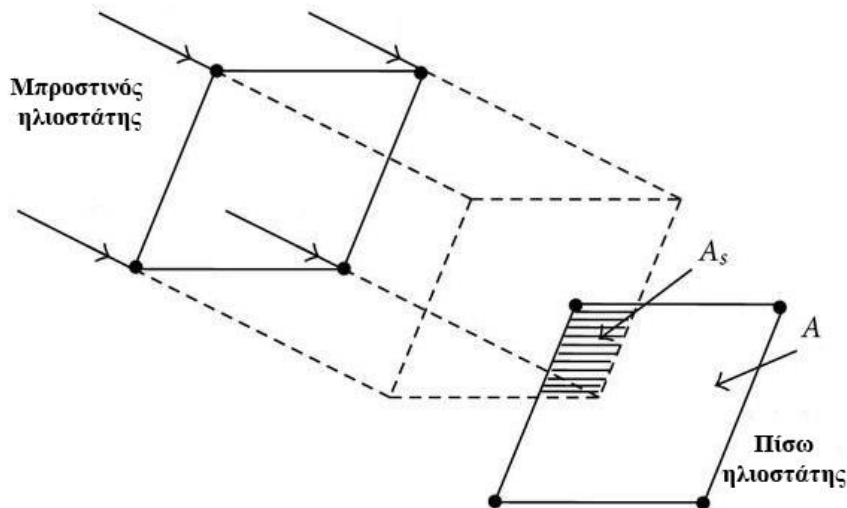


Σχήμα 5.5. Απώλειες σκίασης και παρεμβολής (Πηγή : <http://mcensustainableenergy.pbworks.com/> [5])

Αντίστοιχα, οι απώλειες παρεμβολής αναφέρονται στο φαινόμενο της παρεμπόδισης, κατά το οποίο ένας ηλιοστάτης μπροστινής σειράς παρεμβάλλεται στην πορεία των ανακλώμενων ακτίνων, από κάποιον από τους ηλιοστάτες της πίσω σειράς, προς τον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Οι απώλειες παρεμβολής αυξάνονται όσο πυκνότερα διατεταγμένοι είναι οι ηλιοστάτες στο πεδίο, ενώ είναι προφανώς και συνάρτηση του μεγέθους τους.

Οι απώλειες αυτές προκύπτουν από τη διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο και τη σχετική τους θέση, και είναι οι πιο σύνθετες για ένα ηλιοστατικό πεδίο, καθώς εξαρτώνται από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό παραγόντων, οι οποίοι συν τοις άλλοις μεταβάλλονται διαρκώς με το χρόνο. Για ένα τυπικό ηλιοστατικό πεδίο οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης ετησίως είναι περίπου 5,6%. Αν και η τιμή αυτή δείχνει μικρή, σε σχέση με τις υπόλοιπες απώλειες, παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη διαδικασία σχεδιασμού της διάταξης των ηλιοστατών στο πεδίο κατά το βέλτιστο τρόπο. Οι απώλειες σκίασης είναι σημαντικές σε μικρές γωνίες ηλιακού ύψους. Για το λόγο αυτό, τις πρώτες πρωινές ώρες, καθώς και πριν τη δύση του ήλιου και ιδιαίτερα το χειμώνα, όπου το ηλιακό ύψος είναι μικρό και οι ηλιοστάτες είναι σε σχεδόν κατακόρυφη θέση, οι απώλειες αυτές μεγιστοποιούνται.

Ύστερα από αρκετές μελέτες ηλιοστατικών πεδίων, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης είναι οι αποστάσεις μεταξύ γειτονικών ηλιοστατών, η θέση του ηλίου, το ύψος του πύργου, η κλίση του εδάφους, το μήκος των σειρών από ηλιοστάτες στο πεδίο, το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης και το σχήμα των ηλιοστατών. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως ο υπολογισμός των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης για ένα ηλιοστατικό πεδίο δεν είναι απλή διαδικασία, καθώς το αποτέλεσμα εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.



Σχήμα 5.6. Σκίαση ηλιοστάτη από τον μπροστινό του
 (Πηγή : K.-K. Chong and M. H. Tan. *Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field*. International Journal of Photoenergy, Volume 2012, Article ID 908364 2012)

Η απόδοση σκίασης (η_{sh}) και παρεμβολής (η_{bl}) ορίζονται ως η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο πεδίο των ηλιοστατών προς αυτή που θα προσέπιπτε σε επιφάνεια ίση με τη συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών. Ορίζοντας ως A_s το σκιασμένο εμβαδόν πάνω στην ανακλαστική επιφάνεια A του ηλιοστάτη, θα μπορούσαμε να εκφράσουμε τις απώλειες σκίασης του, με τη μορφή συντελεστή ως εξής :

$$\eta_{sh} = \left(1 - \frac{A_s}{A} \right) \times 100$$

Ομοίως μπορούμε να πράξουμε για τις απώλειες παρεμπόδισης. Ωστόσο, η μέτρηση των σκιασμένων εμβαδών στις επιφάνειες των ηλιοστατών δεν είναι χρηστική, και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μοντελοποίησης πύργων ηλιακής ισχύος, όπου πριν την κατασκευή της εγκατάστασης πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής σκίασης και παρεμπόδισης και να αξιολογηθεί για διάφορες διατάξεις των ηλιοστατών στο πεδίο, κάτι τέτοιο φαντάζει ανέφικτο. Για το λόγο αυτό, κατά το σχεδιασμό ηλιοστατικών πεδίων, χρησιμοποιούνται προγράμματα ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων (ray tracing), για τον λεπτομερή υπολογισμό των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης και την αφαίρεση τους από τη συνολική θερμική ισχύ που εισέρχεται στο ηλιοστατικό πεδίο, μέσω του ηλίου. Κατά τη χρήση των προγραμμάτων ανίχνευσης ακτίνων, ο υπολογιστής χρησιμοποιεί αλληλουχίες από 0 και 1, σύμφωνα με τον δυαδικό κώδικα. Τα σημεία ελέγχου που σκιάζονται ή παρεμποδίζονται παίρνουν την τιμή 0, σε αντίθεση με όλα τα υπόλοιπα στην επιφάνεια των ηλιοστατών που παίρνουν την τιμή 1. Ο αριθμός των ψηφίων με τιμή 1 αθροίζεται και διαιρείται με το σύνολο των σημείων που ανιχνεύονται, και με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ο συντελεστής σκίασης και παρεμπόδισης.

Γενικά, οι απώλειες αυτές περιορίζονται, με την τοποθέτηση των ηλιοστατών σε μεγαλύτερες μεταξύ τους αποστάσεις. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό, απαιτείται μεγαλύτερη έκταση πεδίου, γεγονός που ισοδυναμεί με μεγαλύτερο κόστος αγοράς γης, μη αποδοτική χρήση της διαθέσιμης έκτασης. Συνεπώς, οι αποστάσεις μεταξύ των ηλιοστατών αποτελούν αντικείμενο βελτιστοποίησης, ώστε να προκύψει βέλτιστος συνδυασμός βαθμού απόδοσης πεδίου και χρήσης της διαθέσιμης έκτασης.

Όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 5 αναλυτικότερα, ένας από τους στόχους που επετεύχθησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη διάταξη των ηλιοστατών στο χώρο, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε μηδενικές απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης.

Απώλειες Διαρροής (spillage losses)

Οι απώλειες διαρροής αναφέρονται στο ποσοστό της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που αφού έχει υποστεί ανάκλαση από τους ηλιοστάτες του πεδίου αποτυγχάνει να φτάσει στην απορροφητική επιφάνεια συναλλαγής του δέκτη. Σε αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές οι απώλειες διαρροής συγκαταλέγονται στις απώλειες του δέκτη, καθώς εξαρτώνται και από τη διαμόρφωση και τη γεωμετρία του, ωστόσο στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε να συμπεριληφθούν στις απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου. Αποτελούν ίσως τις μικρότερες απώλειες το ηλιοστατικού πεδίου, με τιμές στο εύρος 1,5-2%. Στις περιπτώσεις κεντρικού ηλιακού δέκτη με κοιλότητα οι απώλειες αυτές μεγιστοποιούνται, μιας και οι ακτίνες πρέπει να κατορθώσουν να περάσουν μέσα από το ειδικά διαμορφωμένο άνοιγμα.

Οι απώλειες διαρροής εξαρτώνται από ένα αρκετά μεγάλο σύνολο μεταβλητών που περιλαμβάνει αρκετά υποσυστήματα του ηλιακού πεδίου. Κυριότερες μεταβλητές είναι τα χαρακτηριστικά των ηλιοστατών και του κεντρικού δέκτη. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά στους ηλιοστάτες, κυρίαρχο ρόλο παίζει η τραχύτητα της ανακλαστικής επιφάνειας τους και η κυρτότητα της, καθώς τα δύο αυτά χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα την γωνία εκτροπής των ανακλώμενων ακτινών από τους ηλιοστάτες. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο έχει η ακρίβεια του συστήματος εντοπισμού της ακριβής θέσης του ήλιου και του μηχανισμού κίνησης του ηλιοστάτη καθώς ενδεχόμενη απόκλιση στη γωνία κλίσης του, ακόμα και της τάξεως λίγων mrad, μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση αρκετών μέτρων του ηλιακού αποτυπώματος από την επιφάνεια συλλογής του δέκτη.

Όσον αφορά στον κεντρικό ηλιακό δέκτη, όπως είναι λογικό, οι διαστάσεις του ανοίγματός του είναι αντιστρόφως ανάλογες με τις απώλειες διαρροής. Όσο μεγαλύτερο το άνοιγμα του δέκτη τόσο αυξάνονται και οι πιθανότητες για μία δέσμη ανακλώμενων ακτινών να διέλθει μέσα από αυτό. Ωστόσο, όσο μεγαλώνει το άνοιγμα της κοιλότητας, τόσο αυξάνονται και οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό, το τελικό μέγεθος του ανοίγματος ενός κεντρικού δέκτη κοιλότητας πρέπει να είναι προϊόν βελτιστοποίησης. Σε μία πραγματική εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος, τα ηλιακά αποτυπώματα, από τις αντανάκλασεις των ηλιοστατών στο επίπεδο του δέκτη δεν συγκεντρώνονται πάντα στο ίδιο κεντρικό σημείο της απορροφητικής επιφάνειας. Σε περίπτωση που συνέβαινε κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε καταστροφικά υψηλές τιμές

θερμικής ροής στο κέντρο και ανεπαρκείς για λειτουργία τιμές στα άκρα της. Έτσι, κάθε σταθμός επιλέγει μια στρατηγική διασποράς των ιχνών των ηλιοστατών του, πάνω στο επίπεδο του κεντρικού ηλιακού δέκτη, που θα ακολουθηθεί.

Ο υπολογισμός των απωλειών διαρροής είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία. Για την υλοποίηση του απαιτείται η γνώση της κατανομής της θερμικής ροής, λόγω της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το ηλιοστατικό πεδίο, πάνω στην επιφάνεια του κεντρικού δέκτη. Όπως και για τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης, έτσι και στην περίπτωση των απωλειών διαρροής ο υπολογισμός γίνεται μέσω προγραμμάτων ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων (ray tracing) για κάθε διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο. Τα προγράμματα αυτά, κατά την μοντελοποίηση της εγκατάστασης, χρησιμοποιούν την υπόθεση, ότι η κατανομή της ροής θερμότητας από τον κάθε ηλιοστάτη υπακούει με καλή ακρίβεια στην γνωστή κατανομή του Gauss, και με τον τρόπο αυτό οδηγούνται στην εκτίμηση των απωλειών διαρροής.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας στην ανάλυση που πραγματοποιείται στο 5ο κεφάλαιο, για εξωτερικό δέκτη κυλινδρικής διαμόρφωσης, θα θεωρηθεί ένας υψηλός βαθμός απόδοσης του πεδίου σχετικά με τις απώλειες διαρροής ίσος με: $\eta_{spill}=0,98$.

Ολικός Βαθμός Απόδοσης πεδίου

Ο ολικός βαθμός απόδοσης του πεδίου ηλιοστατών εκφράζεται, συνήθως ετησίως, ως ο μέσος όρος των βαθμών απόδοσης των ηλιοστατών που το αποτελούν, και υπολογίζεται από το γινόμενο:

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \times \eta_{att} \times \eta_{refl} \times \eta_{bl} \times \eta_{sh} \times \eta_{spill}$$

όπου οι όροι του γινομένου είναι στην ουσία οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης των απωλειών του πεδίου.

Εναλλακτικά, θα μπορούσε κανείς να ορίσει τον ολικό βαθμό απόδοσης ενός ηλιοστατικού πεδίου και ως τον λόγο της θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται στον κεντρικό ηλιακό δέκτη προς την ισχύ που προσπίπτει στη συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών μέσω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

5.2.2 Απώλειες Κεντρικού Δέκτη

Το δεύτερο υποσύστημα ενός πύργου ηλιακής ισχύος, το οποίο συναντούν οι ηλιακές ακτίνες, αφότου ανακλαστούν από το ηλιοστατικό πεδίο, είναι ο κεντρικός ηλιακός δέκτης. Εκεί εντοπίζεται ένα επίσης μεγάλο ποσοστό των απωλειών ισχύος της εγκατάστασης, το οποίο και θα αναλύσουμε στο παρόν κεφάλαιο.

Ο δέκτης παρουσιάζει απώλειες και των τριών ειδών μεταφοράς θερμότητας: συναγωγή, ακτινοβολία και αγωγή. Οι απώλειες που συναντώνται σε έναν κεντρικό ηλιακό δέκτη, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Απώλειες Συναγωγής
- Απώλειες Ακτινοβολίας
- Απώλειες Απορρόφησης
- Απώλειες Αγωγής

1) Απώλειες Ακτινοβολίας (Radiation Losses) [7]

Οι απώλειες ακτινοβολίας αναφέρονται στη θερμική ενέργεια που διαφεύγει, μέσω της εκπομπής υπέρυθρου και ορατού φωτός, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Μαζί με τις απώλειες συναγωγής, συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες απώλειες του υποσυστήματος του κεντρικού δέκτη, καθώς το άθροισμα και των δύο ισοδυναμεί περίπου με το 5-15% της μέγιστης εισερχόμενης ενέργειας από το ηλιοστατικό πεδίο στο δέκτη. Οι σημαντικότεροι παράμετροι που επηρεάζουν το μέγεθος των απωλειών ακτινοβολίας είναι το μέγεθος και η γεωμετρία του δέκτη, οι άνεμοι της περιοχής και η θερμοκρασία λειτουργίας του.

Για τον υπολογισμό τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_{\text{ap}} \cdot (T_{\text{cav}}^4 - T_{\text{a}}^4)$$

Όπου,

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4),$$

ε ο συντελεστής εκπομπής,

A_{ap} το εμβαδόν του ανοίγματος δέκτη

T_{cav} η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων

T_{a} η θερμοκρασία περιβάλλοντος

2) Απώλειες λόγω συναγωγής (Convection Losses) [8],[12]

Οι απώλειες αυτές αναφέρονται στη θερμική ενέργεια που χάνεται από την εξωτερική επιφάνεια του ηλιακού δέκτη λόγω ελεύθερης και εξαναγκασμένης συναγωγής. Η ελεύθερη συναγωγή προκαλείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας του δέκτη και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ενώ η εξαναγκασμένη συναγωγή από την κίνηση του αέρα επαπτομενικά στα τοιχώματά του. Στην περίπτωση του κεντρικού δέκτη το ποσοστό της ελεύθερης συναγωγής είναι συνήθως μεγαλύτερο. Οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι από τις σημαντικότερες για έναν ηλιακό δέκτη, διότι το μέγεθος τους μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο ποσοστό τον ολικό βαθμό απόδοσης του.

Το μέγεθος των απωλειών συναγωγής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος και η γεωμετρία του δέκτη, το μέγεθος της επιφάνειάς του (ή του ανοίγματός του αν πρόκειται για δέκτη κοιλότητας), η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτόν και η γωνία κλίσης του (για δέκτη κοιλότητας). Ένας αριθμός πειραμάτων με δέκτες κοιλότητας, έχει δείξει πως η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου συνεπάγεται και αύξηση των απωλειών συναγωγής. Επιπροσθέτως, η αύξηση της γωνίας κλίσης δ_R του κεντρικού δέκτη επιτρέπει σε όλο και μεγαλύτερες ποσότητες αέρα να εισέρχονται στην κοιλότητα και να απορροφούν τη θερμότητα των τοιχωμάτων του δέκτη. Σημαντικό ρόλο επίσης, διαδραματίζουν οι καιρικές συνθήκες της περιοχής και για την ακρίβεια η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου.

Για τον προσδιορισμό των απωλειών συναγωγής ακολουθείται συνήθως η μέθοδος των Siebers και Kraabel [9]. Σύμφωνα με την τελευταία, οι απώλειες συναγωγής σε έναν κεντρικό ηλιακό δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_{\text{cav}} - T_{\alpha}), \quad \mu\epsilon \quad h = (h_{\text{fc}}^{\alpha} - h_{\text{nc}}^{\alpha})^{1/\alpha}$$

Όπου,

h : ο γενικός συντελεστής συναγωγής,

A : το εμβαδόν της απορροφητικής επιφάνειας του δέκτη,

T_{cav} : η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του

T_{α} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

h_{fc} : ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής

h_{nc} : ο συντελεστής ελεύθερης συναγωγής.

α : εκθέτης που επιλέγεται με βάση το σχεδιασμό του δέκτη (για δέκτη κοιλότητας $\alpha=1$).

Ο συντελεστής ελεύθερης συναγωγής υπολογίζεται ως εξής [9]:

$$h_{\text{nc}} = 0,81 \cdot (T_{\text{w}} - T_{\alpha})^{0,426}$$

Αντίστοιχα, ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής για εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη ως εξής:

- Για $D \leq 4\text{m}$: $h_{\text{fc}} = \frac{1}{D} [0,3 + 0,488 \cdot \text{Re}^{0,5} (1 + (\frac{\text{Re}}{282})^{0,625})^{0,8}] \cdot 0,04199$
- $4 < D \leq 125\text{m}$: $h_{\text{fc}} = 14$
- $D > 125\text{m}$: $h_{\text{fc}} = 33,75 \cdot D^{-0,19}$

Όπου D είναι η διάμετρος του κυλίνδρου και Re ο αριθμός Reynolds, που ισούται με $\text{Re} = (1,751 \times 10^5) \times D$.

Σημείωση: για την περίπτωση του δέκτη με κοιλότητα δεν έχουν βρεθεί κατάλληλες εξισώσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής. Η τιμή του, χάριν απλότητας, μπορεί να τίθεται ίση με αυτή του συντελεστή ελεύθερης συναγωγής.

Εναλλακτικά, για δέκτες κοιλότητας ένα απλό μοντέλο υπολογισμού των απωλειών συναγωγής που προτείνεται είναι το εξής [10] :

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \dot{Q}_{\text{fc}} + \dot{Q}_{\text{nc}}$$

$$\text{Με } \dot{Q}_{\text{fc}} = 7631 \cdot \frac{A_{\text{ap}}}{W_{\text{ap}}^{0,2}} \quad \text{και} \quad \dot{Q}_{\text{nc}} = 5077 \cdot A_{\text{cav}}$$

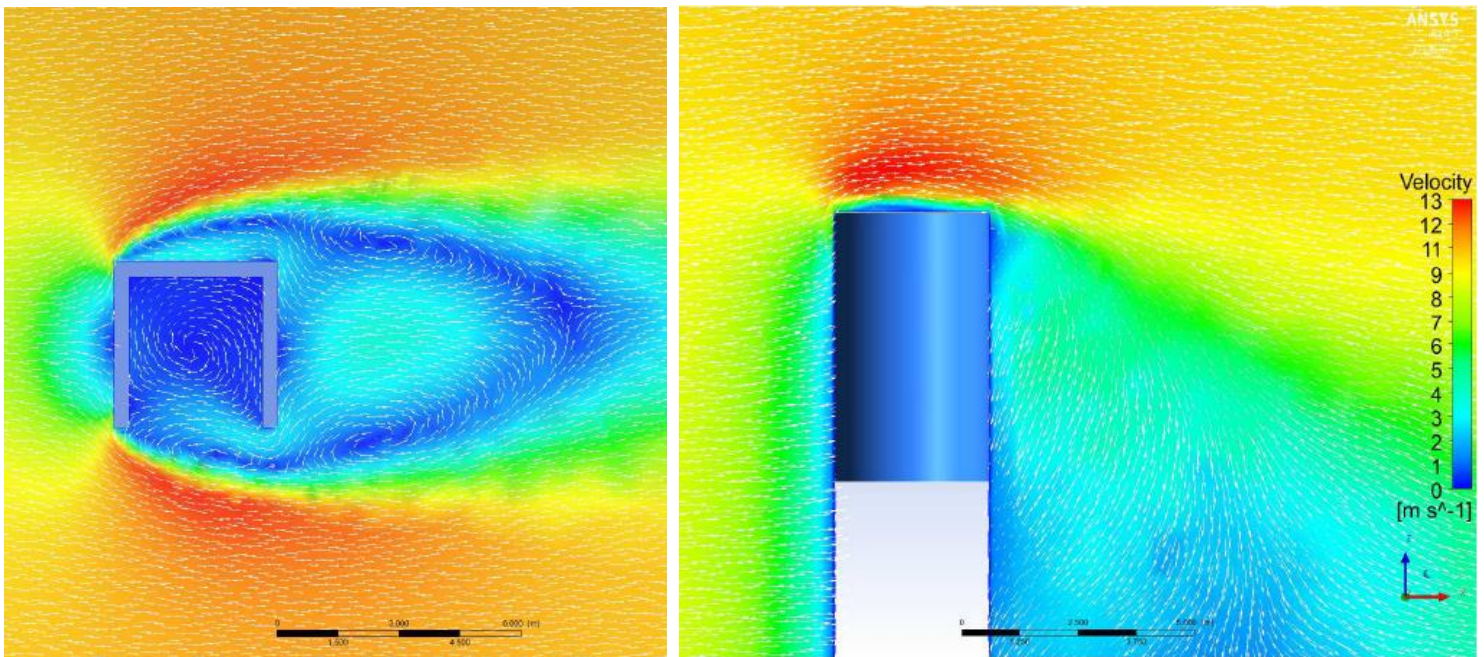
Όπου,

A_{ap} : το εμβαδόν του ανοίγματος στην πρόσοψη του δέκτη (m^2)

W_{ap} : το πλάτος του ανοίγματος

A_{cav} : η συνολική επιφάνεια στο εσωτερικό της κοιλότητας (m^2).

Ας δούμε τώρα πως μεταβάλλονται οι απώλειες λόγω συναγωγής υπό την επιρροή ανέμου ανάλογα με το είδος και τη γεωμετρία του κεντρικού δέκτη. Αρχικά στο σχήμα 5.7 παρατηρούμε την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου 10 m/s σε δέκτη εξωτερικής κοιλότητας και σε δέκτη κοιλότητας. Τονίζεται ότι η ροή του ανέμου είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 5.7. Κατανομή ταχύτητας ανέμου σε δέκτη κοιλότητας (αριστερά) και εξωτερικό κυλινδρικό (δεξιά) (Πηγή : R.Abdiwe, M.Haider, "Investigations on Heat Loss in Solar Tower Receivers with Wind Speed Variation", International Journal of Sustainable and Green Energy)

Είναι προφανές ότι η ταχύτητα του ανέμου κατά μήκος της θερμής επιφάνειας στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι χαμηλότερη από την ταχύτητα του ανέμου γύρω από την θερμή επιφάνεια ενός εξωτερικού δέκτη. Αυτό οφείλεται στην επανακυκλοφορία του αέρα, η οποία μειώνει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και ως αποτέλεσμα μειώνονται και οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής.

Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει τις διαφορές των απωλειών συναγωγής ανάλογα με τη γεωμετρία του δέκτη. Τα πειράματα έγιναν για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C, αλλά για μεταβαλλόμενες ταχύτητες ανέμου και διαφορετικές θερμοκρασίες δέκτη.

Θερμοκρασία Δέκτη	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Εξωτερικός Δέκτης				Δέκτης με Ανω-Κάτω Τοιχώματα			
		Πλευρικός Άνεμος		Μετωπικός Άνεμος		Πλευρικός Άνεμος		Μετωπικός Άνεμος	
		Rad. loss kW	Conv. loss kW	Rad. loss kW	Conv. loss kW	Rad. loss kW	Conv. loss kW	Rad. loss kW	Conv. loss kW
600	1	248.7	44.6	248.7	48.9	199.5	55.6	199.2	56.4
	5	248.7	100.0	248.7	150.4	196.6	109.5	196.5	127
	10	248.7	182.7	248.7	278.2	194.4	179.2	194.4	227.4
750	1	471.9	56.3	471.9	63.2	380.5	72.2	379.8	74.8
	5	471.9	123.4	471.9	183.5	376.7	140.2	374.9	162.6
	10	471.9	226.7	471.9	339.5	373.9	225	370.6	289.7
900	1	818.2	68.3	818.2	77.5	662.3	89.3	661.2	93.4
	5	818.2	144.4	818.2	214.6	656.2	169.6	653.5	196.2
	10	818.2	266.4	818.2	397.2	651.5	270.1	646.0	348.5
		Δέκτης Κοιλότητας χωρίς πλαϊνό τοίχωμα				Δέκτης Κοιλότητας			
600	1	118.6	56.7	118.3	56.6	11.5	14.5	11.6	10.8
	5	121.4	87.9	116.4	71.4	11.5	19.9	11.6	16.6
	10	130.9	143.6	119.2	101.7	11.1	34.2	11.1	31.1
750	1	198.1	76.8	197.7	76.4	22.6	20.4	22.7	15.1
	5	195.0	114.1	194.2	96.9	22.6	26.6	22.8	21.4
	10	193.1	181.3	192.4	135.3	22.2	44.7	22.2	39.4
900	1	346.3	97.2	345.8	97.0	40.0	26.4	40.1	19.5
	5	341.7	139.0	339.8	123.9	40.1	33.0	40.4	25.9
	10	338.5	218.6	336.5	168	39.7	53.6	39.7	47.3

Πίνακας 5.1. Απώλειες συναγωγής & ακτινοβολίας για διαφορετικές γεωμετρίες δέκτη (Πηγή [12])

Με βάση τα παραπάνω βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα :

- Οι απώλειες συναγωγής αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και οι υψηλότερες απώλειες λόγω συναγωγής επιτυγχάνεται στο μέγιστο της ταχύτητας του ανέμου.
- Με τη χρήση δέκτη κοιλότητας έχουμε πολύ λιγότερες απώλειες συναγωγής σε σύγκριση με τη χρήση εξωτερικών δεκτών (σε ποσοστό που πλησιάζει το 50%)
- ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, οι απώλειες ακτινοβολίας στο δέκτη κοιλότητας είναι σχεδόν 80% μικρότερες από τις αντίστοιχες απώλειες στον εξωτερικό δέκτη για την ίδια επιφάνεια απορρόφησης.

3) Απώλειες απορρόφησης/ανάκλασης (Receiver absorption/reflection Losses) [13]

Οι απώλειες απορρόφησης αναφέρονται στο ποσοστό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που ενώ προσπίπτει στην επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του δέκτη δεν απορροφάται από αυτήν και διαφεύγει λόγω ανάκλασης. Οι απώλειες αυτές λαμβάνουν μικρές τιμές, σε σύγκριση με άλλες απώλειες που εξετάσαμε ως τώρα μη ξεπερνώντας το 5%, και εξαρτώνται αποκλειστικά από το είδος της επικάλυψης της επιφάνειας του δέκτη. Για τον περιορισμό των απωλειών αυτών, χρησιμοποιείται βαφή υψηλής απορροφητικότητας που επικαλύπτει την προαναφερθείσα επιφάνεια. Απαραίτητη κρίνεται η ανανέωση της βαφής ανά τακτά χρονικά διαστήματα αλλιώς με την πάροδο του χρόνου οι απώλειες ανάκλασης θα αυξάνονται.

Ο συντελεστής απορρόφησης είναι ο λόγος της θερμικής ισχύος που απορροφά η επιφάνεια του ηλιακού δέκτη, προς τη θερμική ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια αυτή από το ηλιοστατικό πεδίο :

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{\dot{Q}_{\text{abs}}}{\dot{Q}_{\text{inc}}}$$

Γενικά, οι απώλειες αυτές είναι λίγο μεγαλύτερες στους εξωτερικούς δέκτες σε σχέση με τους δέκτες κοιλότητας, καθώς στους τελευταίους η ακτινοβολία υφίσταται πολλαπλές ανακλάσεις και δε διαφεύγει μεγάλο μέρος της. Μια συνήθης τιμή του συντελεστή απορρόφησης για εξωτερικό δέκτη είναι της τάξεως του 0,95 ενώ για δέκτη κοιλότητας μπορεί να φτάσει και το 0,98.

Σημείωση: στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής λαμβάνεται: $\eta_{\text{abs}}=0,98$.

Απώλειες Αγωγής (Conduction Losses)

Για εγκυκλοπαιδικούς λόγους αναφέρουμε και τις απώλειες αγωγής, μιας και το μέγεθος τους είναι συνήθως τόσο πολύ μικρό (<1%) που συνήθως παραλείπονται. Οι απώλειες αγωγής αναφέρονται στη θερμότητα που διαφεύγει από τον κεντρικό ηλιακό δέκτη, διαμέσου των μονωμένων επιφανειών του και των διατάξεων που τον στηρίζουν στην κορυφή του πύργου.

Για την ελαχιστοποίηση τους απαιτείται καλή μόνωση των επιφανειών που δεν χρησιμοποιούνται για συναλλαγή θερμότητας και όσο το δυνατόν λιγότερα σημεία επαφής του δέκτη με τον υπόλοιπο πύργο. Επίσης, η στήριξη πρέπει να γίνεται με υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως το ανοξείδωτο ατσάλι.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι απώλειες αγωγής παραλείπονται ($\eta_{\text{cond}}=1$).

Ολικός Βαθμός Απόδοσης Δέκτη

Ο ολικός βαθμός απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη υπολογίζεται από το γινόμενο:

$$\eta_{\text{rec}} = \eta_{\text{conv}} \cdot \eta_{\text{rad}} \cdot \eta_{\text{abs}} \cdot \eta_{\text{cond}}$$

Εναλλακτικά ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού δέκτη ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής θερμικής ισχύος που προσδίδεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο διατρέχει τις σωληνώσεις του, προς την συνολική θερμική ισχύ που φτάνει στην επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας :

$$\eta_{\text{rec}} = \frac{\dot{Q}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{inc}}} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta h}{\dot{Q}_{\text{inc}}}$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και Δh η διαφορά ενθαλπίας του από την είσοδο στην έξοδο.

Η εισερχόμενη θερμική ισχύς στην επιφάνεια του ηλιακού δέκτη ,από τους ηλιοστάτες του πεδίου υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\dot{Q}_{inc} = N \cdot A_{hel} \cdot I \cdot \eta_{field} \cdot \Gamma$$

όπου

N : ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου,

A_{hel} : το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιοστάτη,

I : η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI),

η_{field} : ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου

Γ : συντελεστής που εκφράζει το ποσοστό των ηλιοστατών που είναι εστιασμένοι στον κεντρικό δέκτη (σε θέση λειτουργίας), και λαμβάνεται συνήθως ίσος με 1.

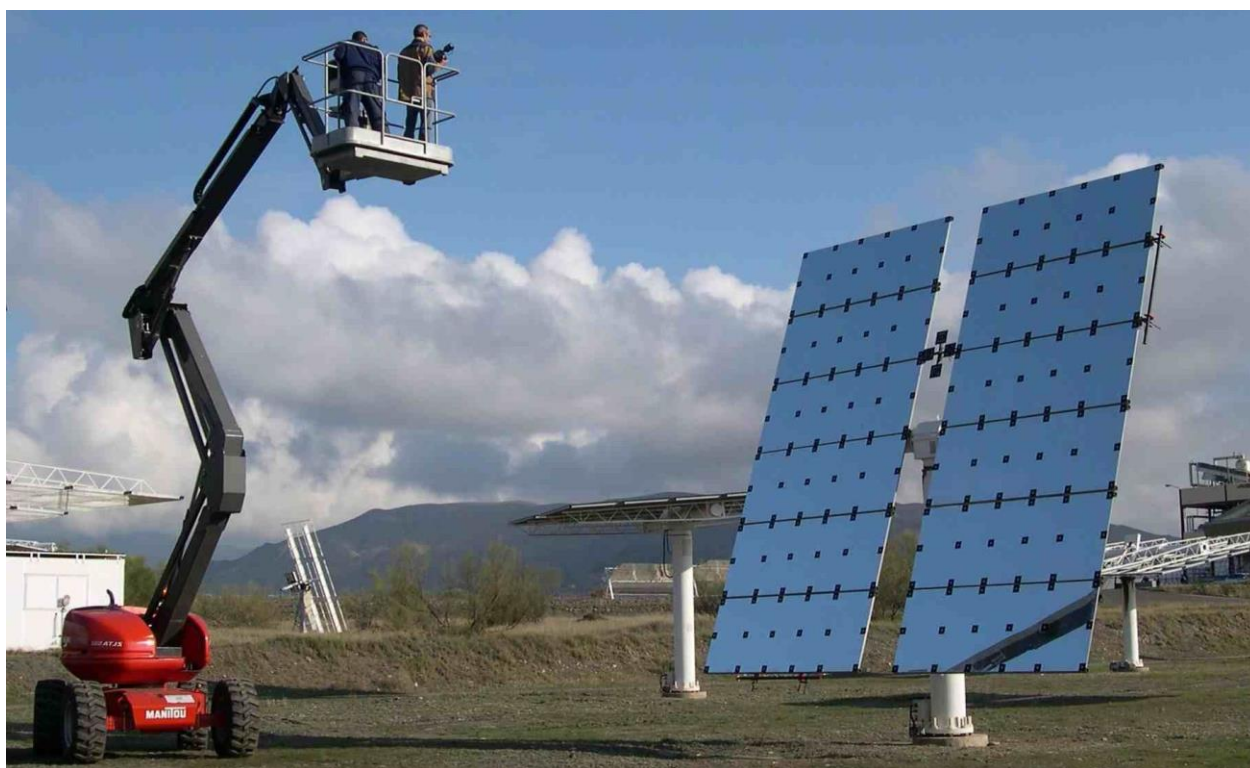
5.3 Προτάσεις για περιορισμό των απωλειών

5.3.1 Σύστημα καθαρισμού κατόπτρων

Το ηλιακό πεδίο των σταθμών με τεχνολογία ηλιακού πύργου αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ηλιοστατών, οι ανακλαστικές επιφάνειες των οποίων δεν είναι παρά κάτοπτρα που επικεντρώνουν τις ηλιακές ακτίνες στο δέκτη. Η συσσωρευμένη σκόνη και βρωμιά μειώνουν την ανακλαστική ικανότητα των κατόπτρων και έχουν άμεση αρνητική επίδραση στην παραγωγικότητα του σταθμού. Αν αναλογιστούμε ότι αρκετά συστήματα ηλιακού πύργου βρίσκονται σε ερημικές περιοχές με αμμώδες έδαφος τότε το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Για να αποκομίσουμε τα μέγιστα από την ηλιακή ενέργεια σκοπός είναι να διατηρηθεί η μέγιστη ανακλαστικότητα αυτών των κατόπτρων. Οικονομικές μελέτες δείχνουν ότι είναι οικονομικά αποδοτικό να διατηρείται η μέση ανακλαστικότητα του πεδίου πάνω από 90%. Ως εκ τούτου, μια μέθοδος τακτικού καθαρισμού κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση των επιθυμητών επιπέδων παραγωγικότητας. Το πόσο αποτελεσματική θα είναι αυτή η μέθοδος εξαρτάται από την εποχή του έτους και την τοποθεσία του σταθμού. Για παράδειγμα αν το ηλιακό πεδίο βρίσκεται πλησίον κεντρικής οδικής αρτηρίας τότε η ανάγκη συχνού καθαρισμού κρίνεται επιτακτική, καθώς θα έχουμε πολλές ακαθαρσίες.

Για τη λήψη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με τη συχνότητα πλυσίματος πρέπει να έχουμε συγκεντρώσει τα απαραίτητα στοιχεία από ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων ανακλαστικότητας. Οι μετρήσεις γίνονται με τη χρήση ρεφλεκτόμετρου (σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8. Μέτρηση ανακλαστικότητας ηλιοστάτη με χρήση ρεφλεκτόμετρου (Πηγή: <http://www.dlr.de/>)

Συμβατικές Μέθοδοι Καθαρισμού [15]

Δύο είναι οι συνηθέστερες μέθοδοι καθαρισμού κατόπτρων : η παραδοσιακή μέθοδος καταβρέχει τις ανακλαστικές επιφάνειες με μεγάλες ποσότητες νερού σε χαμηλή πίεση και δεύτερη μέθοδος αντίστοιχα με μικρότερες ποσότητες νερού σε χαμηλή πίεση (σχήμα 5.9). Η πρώτη μέθοδος είναι οικονομικότερη σε ότι αφορά τον εξοπλισμό αλλά απαιτεί υδάτινα αποθέματα. Η δεύτερη απαιτεί μεγαλύτερο κεφάλαιο για τον εξοπλισμό αλλά ενδείκνυται για περιοχές με περιορισμένους υδάτινους πόρους και εξοικονομεί την αρχική επένδυση μακροπρόθεσμα αφού έχουμε λιγότερη κατανάλωση σε νερό. Αξίζει να αναφέρουμε τρεις εταιρείες που έχουν παρουσιάσει καινοτόμες ιδέες στα συστήματα καθαρισμού: την O&MIP, την eSolar και τη Sener.

Η O&MIP σχεδίασε ένα νέο σύστημα καθαρισμού (βλέπε σχήμα 5.10) με απιονισμένο νερό υψηλής πίεσης που βασίζεται σε μια περιστρεφόμενη κεφαλή ψεκασμού, με την ονομασία «Twister», και απαιτεί μόνο έναν χειριστή. Με βάση πειράματα της εταιρείας αποδείχτηκε πιο αποτελεσματική μέθοδος σε σχέση με τις άλλες δύο. Ωστόσο, σύμφωνα πάντα με την εταιρεία O&MIP, οι μέθοδοι καθαρισμού που περιγράφηκαν παραπάνω είναι αποτελεσματικές για τον καθαρισμό κατόπτρων που έχουν υποστεί το συμβατικό λέρωμα από σκόνη και άμμο. Σε ότι αφορά τα κάτοπτρα που βρίσκονταν κοντά σε πύργους ψύξης, αυτές οι μέθοδοι δεν επαρκούσαν. Έτσι ο καθαρισμός τους γινόταν με ένα οξύ τζελ και ακολουθούσε ψεκασμός με απιονισμένο νερό υψηλής πίεσης. Ενώ η μέθοδος ήταν αποτελεσματική στην αποκατάσταση της ανακλαστικότητας (από 10% -40% πριν τον καθαρισμό στο 88% μετά), η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο για ένα πολύ μικρό τμήμα του πεδίου λόγω περιβαλλοντικής ανησυχίας για τη χρήση του οξέος.

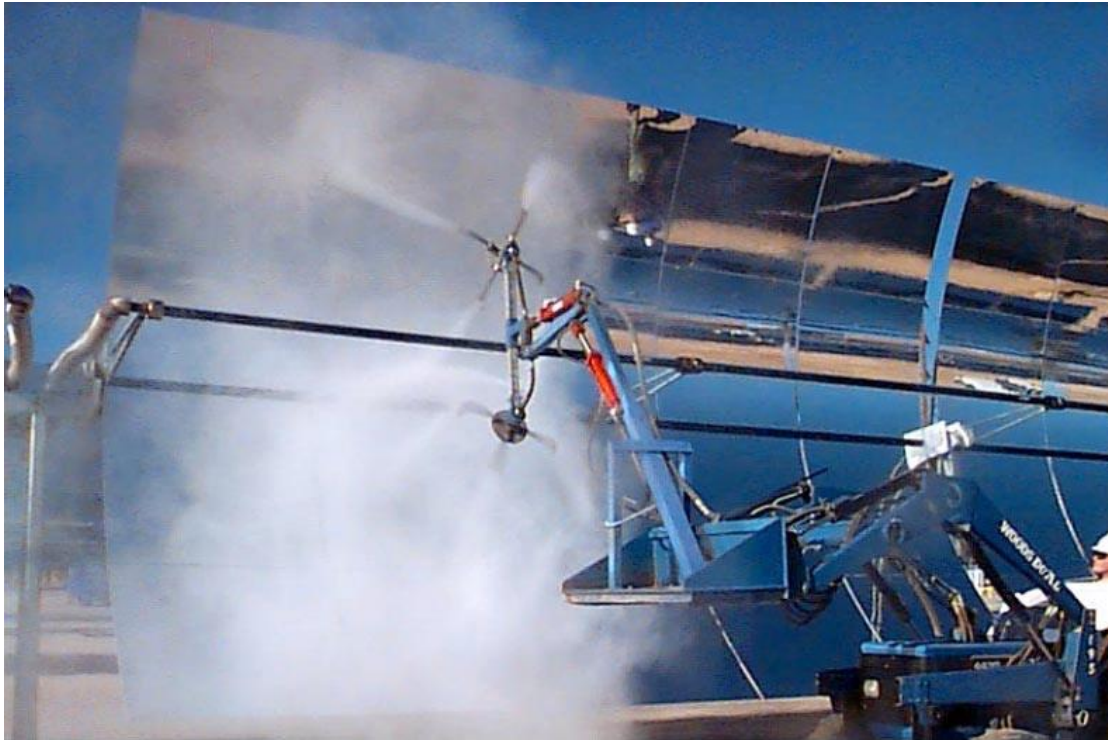
Η εταιρεία eSolar ανέπτυξε ένα ημι-αυτοματοποιημένο σύστημα (βλέπε σχήμα 5.11) για τον καθαρισμό ηλιοστατών μικρού μεγέθους εκμεταλλευόμενη την τακτική διάταξη του πεδίου. Το σύστημα είναι αυτοκινούμενο και χρησιμοποιεί ακροφύσια ψεκασμού υψηλής πίεσης για τον καθαρισμό ηλιοστατών. Η δομή στήριξης του ηλιοστάτη χρησιμεύει για την καθοδήγηση αυτού του οχήματος κατά τρόπον ώστε να μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα με υψηλή αξιοπιστία. Αυτό το σύστημα καθαρίζει αποτελεσματικά τους ανακλαστήρες, και αποδοτικά όσον αφορά τόσο την κατανάλωση νερού αλλά και την ταχύτητα καθαρισμού.

Στην πράξη, ένας τεχνικός καθοδηγεί χειροκίνητα το όχημα καθαρισμού στο τέλος μιας σειράς ηλιοστατών. Αφού τοποθετηθεί σωστά, το σύστημα ρυθμίζεται στην αυτόματη λειτουργία και αρχίζει να κινείται κατά μήκος της γραμμής, καθαρίζοντας τους ηλιοστάτες στη μία πλευρά του καθώς πηγαίνει. Παρατηρώντας το σχήμα 5.11 βλέπουμε ότι οι ηλιοστάτες στα δεξιά είναι καθαροί, ενώ εκείνοι στα αριστερά παραμένουν λερωμένοι. Το όχημα διαθέτει ενσωματωμένους αισθητήρες που ανιχνεύουν όταν το μηχάνημα έχει φτάσει στο τέλος της σειράς. Τότε το όχημα αντιστρέφει την κατεύθυνσή του και επιστρέφει στο σημείο που ξεκίνησε καθαρίζοντας του ηλιοστάτες στην άλλη πλευρά της γραμμής. Αυτή η διαδικασία διαρκεί περίπου 10 λεπτά, κατά τη διάρκεια των οποίων το όχημα έχει καθαρίσει περίπου 240m² ανακλαστικής επιφάνειας. Ο τεχνικός τότε ξοδεύει περίπου δυο λεπτά για να γεμίσει τη δεξαμενή του οχήματος με καθαρό νερό και να το επανατοποθετήσει στην επόμενη σειρά. Ο συνολικός ρυθμός καθαρισμού ανέρχεται σε περίπου 1200m² την ώρα. Για να αυξηθεί το ποσοστό καθαρισμού (και ως εκ τούτου να μειωθεί το κόστος του καθαρισμού), ένας μόνο τεχνικός μπορεί να διαχειριστεί ταυτόχρονα διάφορες μηχανές καθαρισμού. Κατά τη διάρκεια των 10 λεπτών, που χρειάζεται ένα

μηχάνημα για να κινηθεί κατά μήκος μιας γραμμής και πίσω, ο τεχνικός μπορεί να ξαναγεμίσει, επανατοποθετήσει και να ξεκινήσει αρκετές άλλες μηχανές. Αυτή η τεχνική τετραπλασιάζει το ρυθμό καθαρισμού, επιτρέποντας σε έναν εργαζόμενο να καθαρίσει ένα ολόκληρο πεδίο σε περίπου 3 ώρες.



Σχήμα 5.9. Καθαρισμός με νερό υψηλής πίεσης
(Πηγή : <http://social.csptoday.com/technology/csp-om-dust-proof-solar-fields>)



Σχήμα 5.10. Σύστημα καθαρισμού «Twister», της εταιρείας O&MIP
(Πηγή: <http://energy.gov/>)



Σχήμα 5.11. Ημι-αυτοματοποιημένο σύστημα καθαρισμού της εταιρείας eSolar
(Πηγή: <http://www.esolar.com/>)

Robot Hector [16]

Ξεχωριστή μνεία πρέπει να γίνει για την εταιρεία Sener, στην οποία σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και εν τέλει κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το σύστημα καθαρισμού με την ονομασία HECTOR. Πρόκειται για ένα καινοτόμο, αυτόνομο σύστημα καθαρισμού ηλιοστατών που βασίζεται σε ένα «στόλο» μικρών, αυτόνομων ρομπότ καθαρισμού. Εκτός από τα κάτοπτρα του συστήματος ηλιακού πύργου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε επίπεδα συστήματα φωτοβολταϊκών που επίσης επηρεάζονται από τη συσσώρευση σκόνης.

Το HECTOR είναι ένα ρομπότ μικρού μεγέθους το οποίο εκτελεί έναν ενιαίο και εξαιρετικά λεπτομερή καθαρισμό της επιφάνειας του καθρέπτη ενός ηλιοστάτη. Το μικρό μέγεθος και το βάρος του ευνοούν τη διαδικασία λειτουργίας και χειρισμού, έτσι ώστε ένας μικρό αριθμός από τέτοια ρομπότ να μπορεί να εκτελεί αποτελεσματικά τον καθαρισμό των κατόπτρων ενός ηλιακού πεδίου σημαντικού μεγέθους, ελαχιστοποιώντας έτσι το χρόνο και την ανθρώπινη παρέμβαση καθαρισμού. Ακόμα είναι εξοπλισμένο με μια σειρά αισθητήρων και λογισμικό GNC που του επιτρέπουν να κινείται αυτόνομα πάνω στην επιφάνεια του ηλιοστάτη χωρίς καμία ανθρώπινη επίβλεψη. Δεν χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία ρεύματος ή ύδρευσης για τη λειτουργία του, αφού το HECTOR φέρει τις δικές του μπαταρίες και δεξαμενή νερού. Η κατανάλωση του είναι τόσο χαμηλή ώστε επιτυγχάνονται σημαντικά επίπεδα καθαρισμού και αυτονομίας.

Σε ότι αφορά τη μέθοδο καθαρισμού το σύστημα HECTOR ακολουθεί μια διαφορετική προσέγγιση. Το ρομπότ διαθέτει ενσωματωμένη βούρτσα και σκουπίζει με φυσικό τρόπο την ανακλαστική επιφάνεια αφήνοντάς τη πρακτικά ξηρή. Έτσι αποτρέπεται η μετέπειτα συσσώρευση σκόνης και διατηρείται ο βαθμός ανακλαστικότητας σε υψηλά επίπεδα για περισσότερο, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους που αφήνουν την ανακλαστική επιφάνεια με νερά και η σκόνη «κολλάει» πάνω στην υγρή επιφάνεια.

Τα ρομπότ HECTOR χρειάζονται μόνο την εποπτεία ενός χειριστή για το γέμισμα της δεξαμενής νερού, την αλλαγή μπαταρίας και τη διανομή τους στο ηλιακό πεδίο. Για το τελευταίο, στα συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη ένα όχημα μεταφοράς οδηγείται από τον χειριστή και συντονίζει το σύνολο των ρομπότ. Η παράλληλη λειτουργία τους καθιστά γρήγορο και αποτελεσματικό τον καθαρισμό μεγάλων σταθμών, αυξάνοντας έτσι δραματικά την ικανότητα καθαρισμού ενός χειριστή. Επιπλέον, λόγω του ότι χειριστής εκτελεί μόνο καθήκοντα οργάνωσης και εποπτείας, ο κίνδυνος θραύσης κάποιου καθρέπτη ελαχιστοποιείται.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του HECTOR είναι ότι έχει σχεδιαστεί για ημερήσια και νυχτερινή λειτουργία. Νυχτερινή λειτουργία συνεπάγεται πολλά πλεονεκτήματα, τόσο για το εργοστάσιο όσο και τον ίδιο τον ηλιοστάτη. Επιτρέπει την εκτέλεση της διαδικασίας καθαρισμού, χωρίς να επηρεάζεται η παραγωγή, ενώ εκμεταλλεύεται την οριζόντια θέση τοποθέτησης των ηλιοστατών το βράδυ.

Συνοψίζοντας, τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος HECTOR είναι τα εξής:

- Αυτόνομο σύστημα καθαρισμού
- Διαχειριστής εκτελεί μη κρίσιμες εργασίες υποστήριξης
- Μεγιστοποίηση της ικανότητας καθαρισμού
- Ελαχιστοποίηση των ζημιών καθρέφτη, ανεξάρτητα από τις ανθρώπινες δεξιότητες
- Διατήρηση υψηλότερων μέσων επιπέδων ανακλαστικότητας
- Εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση νερού και ρεύματος
- Αντοχή στη βροχή και τον άνεμο.
- Εύκολα επεκτάσιμο σε μεγαλύτερους σταθμούς
- Ανθεκτικότητα σε απλή αστοχία υλικών
- Δυνατότητα νυχτερινής λειτουργίας.



Σχήμα 5.12. Ρομπότ καθαρισμού HECTOR (Πηγή : www.sener.es)

5.3.2 Επίδραση ανεμικών φορτίων και τρόποι αντιμετώπισης

Ο άνεμος αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη πρόκληση στον σχεδιασμό ηλιοστατών, ειδικά όταν προσπαθούμε να σχεδιάσουμε ηλιοστάτες με μικρό βάρος και χαμηλό κόστος κατασκευής. Οι μεγάλες, ανοιχτές, επίπεδες εκτάσεις όπου επιλέγονται κατά κύριο λόγο ως τοποθεσίες για την κατασκευή ηλιοστατικών πεδίων είναι και περισσότερο επιρρεπείς σε υψηλά ανεμικά φόρτια.

Οι ηλιοστάτες εξαρτώνται από έναν σωστό μηχανολογικό σχεδιασμό, προκειμένου να ξεπεράσουν περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως ο άνεμος. Μια αρκετά ισχυρή ριπή ανέμου μπορεί να βλάψει τον ανακλαστήρα ή ακόμα και προκαλέσει ανατροπή ολόκληρου του ηλιοστάτη αν δεν έχει σχεδιαστεί σωστά. Οι ανακλαστήρες είναι επίσης επιρρεπείς σε απότομες αλλαγές του ανέμου και μπορεί να μετατοπίσουν/εκτρέψουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία μακριά από το σημείο εστίασης. Το πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των πιθανών επιπτώσεων του ανέμου είναι η κατανόηση του αιολικού δυναμικού, δηλαδή το πως κατανέμεται σε ένα ανοιχτό πεδίο και πως αναμένεται να επηρεάσει ένα πεδίο ηλιοστατών. Ένας σωστός σχεδιασμός πρέπει να εξισορροπεί δύο απαιτήσεις: να εξασφαλίζει αποτελεσματική λειτουργία σε όλες, πλην των πλέον ακραίων, συνθηκών ανέμου και την αποφυγή ζημιών του ηλιοστάτη ακόμα και σε σχετικά ακραίες καιρικές συνθήκες. Η επίτευξη αυτών των απαιτήσεων σχεδιασμού επηρεάζει ένα σύστημα ηλιοστατών με διαφορετικούς τρόπους, τόσο στο σχεδιασμό και το σύστημα ελέγχου του ηλιοστάτη, όσο και στον περίγυρο του ηλιοστατικού πεδίου.

Προδιαγραφές σχεδιασμού ηλιοστατών

Όπως οι περισσότερες κατασκευές, έτσι και οι ηλιοστάτες, πρέπει να πληρούν κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις στατικής επάρκειας που θα διευκρινίζουν σε τι ταχύτητες ανέμου αντέχουν δομικά. Σύμφωνα με τα πρότυπα λειτουργίας που δημιούργησε η ASCE (American Society of Civil Engineers), δηλώνεται ότι οι ηλιοστάτες πρέπει να παραμένουν λειτουργικοί σε ταχύτητες ανέμου έως 40 m/s. Σκοπός είναι οι ηλιοστάτες κατά τη διάρκεια υψηλών ανεμικών φορτίων να παραμένουν ακλόνητοι, να μην έχουμε θραύση της δομής στήριξης ώστε να αποφεύγεται και η πρόκληση ζημιάς σε άλλους γειτονικούς ηλιοστάτες ή κατασκευές. Έτσι, σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, οι ηλιοστάτες θα μπορούσαν να μπουκ σε μια θέση «ασφαλείας» που θα μειώνει τα ανεμικά φορτία που δέχεται ο ανακλαστήρας, μειώνοντας έτσι τις καταπονήσεις και αυξάνοντας το προσδόκιμο ζωής. Αυτό δυστυχώς συμβαίνει σε βάρος της λειτουργίας του ηλιοστάτη, δηλαδή δεν έχουμε πλέον ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας.

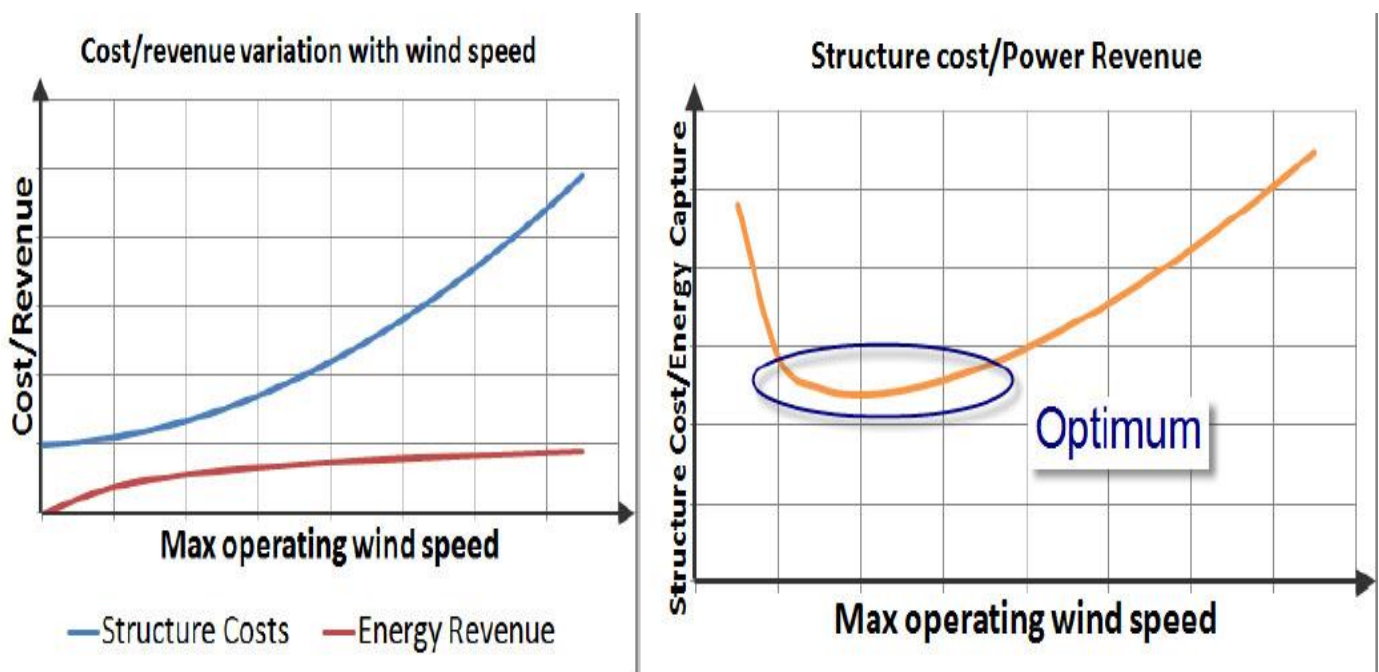
Ισοζύγιο λειτουργίας-κόστους κατασκευής

Σε αντίθεση με τις απαιτήσεις μας για την στατικότητα των ηλιοστατών, ο σχεδιασμός για βέλτιστη λειτουργία είναι ένα ισοζύγιο μεταξύ δαπανών για την επίτευξη μεγαλύτερου εύρους συνθηκών λειτουργίας και ανταποδοτικού οφέλους. Πρέπει δηλαδή οι δαπάνες να αντισταθμίζονται από τα οφέλη ενός τέτοιου εγχειρήματος.

Δεν θα είχε νόημα να γίνει ο ανακλαστήρας ηλιοστατών και η δομή του πολύ ανθεκτική για να λειτουργεί σε ταχύτητες ανέμου 40 m/s με επιπλέον κατασκευαστικό κόστος 10%, εάν η προκύπτουσα αύξηση των εσόδων ηλεκτρικής ενέργειας είναι μόλις 3%. Το ερώτημα

που αμέσως θέτει η πρόκληση του σχεδιασμού είναι «Ποιο θεωρείται ικανοποιητικό εύρος συνθηκών λειτουργίας;» Γνωρίζουμε ότι υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο συμβιβασμού μεταξύ του κόστους κατασκευής του ηλιοστάτη (το οποίο σχετίζεται άμεσα με το πόσο ανεμικό φορτίο μπορεί να αντέξει) και το μέγεθος της μέγιστης ταχύτητας ανέμου υπό την οποία θα μπορούσαν να λειτουργήσουν (το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με το ποσό των εσόδων από πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας). Το βέλτιστο αυτό σημείο μπορεί να βρεθεί εξετάζοντας την αναλογία μεταξύ του κόστους κατασκευής ηλιοστατών και των εν δυνάμει εσόδων.

Έτσι για μια υποψήφια τοποθεσία, αναλύουμε τα δεδομένα σχετικά με την ετήσια ταχύτητα του ανέμου καθώς και τα στοιχεία άμεσης κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας για μια περίοδο τουλάχιστον 5 ετών. Οι υψηλές ταχύτητες ανέμου αναγκάζουν τους ηλιοστάτες να μπουν σε θέση «ασφαλείας» και έτσι επηρεάζεται το ποσοστό της ετήσιας ακτινοβολίας DNI που μπορούμε να συλλέξουμε.



Σχήμα 5.13. Ισοζύγιο κατασκευαστικού κόστους και μέγιστης ταχύτητας ανέμου για λειτουργία (Πηγή : «RE<C: Heliostat Wind Mitigation», www.google.org)

Συνθήκες Πειράματος [18],[19],[20],[21]

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σημασία των ανεμικών φορτίων στο πεδίο των ηλιοστατών θα μελετήσουμε τα πειράματα που διεξήγαγε η εταιρεία google μέσω της ερευνητικής ομάδας RE<C. Η έρευνα επικεντρώνεται στην κατανόηση των βασικών τομέων της ροής του ανέμου, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου που ο άνεμος επηρεάζει το σχεδιασμό της δομής των ηλιοστατών, την ακρίβεια ανάκλασης, καθώς και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, χρησιμοποιήθηκε ένας θάλαμος με οπτικοποιημένη ροή. Έτσι μπορούμε να δούμε πώς ο άνεμος ρέει μέσα από ένα πεδίο ηλιοστατών και επηρεάζει την ανακλαστική ακρίβεια των

ηλιοστατών, καθώς και τη συμπεριφορά της ροής. Η οπτικοποίηση της ροής παρέχει μια ταχεία ποιοτική μέθοδο για την απόκτηση επίγνωσης στα φαινόμενα ροής και τις συνέπειες από τοποθέτηση εμποδίων. Το πείραμα αυτό συμπληρώνει άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των επιπτώσεων του ανέμου, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων σε αεροδυναμική σήραγγα.

Ο θάλαμος οπτικοποιημένης ροής που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στη NASA Ames και είναι μια μεγάλη δεξαμενή γεμάτη με νερό ομοιόμορφης, στρωτής ροής σε αργή κίνηση (3 cm/s). Μοντέλα ηλιοστατών μικρής κλίμακας (1:30) τοποθετούνται στον πάτο της δεξαμενής, το νερό αφήνεται να ανακάμψει από τη διαταραχή, και στη συνέχεια μια φθορίζουσα χρωστική βαφή UV αφήνεται σε πολλαπλά σημεία ανάντη των μοντέλων. Οι ακριβείς διαστάσεις των μοντέλων ήταν 200mm x 200mm x 5mm με ύψος στήριξης 150mm.

Με την παρατήρηση αυτών των γραμμών ροής της βαφής, έχουμε αποκτήσει γνώσεις πάνω στη συνολική συμπεριφορά της ροής γύρω από το μοντέλο. Ειδικότερα, σε περιοχές όπου οι γραμμές ροής συμπιέζονται και κινούνται πιο κοντά η μια στην άλλη αντιπροσωπεύουν περιοχές με υψηλότερη ταχύτητα ροής. Σημεία των γραμμών ροής με έντονες διαταραχές συσχετίζονται με την εξαγωγή ενέργειας από το αντικείμενο δημιουργώντας τη διαταραχή (το αντικείμενο δέχεται αεροδυναμικό φορτίο). Η ροη παρατηρήθηκε κάτω από διάφορες συνθήκες. Στις εικόνες από τη μελέτη η ροή κινείται από αριστερά προς τα δεξιά.

Τα ποιοτικά πειράματα μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύτιμα για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων φυσικών αλληλεπιδράσεων κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης. Επιβεβαιώθηκαν μερικές αναμενόμενες συμπεριφορές της ροής, αλλά επίσης πρόέκυψαν νέες ενδιαφέρουσες συμπεριφορές που αξιοποιήθηκαν στη διαμόρφωση άλλων πειραμάτων σε αεροδυναμική σήραγγα. Για παράδειγμα, βρέθηκε ότι οι ημι-πορώδης φράκτες έχουν σημαντική ποιοτική επίδραση στη μείωση της ταχύτητας ροής του αέρα μέσα από το πεδίο, αλλά ότι η χρησιμοποίηση στερεών τειχών, καθώς και φυσικών ή τεχνικών αναχωμάτων μπορεί πραγματικά να αυξήσει τα ανεμικά φορτία.

Πειράματα σε μεμονωμένο ηλιοστάτη

Τα πειράματα ξεκίνησαν με την απεικόνιση της ροής του ανέμου σε έναν μεμονωμένο ηλιοστάτη (βλέπε σχήμα 5.14). Όπως αναμενόταν, είδαμε σημαντικές αναταράξεις και ανάμιξη της ροής (που αντιπροσωπεύει αεροδυναμικά φορτία) για ηλιοστάτη σχεδόν κάθετα προς τον άνεμο, και πολύ λιγότερη ανάμιξη της ροής για ηλιοστάτη προσανατολισμένο παράλληλα προς το έδαφος.

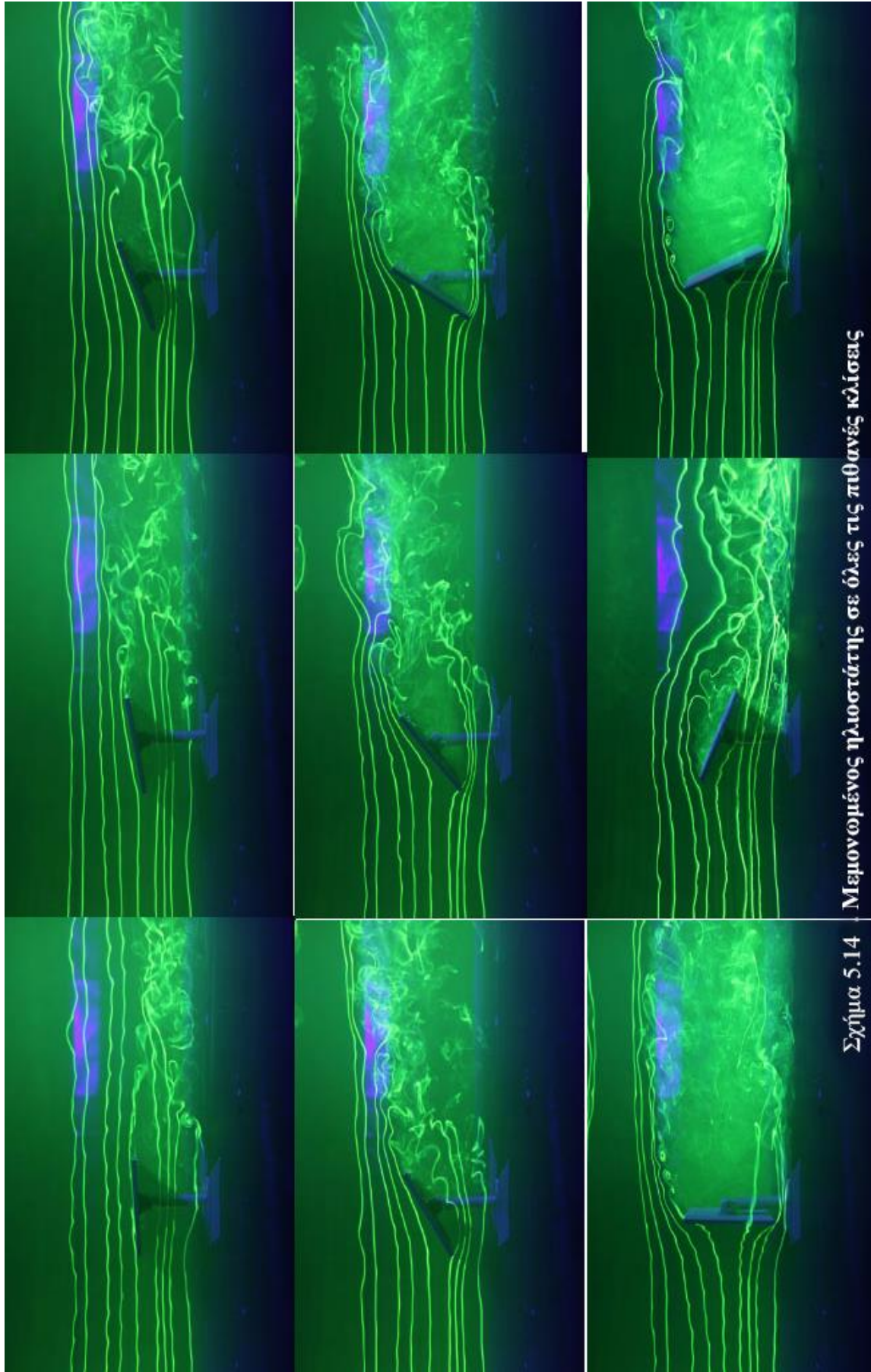
Με βάση αυτό το μοντέλο ροής, συνεπάγεται ότι η τοποθέτηση ηλιοστατών παράλληλα με το έδαφος θα χρησιμεύσει ως μια καλή θέση «ασφαλείας» για την εναπόθεση των ηλιοστατών σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Επειδή οι συνθήκες του ανέμου έχουν την τάση να επιδεινώνονται τη νύχτα, η παράλληλη τοποθέτηση των ηλιοστατών μετά τη δύση μπορεί να κρατήσει την καταπόνηση από ανεμικά φορτία στο ελάχιστο. Ακόμα, αυτό το είδος της απεικόνισης της ροής δείχνει γρήγορα ποια σχεδιαστικά χαρακτηριστικά μπορεί να προκαλέσουν διαταραχές της ροής, καθοδηγώντας μας στον σχεδιασμό πιο

αεροδυναμικών και ανθεκτικών εξαρτημάτων. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που παρατηρήθηκε στις μελέτες ήταν η παρουσία στροβιλισμών στη ροή. Γενικά, σύμφωνα με τη μηχανική των ρευστών στροβιλισμούς στη ροή έχουμε όταν το ρευστό περάσει πάνω από ένα αμβλύ αντικείμενο, σε ειδικές συνθήκες ροής, και αρχίσει να αποκολλάται από την επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτή η αποκόλληση έχει ως αποτέλεσμα η ροή να διέρχεται μέσα από ζώνες διαφορετικής πίεσης που σχηματίζονται και έτσι έχουμε φαινόμενα στροβιλισμού.

Πειράματα σε ηλιοστατικό πεδίο

Μελετώντας ένα πεδίο ηλιοστατών στη δεξαμενή οπτικοποιημένης ροής έγινε κατανοητό το πώς οι ηλιοστάτες μπορούν να προστατεύσουν ο ένας τον άλλο από τον άνεμο. Βρέθηκε, για παράδειγμα, ότι πέρα από την τέταρτη σειρά ηλιοστατών, η ροή ήταν αναμειγνυόμενη σε πού μεγάλο βαθμό και η πλειοψηφία της μοντελοποιημένης αιολικής ενέργειας είχε εξαχθεί από τις τρεις πρώτες σειρές ηλιοστατών. Η πληροφορία αυτή ήταν σημαντική τόσο για τη διαμόρφωση των άλλων πειραμάτων πάνω στην επίδραση των ανεμικών φορτίων : από δω και πέρα χρειαζόμαστε αποτελέσματα μόνο μέχρι την τέταρτη σειρά ηλιοστατών ενός πεδίου, αναμένοντας τα αποτελέσματα των φορτίων στις επόμενες σειρές να είναι αρκετά παρόμοια.

Κατανοήσαμε επίσης τι συμβαίνει όταν οι ηλιοστάτες τοποθετούνται σε θέση «ασφαλείας» ή αλλιώς υπό μηδενική κλίση. Στην οπτικοποίηση της ροής μας βλέπουμε ότι οι γραμμές ροής παραμένουν αρκετά ομαλές και ομοιόμορφα κατανεμημένες πάνω από το πεδίο ηλιοστατών, με ελάχιστες διαταραχές σε όλο το πεδίο. Αυτό δείχνει ότι μία πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας εξάγεται από τη ροή από τους ηλιοστάτες και ότι τα αεροδυναμικά φορτία παραμένουν στο ελάχιστο για το μεγαλύτερο μέρος του πεδίου.



Σχήμα 5.14 Μειονομένοσ ηλιοστώτησ σε όλεσ τισ πιθανέσ κλίσεισ

(Πηγή : «RE<C: Heliostat Flow Visualization Experiments», www.google.org)

Μέθοδοι περιορισμού των ανεμικών φορτίων

Υπάρχουν αρκετές επιλογές για τον περιορισμό των ανεμικών φορτίων, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής φρακτών για τον άνεμο ή τη φύτευση ψηλών δέντρων γύρω από ένα πεδίο ηλιοστατών.

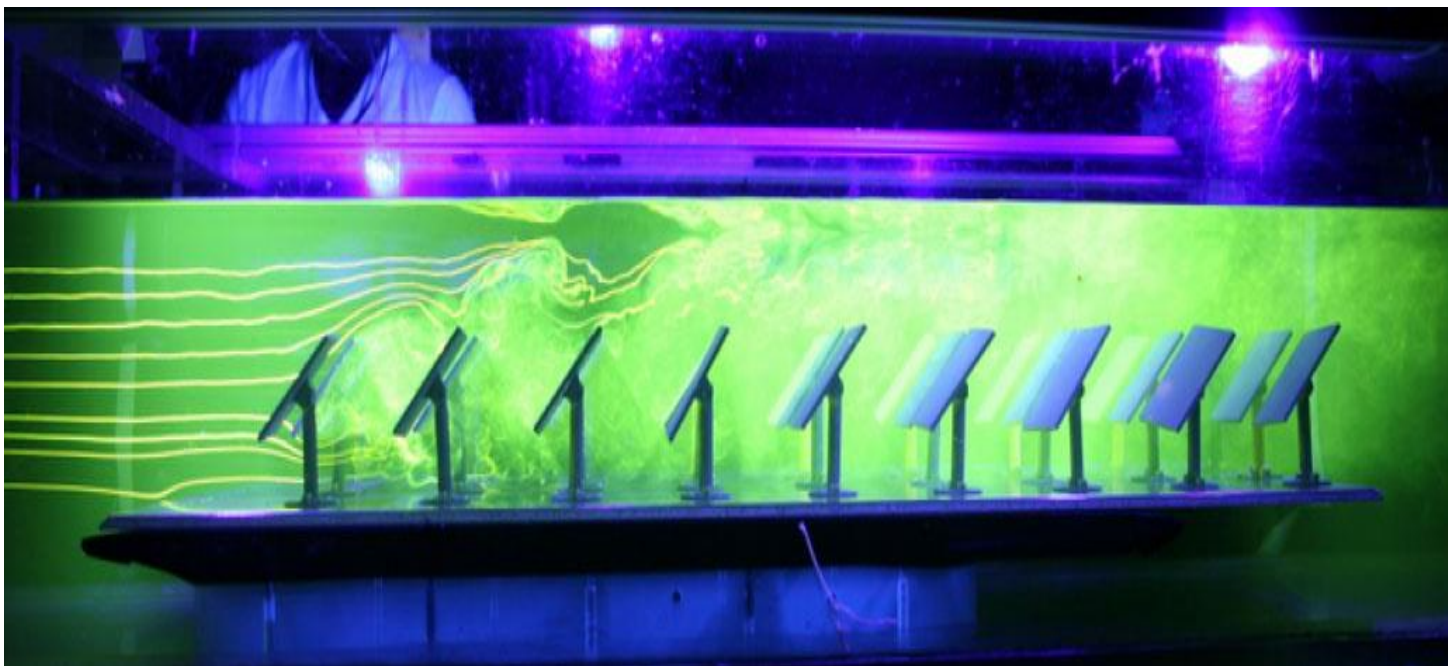
Επόμενο βήμα ήταν η απεικόνιση που έχουν οι διάφορες στρατηγικές για τον περιορισμό του ανέμου, μεταξύ των οποίων στέρεοι φράχτες, πορώδης περιφράξεις, και αναχώματα (Παράρτημα). Οι εικόνες αντανακλούν μερικές από αυτές τις στρατηγικές και τις επιπτώσεις που είχαν στην κατάντη ροή. Με τις γνώσεις που αποκτήθηκαν από την οπτικοποίηση της ροής, δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί φράχτη, δεδομένου ότι η τοποθέτηση φράχτη ανάντη της ροής φάνηκε να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση πολλαπλών φρακτών φάνηκε να έχει μια ποιοτική επίδραση στη μείωση της τοπικής ταχύτητας ροής στο ηλιακό πεδίο σε σύγκριση με την τοποθέτηση μονού φράκτη. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν σε πειράματα αεροδυναμικής σήραγγας με τη σύγκριση των παρατηρούμενων φορτίων σε ηλιοστάτη χωρίς φράχτη, με έναν ανάντη φράχτη, και με πολλαπλούς ανάντη φράχτες.

Στα αξιοσημείωτα είναι ότι στα σχήματα 5.17 και 5.18 παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση ενός φράκτη με ύψος μεγαλύτερο από το ύψος των ηλιοστατών επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα. Ιδανικό ύψος φράκτη φαίνεται να είναι 75-85% από το ύψος του ηλιοστάτη (συμπεριλαμβανομένης της στήριξης) αν και είναι ακόμα αντικείμενο προς μελέτη.

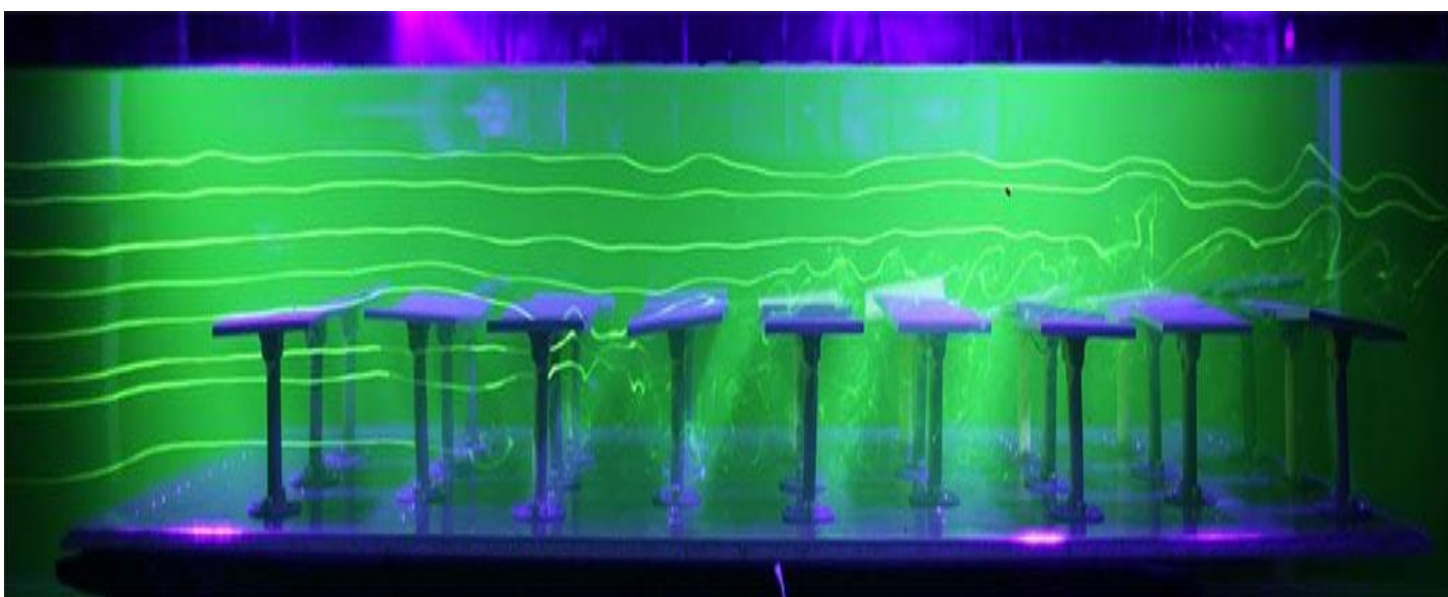
Τελικά Συμπεράσματα

Τα παραπάνω πειράματα μας βοηθούν στην κατανόηση της διαμόρφωση της ροής του αέρα και στο πώς επηρεάζει το πεδίο των ηλιοστατών. Είμαστε σε θέση να αντλήσουμε τα ακόλουθα ποιοτικά συμπεράσματα:

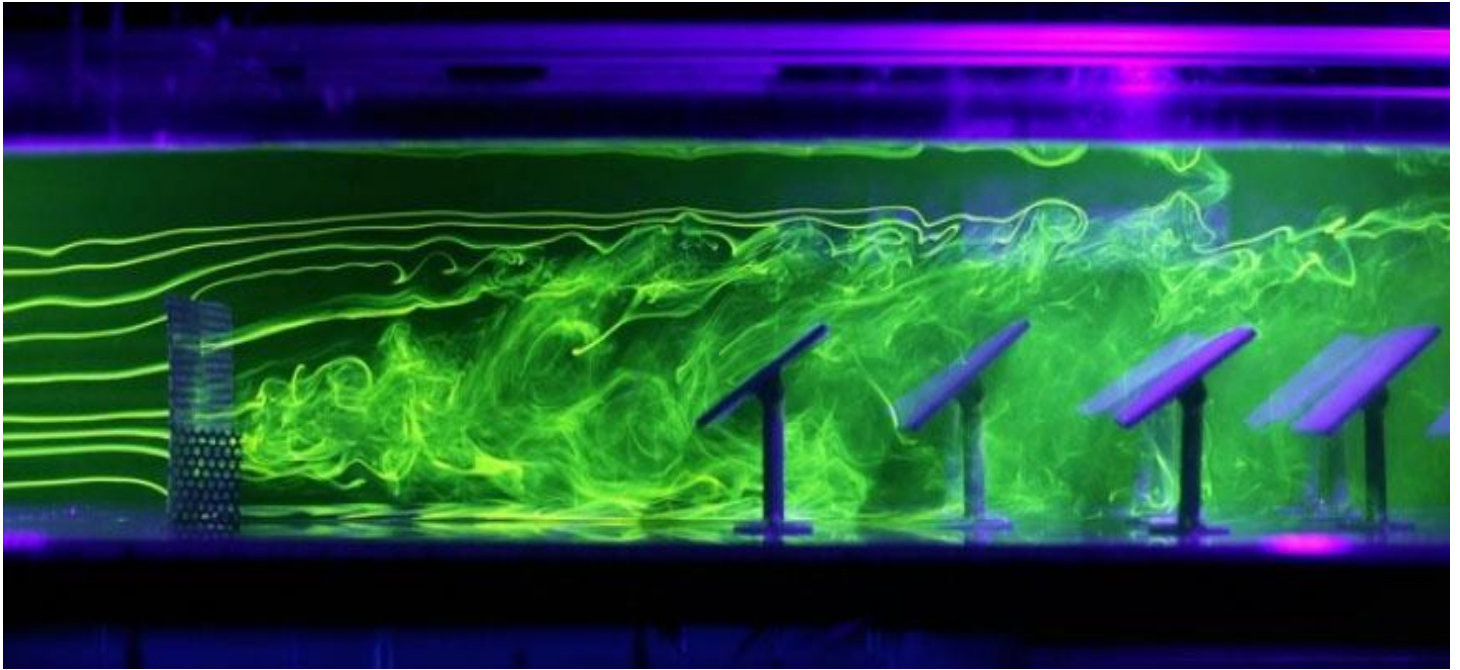
1. Οι ηλιοστάτες στην εξωτερική άκρη ενός πεδίου του ηλιοστάτη δέχονται τα υψηλότερα φορτία ανέμου, αλλά προστατεύουν τους υπόλοιπους ηλιοστάτες του πεδίου. Έτσι παρέχουν ένα βασικό επίπεδο προστασίας διαχέοντας την ροή του ανέμου
2. Η τοποθέτηση ημι-πορώδων φρακτών έχει σημαντικό αντίκτυπο στη μείωση της ταχύτητας του ανέμου πριν εισέλθει στο ηλιοστατικό πεδίο
3. Η εγκατάσταση πολλαπλών φρακτών ανάντη του πεδίου, παρότι είναι δαπανηρή, μπορεί να μειώσει αρκετά τα φορτία ανέμου στους ηλιοστάτες ώστε να επιτρέψει την ανεμπόδιστη λειτουργία τους (άρα αποφυγή διακοπών λειτουργίας που οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας). Ακόμα μπορεί να επιτρέψει μια πιο ελαφριά και οικονομική κατασκευή των ηλιοστατών, με μικρότερη έμφαση στη στατικότητα και μεγαλύτερη ευκολία στην κίνηση.
4. Η τοποθέτηση ηλιοστατών σε οριζόντια θέση ασφαλείας, πρέπει να χρησιμοποιείται είτε τις απογευματινές/βραδινές ώρες που δεν έχουμε ηλιοφάνεια, είτε σε περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών που δεν επαρκεί η περίφραξη.



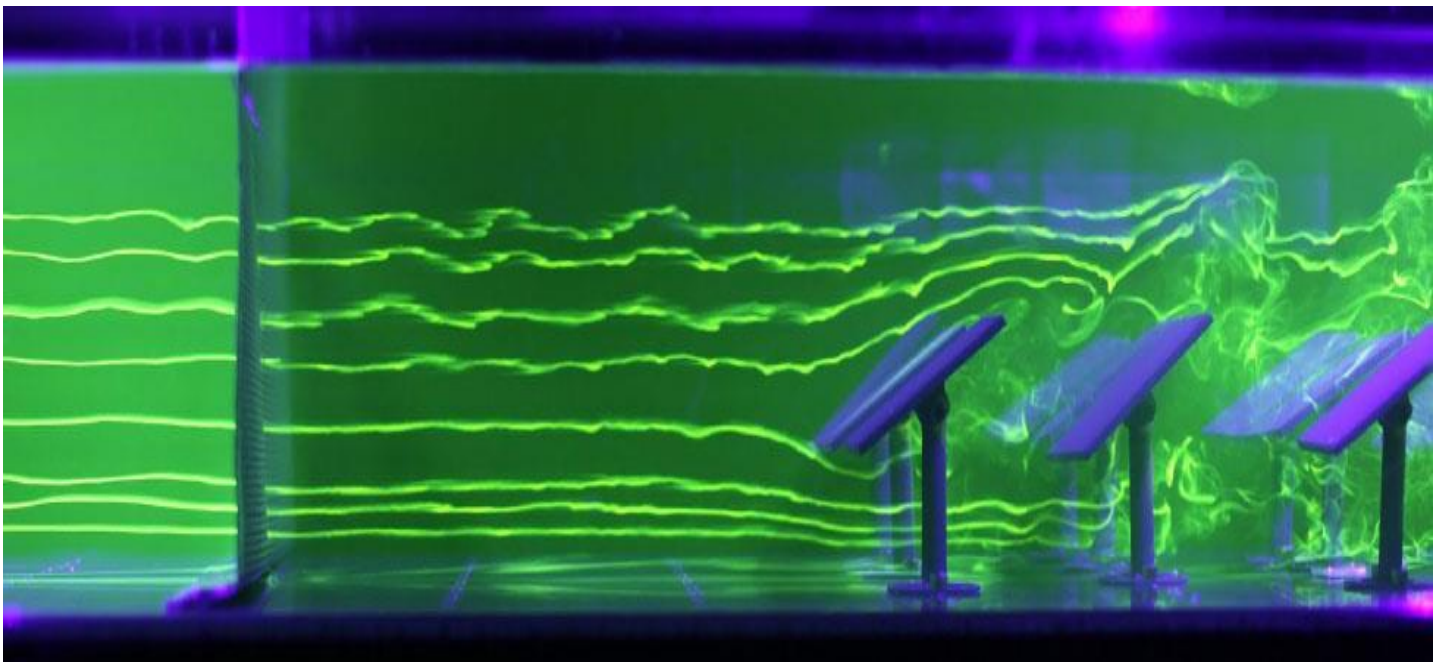
Σχήμα 5.15. Επίδραση ανεμικού φορτίου σε ηλιοστάτες υπό κλίση 45° (Πηγή : «RE<C: Heliostat Flow Visualization Experiments», www.google.org)



Σχήμα 5.16. Επίδραση ανεμικού φορτίου σε ηλιοστάτες υπό κλίση 0° (Πηγή : «RE<C: Heliostat Flow Visualization Experiments», www.google.org)



Σχήμα 5.17. Χρήση ημι-πορώδους φράκτη με ύψος όσο των ηλιοστατών (Πηγή : «RE<C: Heliostat Flow Visualization Experiments», www.google.org)



Σχήμα 5.18. Χρήση ημι-πορώδους φράκτη με πολύ μεγάλο ύψος (Πηγή : «RE<C: Heliostat Flow Visualization Experiments», www.google.org)

5.4 Σχεδιασμός ηλιοστατικού πεδίου

5.4.1 Διάταξη πεδίου ηλιοστατών

Οι κύριες διατάξεις για ένα ηλιοστατικό πεδίο είναι δύο : η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου βόρεια του πύργου (North Field Layout), βλέπε σχήμα 5.19, και η περιβάλλουσα διάταξη (Surrounding Field Layout), σχήμα 5.20. Η επιλογή της διάταξης έχει να κάνει κυρίως με τις απαιτήσεις ισχύος από το σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη.

Η τιμή της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης, που αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή για την επιλογή της μίας ή της άλλης διάταξης, είναι περίπου 90MWe. Για σταθμούς με απαίτηση ισχύος 90MWe ,χωρίς σύστημα αποθήκευσης, συνίσταται η επιλογή της διάταξης των ηλιοστατών βόρεια του πύργου με δέκτη κοιλότητας, ενώ για ισχύ μεγαλύτερη των 90MWe, η περιβάλλουσα διάταξη σε συνδυασμό με κυλινδρικό εξωτερικό ηλιακό δέκτη φαίνεται ως καλύτερη λύση. Αυτός ο διαχωρισμός εξηγείται ως εξής: για ένα πεδίο με βόρεια διάταξη όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις ισχύος, θα απαιτείται και η τοποθέτηση όλο και περισσότερων ηλιοστατών σε ακόμα πιο μακρινή απόσταση από τον πύργο. Αυτό θα οδηγούσε σε σημαντική αύξηση των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας από ένα σημείο και μετά. Έτσι προτάθηκε η τοποθέτηση ηλιοστατών περιμετρικά του πύργου, αν και αυτή η διάταξη έχει το σοβαρό μειονέκτημα των μεγαλύτερων απωλειών συνημιτόνου.

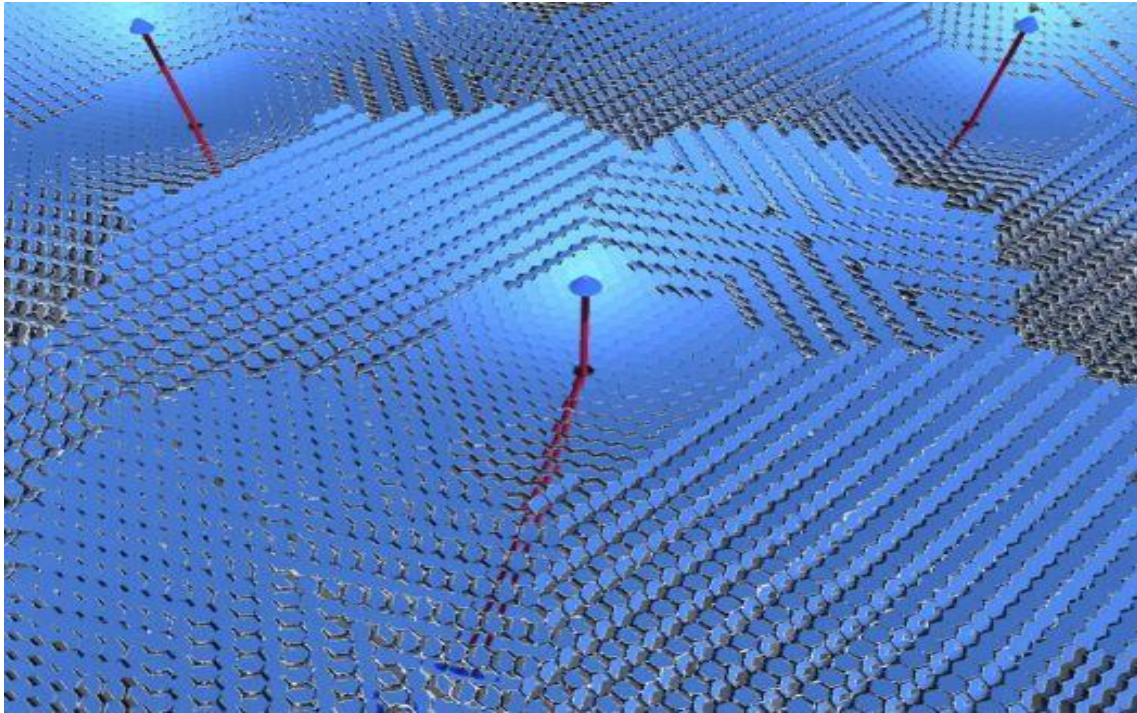


Σχήμα 5.19. Πεδίο ηλιοστατών βόρειας διάταξης (σταθμός PS10, Ισπανία)



Σχήμα 5.20. Πεδίο ηλιοστατών περιβάλλουσας διάταξης (σταθμός Gemasolar, Ισπανία)

Η πιο πρόσφατη καινοτομία στις διατάξεις πεδίου ηλιοστατών έρχεται από το Πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ, στην Αυστραλία [22]. Πρόκειται για ηλιακό πεδίο με πολλαπλούς πύργους και πάρα πολύ πυκνή διάταξη των ηλιοστατών (σχήμα 5.21). Στην ουσία η τοποθέτηση των ηλιοστατών γίνεται στην ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχει παρεμπόδιση της κίνησής τους. Θεωρητικά ένα πεδίο ηλιοστατών με υψηλή πυκνότητα μπορεί να μεταφέρει την ακτινοβολία στο δέκτη του πύργου με σχεδόν μέγιστη απόδοση αφού όλοι οι ηλιοστάτες απέχουν πολύ λίγο από τον πύργο. Ωστόσο, η πυκνότητα της διάταξης οδηγεί σε χαμηλότερο ποσοστό αξιοποίησης της συνολικής εγκατεστημένης ανακλαστικής επιφάνειας λόγω απωλειών παρεμπόδισης και σκίασης. Έτσι, οι ηλιοστάτες που βρίσκονται πιο μακριά από τον πύργο έχουν λίγο μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους ώστε να μην παρεμποδίζουν ο ένας τον άλλο.



Σχήμα 5.21. Πειραματική διάταξη ηλιοστατικού πεδίου με πολλαπλούς πύργους (Πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ, Αυστραλία)

5.4.2 Επιλογή τύπου Δέκτη και σχεδιασμός

Ο δέκτης, όντας το υποσύστημα που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρει τη θερμική ενέργεια στο HTF, είναι ένα σημαντικό υποσύστημα σε μια ηλιοθερμική μονάδα παραγωγής ενέργειας. Στο κεφάλαιο 3.3.2.1 παρουσιάσαμε τους κύριους τύπους δέκτη και στο κεφάλαιο 5.2 καταγράψαμε, μεταξύ άλλων, τις απώλειες για το αυτό το υποσύστημα. Εκεί έγινε φανερό ότι ο δέκτης κοιλότητας παρουσιάζει μειωμένες απώλειες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαμορφώσεις δέκτη. Πιο συγκεκριμένα υπενθυμίζουμε ότι:

- ο δέκτης κοιλότητας παρουσιάζει πολύ λιγότερες απώλειες συναγωγής σε σύγκριση με τη χρήση εξωτερικού δέκτη (σε ποσοστό που πλησιάζει το 50%)
- ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, οι απώλειες ακτινοβολίας στο δέκτη κοιλότητας είναι σχεδόν 80% μικρότερες από τις αντίστοιχες απώλειες στον εξωτερικό δέκτη για την ίδια επιφάνεια απορρόφησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά για τα δυο είδη σωληνοειδών δεκτών.

Εξωτερικός Κυλινδρικός Δέκτης	Δέκτης Κοιλότητας
Κατάλληλος για όλες τις διατάξεις του πεδίου ηλιοστατών	Κατάλληλος για διάταξη βόρειου πεδίου
Ευκολία σχεδιασμού και κατασκευής	Απαιτητικός σχεδιασμός και πιο πολύπλοκη διαδικασία κατασκευής

Περιορισμένο κατασκευαστικό κόστος	Αυξημένο κατασκευαστικό κόστος
Αυξημένες ενεργειακές απώλειες	Ελάχιστες ενεργειακές απώλειες
	Ιδανικός για ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες του HTF

Πίνακας 5.2. Βασικά χαρακτηριστικά σωληνοειδών δεκτών

Ο ογκομετρικός δέκτης παρότι παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα (βλέπε κεφάλαιο 3.3.2.1), δεν ενδείκνυται για συστήματα ηλιακού πύργου αν χρησιμοποιηθεί τηγμένο άλας ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Επίσης δεν είναι δυνατόν να προσομοιάσουμε τη θερμική του συμπεριφορά με τα διαθέσιμα προγράμματα υπολογισμών για ηλιοστατικά πεδία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται η χρήση δέκτη κοιλότητας λόγω των μειωμένων απωλειών που παρουσιάζει. Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκρίνουμε τους τύπους σωληνοειδούς δέκτη (εξωτερικός και κοιλότητας), αλλά θα δώσουμε έμφαση συγκεκριμένα στον δέκτη κοιλότητας.

Η γωνία κλίσης (δ_R) του δέκτη αποτελεί μια παράμετρο βελτιστοποίησης, μέσω της οποίας προσδιορίζονται τα γεωμετρικά όρια του ηλιοστατικού πεδίου, όπως θα δούμε και πολύ πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.5.3. Η επιλογή της γωνίας κλίσης γίνεται σε συνάρτηση με την επιθυμητή παραγωγή ισχύος του συστήματος κεντρικού δέκτη. Όσο μικραίνει η γωνία κλίσης τόσο περισσότεροι ηλιοστάτες εμπεριέχονται στη διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου, άρα έχουμε και μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Ωστόσο, ο βαθμός απόδοσης του πεδίου πέφτει επειδή έχουμε συμπεριλάβει και ηλιοστάτες μακριά από τον πύργο. Ερωτηματικό, μέχρι στιγμής, είναι το πώς (και εάν) επηρεάζονται οι απώλειες του δέκτη από τη γωνία κλίσης του. Εξίσου σημαντικό είναι να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του δέκτη κοιλότητας απέναντι σε ανεμικά φορτία.

Η απόδοση του δέκτη, όντας εκτεθειμένος στο περιβάλλον, μπορεί να επηρεαστεί και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι εν λόγω συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν απώλειες ακτινοβολίας και να αυξήσουν τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα του δέκτη.

Οι απώλειες θερμότητας ενός δέκτη κοιλότητας χωρίζονται σε απώλειες συναγωγής, ακτινοβολίας, απορρόφησης και αγωγής. Ωστόσο, σε αυτό το κεφάλαιο, θα μελετήσουμε μόνο τις απώλειες συναγωγής, καθώς οι απώλειες ακτινοβολίας και θερμικής αγωγιμότητας δεν είναι εύκολο να μετρηθούν ξεχωριστά. Είναι αναγκαίο να γίνει διάκριση των απωλειών συναγωγής από τις συνολικές απώλειες θερμότητας, και να προσπαθήσουμε να τις περιορίσουμε. Οι απώλειες αυτές αναφέρονται στη θερμική ενέργεια που χάνεται από την εξωτερική επιφάνεια του ηλιακού δέκτη λόγω ελεύθερης και εξαναγκασμένης συναγωγής.

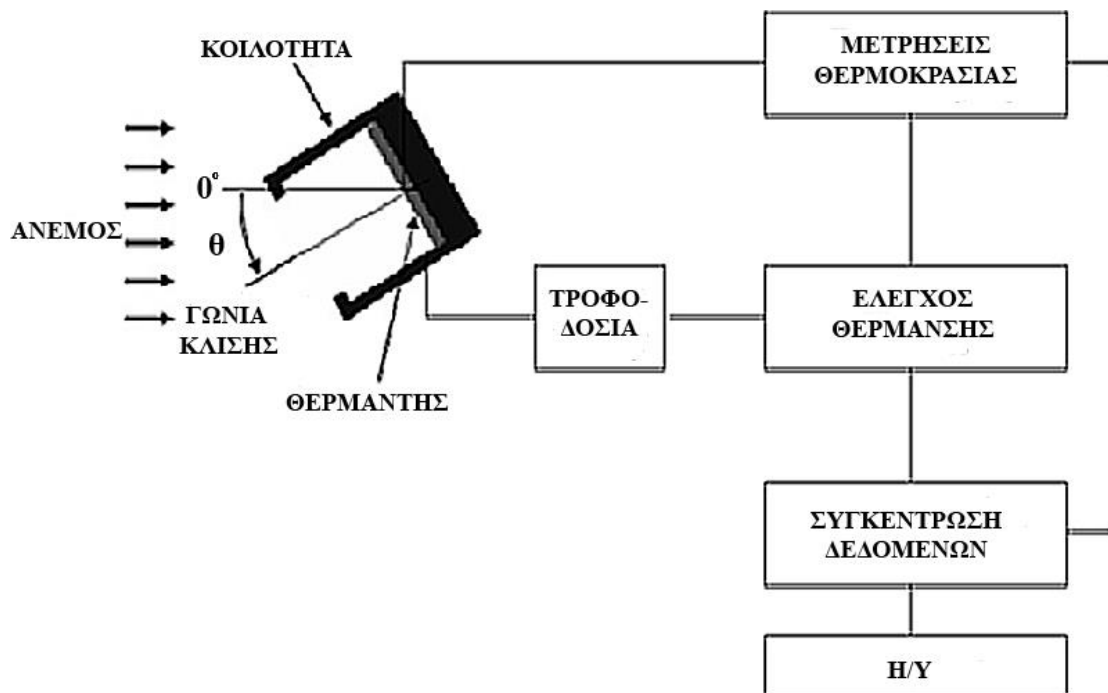
Βασιζόμενοι σε δημοσιεύσεις [17,23] που περιγράφουν πειραματικά αποτελέσματα πάνω στην μεταβολή της απόδοσης του δέκτη κοιλότητας μεταβάλλοντας τη γωνία κλίσης, είμαστε σε θέση να αντλήσουμε κάποια σημαντικά συμπεράσματα που θα αξιοποιήσουμε στο σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου. Το σχήμα 5.22 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης. Αποτελείται από τροφοδοτικό για να διατηρείται η θερμοκρασία του θερμαντήρα σταθερή στο εσωτερικό της κοιλότητας. Ο θερμαντήρας, οι

διαστάσεις του οποίου είναι 300×300 mm, παριστά τον δέκτη ηλιακής ενέργειας του πύργου και αποτελείται από έξι πλάκες θέρμανσης.

Περιγραφή πειράματος [23]

Αρχικά, έγιναν τα ακόλουθα πειράματα με δέκτη κοιλότητας για να υπολογιστούν οι αντίστοιχες απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής :

- i) η πρόσοψη της κοιλότητας προς τα κάτω, χωρίς άνεμο: υπολογισμός απωλειών ακτινοβολίας, απωλειών απορρόφησης, θερμότητας στο δέκτη
- ii) η πρόσοψη της κοιλότητας προς τα πάνω, χωρίς άνεμο: υπολογισμός απωλειών φυσικής συναγωγής, ακτινοβολίας και απορρόφησης, θερμότητας στο δέκτη
- iii) η πρόσοψη της κοιλότητας με γωνία κλίσης χωρίς άνεμο: υπολογισμός απωλειών φυσικής συναγωγής, ακτινοβολίας, απορρόφησης, θερμότητας στο δέκτη
- iv) η πρόσοψη της κοιλότητας με γωνία κλίσης με άνεμο: υπολογισμός απωλειών εξαναγκασμένης συναγωγής, φυσικής συναγωγής, ακτινοβολίας, απορρόφησης, θερμότητας δέκτη



Σχήμα 5.22 Απεικόνιση του διαγράμματος ροής για το πείραμα

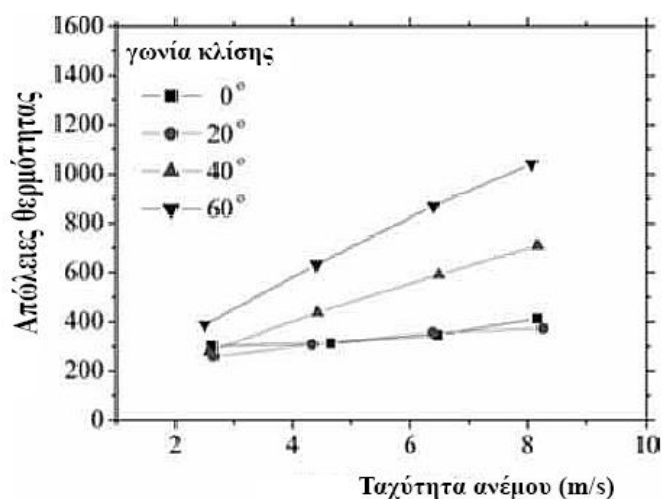
Χάρη στη διάταξη των πειραματικών διαδικασιών i), ii) και iii) και iv), είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε και να διαχωρίσουμε τις απώλειες φυσικής/ελεύθερης συναγωγής και τις απώλειες εξαναγκασμένης συναγωγής βασιζόμενοι στην εξής λογική : υπολογίζοντας τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων παροχών ηλεκτρικού ρεύματος ανάμεσα στις διατάξεις i) και ii), προσδιορίζουμε τη μέγιστη τιμή των απωλειών φυσικής συναγωγής στην επιφάνεια του ανοίγματος προς τα πάνω (επειδή οι απώλειες ακτινοβολίας και απορρόφησης δεν αλλάζουν με τη γωνία κλίσης). Από τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις διατάξεις i) και iii),

επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των απωλειών φυσικής συναγωγής λόγω κλίσης. Τέλος, οι συνολικές απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής, που περιλαμβάνουν φυσική και εξαναγκασμένη συναγωγή, μπορούν να προσδιοριστούν εξετάζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα των διατάξεων i) και iv).

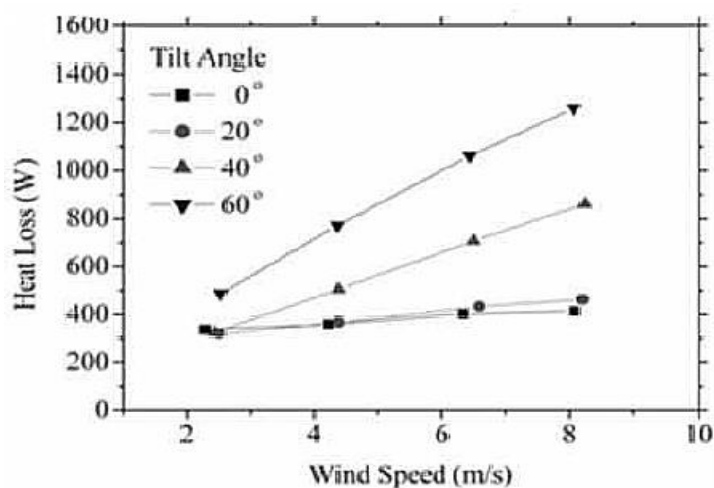
Οι πειραματικές συνθήκες παρατίθενται στον Πίνακα 5.3. Η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από 2 έως 8 m / s και τέσσερις διαφορετικές γωνίες κλίσης από 0, 20, 40, 60° προσαρμόζονται. Η θερμοκρασία του θερμαντήρα αντιπροσωπεύει την επιφανειακή θερμοκρασία του δέκτη, σε τιμές 300, 400, 500°C αντίστοιχα.

ITEMS	UNIT	VALUE
Cavity type		no, open, small center, small lower
Wind speed	m/s	2, 4, 6, 8
Tilt angle	°	0, 20, 40, 60
Heater temperature	°C	300, 400, 500

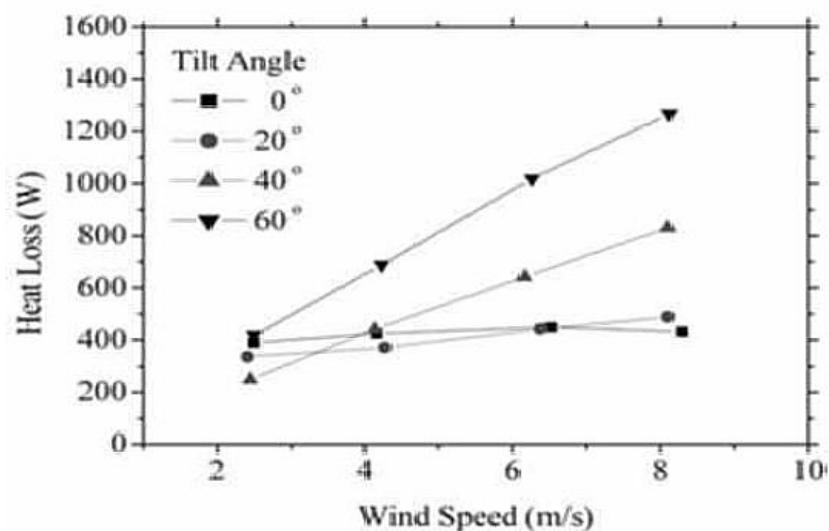
Πίνακας 5.3. Παράμετροι πειράματος (Πηγή [23])



(a) θερμοκρασία δέκτη 300°C



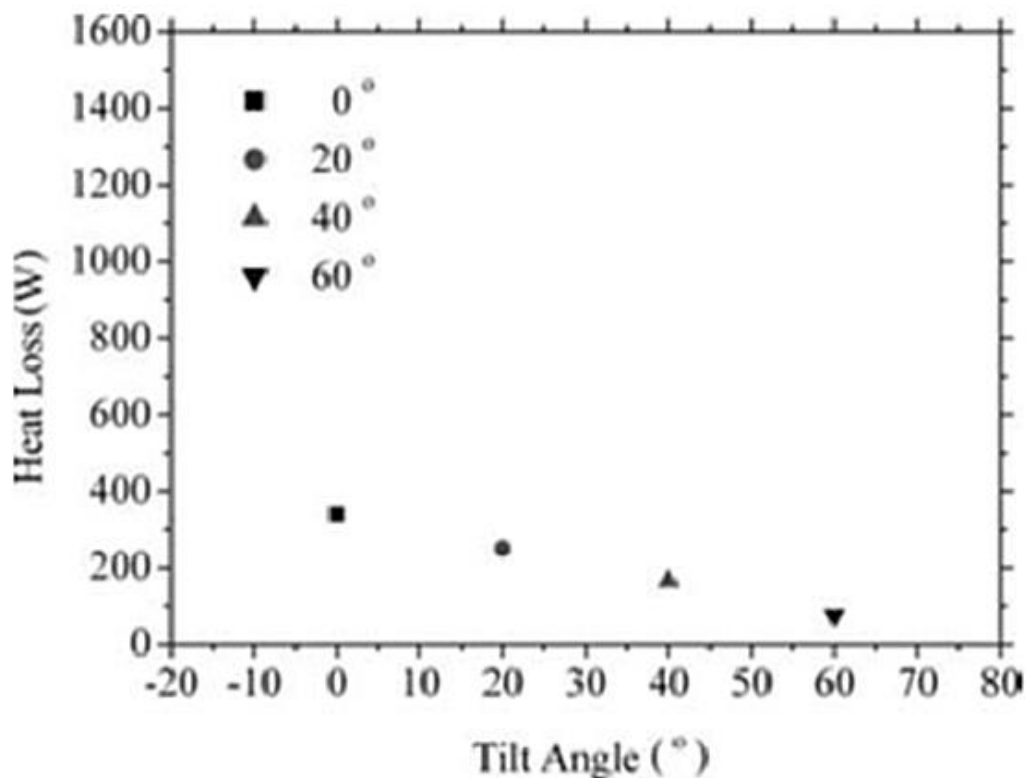
(b) heater temperature : 400 °C



(c) heater temperature : 500 °C

Σχήματα 5.23.(α),(β),(γ) Απώλειες συναγωγής σε δέκτη ανοικτής κοιλότητας (Πηγή [23])

Όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως, αφαιρώντας τις μετρούμενες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των διατάξεων i) και iv), υπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής, για όλες τις θερμοκρασίες του δέκτη, αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και της γωνίας κλίσης από 0° έως 60°. Γενικά, όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, τόσο μεγαλύτερη μεταφοράς θερμότητας μπορεί να παρατηρηθεί. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μέγιστη εκτεθειμένη επιφάνεια στον άνεμο (για γωνία κλίσης 0°) παρουσιάζει μικρότερες απώλειες θερμότητας, σε σύγκριση με την περίπτωση ελάχιστης εκτεθειμένης επιφάνειας (για γωνία κλίσης 60°) που παρουσιάζει τις περισσότερες απώλειες συναγωγής. Φαίνεται ότι για χαμηλότερες γωνίες κλίσης έχουμε ανάπτυξη υψηλότερης στατικής πίεσης, πράγμα που σημαίνει λιγότερη μεταφορά θερμότητας λόγω στασιμότητας της ροής κοντά την περιοχή θέρμανσης. Αντίστοιχα, σε υψηλότερες γωνίες κλίσης, ο άνεμος προκαλεί ισχυρή ροή επανακυκλοφορίας στο εσωτερικό της κοιλότητας και ως αποτέλεσμα η μεταφορά θερμότητας μπορεί να αυξηθεί.



Σχήμα 5.24 Απώλειες θερμότητας λόγω φυσικής συναγωγής για διαφορετικές γωνίες κλίσης σε δέκτη κοιλότητας (θερμοκρασία δέκτη 400°C) (Πηγή [23])

Το σχήμα 5.24 δείχνει τις απώλειες θερμότητας λόγω φυσικής συναγωγής, σύμφωνα με την γωνία κλίσης για θερμοκρασία δέκτη 400°C. Βλέπουμε ότι οι απώλειες φυσικής συναγωγής μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της γωνίας κλίσης. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα στο Σχήμα 5.23(β), είναι δυνατόν να γίνει διαχωρισμός των απωλειών θερμότητας λόγω μεικτής συναγωγής, μεταξύ εξαναγκασμένης και φυσικής συναγωγής. Για παράδειγμα, για ταχύτητα ανέμου 2 m/s και γωνία κλίσης 0°, οι απώλειες μεικτής και φυσικής συναγωγής έχουν παρόμοιες τιμές, περίπου 300W.

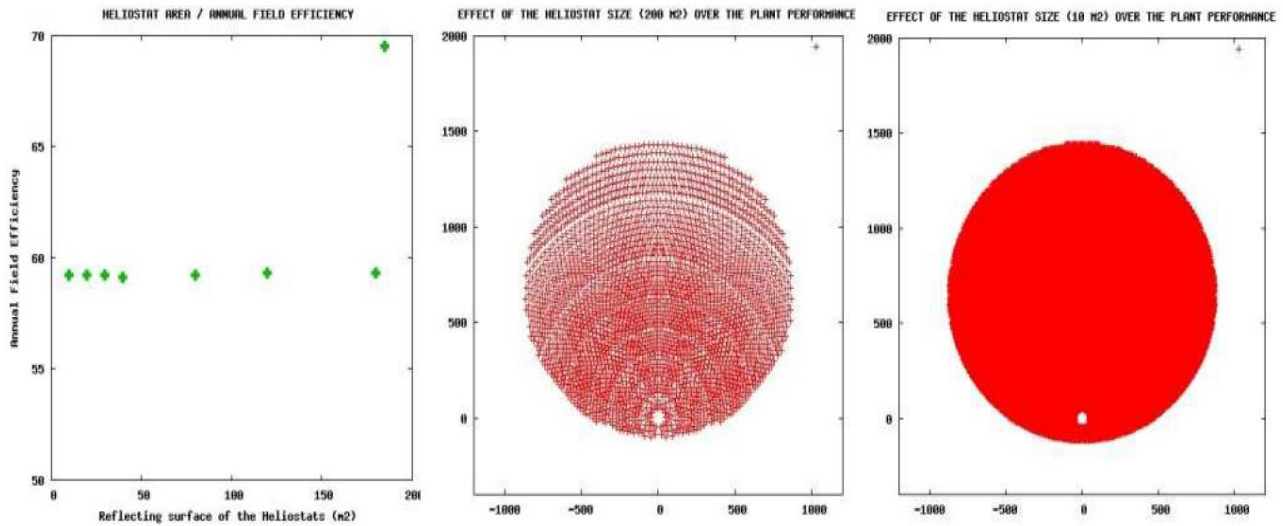
Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες φυσικής συναγωγής αποτελούν μια σημαντική παράμετρο στις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής. Ωστόσο, στην υψηλότερη γωνία κλίσης 60° και για ταχύτητα ανέμου 2 m/s, οι απώλειες μεικτής και φυσικής συναγωγής έχουν πάρει τις τιμές 500W και 100W, αντίστοιχα. Οι απώλειες φυσικής συναγωγής δηλαδή μειώνονται στο 25% της μεικτής. Ως συμπέρασμα, οι επιπτώσεις της φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής ποικίλλουν ανάλογα με τη γωνία κλίσης και την ταχύτητα του ανέμου.

5.4.3 Επιλογή διαστάσεων ηλιοστάτη

Μία ακόμη παράμετρος σχεδιασμού του ηλιοστατικού πεδίου, που αξίζει να μελετηθεί είναι το σχήμα και οι διαστάσεις των ηλιοστατών. Στις αρχές της δεκαετίας του '80 τα περισσότερα ηλιοστατικά πεδία αποτελούνταν από ηλιοστάτες με εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας 40m^2 . Στη συνέχεια, η επικρατούσα τάση ήταν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ανακλαστική επιφάνεια ενός ηλιοστάτη τόσο το καλύτερο, καθώς το κόστος των εξαρτημάτων για το κιβώτιο έλεγχου και για τη στήριξη του ηλιοστάτη θα μειώνεται. Επιπλέον, οι λειτουργικές δαπάνες και οι δαπάνες συντήρησης σε ένα πεδίο που αποτελείται από μεγαλύτερους ηλιοστάτες (άρα και λιγότερους αριθμητικά) θα είναι μικρότερες και λιγότερο χρονοβόρες. Με αυτή τη λογική, ηλιοστάτες εμβαδού από 100m^2 έως 200m^2 αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν με επιτυχία από τεχνική άποψη. Οι δύο εμπορικές μονάδες που πρόσφατα χτίστηκαν στην Ισπανία αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν ηλιοστάτες με εμβαδόν περίπου 120m^2 (σταθμοί PS10, PS20).

Από την άλλη πλευρά, ηλιοστάτες εμβαδού 7m^2 έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε μια πιλοτική μονάδα στο Ισραήλ και ηλιοστάτες εμβαδού 14m^2 πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εμπορικές μονάδες που βρίσκονται υπό κατασκευή στις ΗΠΑ. Ως εκ τούτου, το ερώτημα παραμένει. Από καθαρά τεχνική άποψη είναι προτιμότερη η χρησιμοποίηση μικρότερων ή μεγαλύτερων ηλιοστατών για μια μονάδα παραγωγής ενέργειας; Ακόμα πόσο διαφορετική θα ήταν η απόδοση ενός ηλιακού πεδίου αν το εμβαδό των ηλιοστατών κυμαίνεται από 10 έως 120m^2 ; Και τέλος ποιο μέγεθος ηλιοστάτη, θα απαιτήσει την ελάχιστη συνολική επιφάνεια γης; [24]

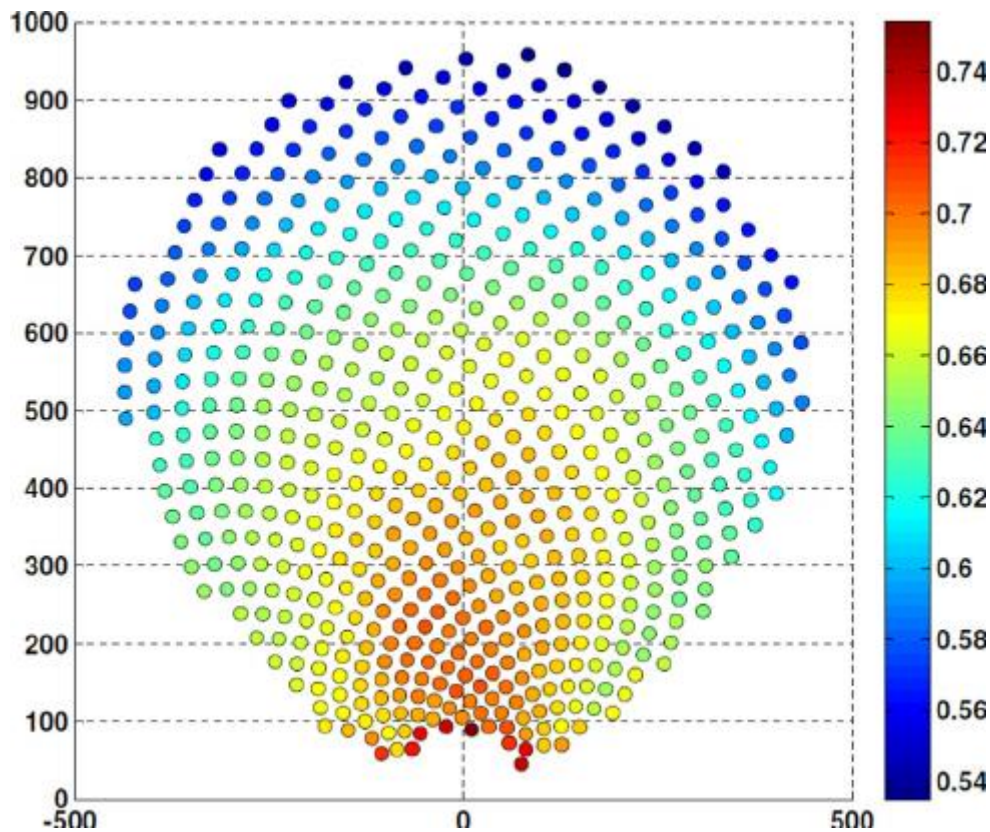
Το Σχήμα 5.25 δείχνει την απαιτούμενη έκταση για κάτοπτρα για έναν σταθμό 100MW έναντι του μεγέθους των ηλιοστατών, εφόσον όλα τα μεγέθη έχουν το ίδιο συνολικό σφάλμα. Η γη που απαιτείται φαίνεται των αντίστοιχων διατάξεων στον τομέα. Το συμπέρασμα είναι μάλλον απλό: το μέγεθος του ηλιοστάτη συγκρίνοντας διατάξεις ηλιοστατών διαφορετικών μεγεθών δεν έχει σημασία από την άποψη της εκμετάλλευσης γης ή στον ετήσιο βαθμό απόδοσης του πεδίου. Τονίζεται ότι ο βαθμός απόδοσης του πεδίου αναφέρεται στο εμβαδόν της εγκατεστημένης ανακλαστικής επιφάνειας που εκμεταλλεύεται το πεδίο και όχι στην παραγόμενη ισχύ του πεδίου. Ως εκ τούτου, το σημείο κλειδί για να την επιλογή ενός μικρότερου ή μεγαλύτερου ηλιοστάτη θα εξαρτηθεί από το σχετικό κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο. Κατά την αξιολόγηση αυτού του κόστους, τα ηλεκτρικά και επικοινωνιακά συστήματα, μαζί με τις εκτιμήσεις για λειτουργικές δαπάνες και έξοδα συντήρησης θα παίξουν επίσης σημαντικό ρόλο. Υπάρχουν λίγα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με το κόστος σε σχέση με το μέγεθος. Από τις ελάχιστες δημοσιευμένες μελέτες φαίνεται τα περισσότερα πλεονεκτήματα να συγκεντρώνονται στους ηλιοστάτες μεγαλύτερου εμβαδού.



Σχήμα 5.25. (α) Απόδοση πεδίων, (β) πεδίο με ηλιοστάτες 200m², (γ) πεδίο με ηλιοστάτες 10m² (Πηγή : L.Crespo, F.Ramos, F.Martínez. "Questions and Answers on Solar Central Receiver Plant Design" by NSPOC, SolarPACES 2011)

Μία ιδέα που μελετάται τα τελευταία χρόνια, σε μια προσπάθεια να μειωθεί το κατασκευαστικό κόστος των ηλιοστατών, αφορά τη χρησιμοποίηση ηλιοστατών διαφορετικής κατασκευής σε κάποιους τομείς του πεδίου ηλιοστατών. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 5.3.2 οι ηλιοστάτες που επιβαρύνονται περισσότερο από ανεμικά φορτία βρίσκονται στις τέσσερις πρώτες σειρές του πεδίου είτε στα άκρα του. Αυτοί οι ηλιοστάτες πρέπει να διαθέτουν στιβαρή κατασκευή αφού παρέχουν ένα βασικό επίπεδο προστασίας για τους υπόλοιπους, και έτσι θα έχουν υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Ωστόσο για τους υπόλοιπους ηλιοστάτες αυτό δεν κρίνεται απαραίτητο, αφού δεν είναι εκτεθειμένοι σε υψηλά φορτία ανέμου και μας ενδιαφέρει κυρίως να μην έχουν υψηλές απώλειες παρεμβολής.

Ακόμα, παρατηρώντας το σχήμα 5.26 βλέπουμε ότι δεν έχουν όλοι οι ηλιοστάτες την ίδια απόδοση. Οι ηλιοστάτες που βρίσκονται στον κεντρικό τομέα και είναι χρωματισμένοι με κόκκινο έχουν απόδοση 95-100% όσον αφορά τις απώλειες παρεμβολής. Κάθε αλλαγή στο χρώμα αντιπροσωπεύει 5% λιγότερη απόδοση. Όσο προστίθενται σειρές σε ένα πεδίο, οι ηλιοστάτες που ανήκουν σε αυτόν τον τομέα αναμένεται να έχουν και μικρότερη απόδοση. Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης του κόστους ενός πεδίου, αντικαθιστώντας κάποιους ηλιοστάτες υψηλής ποιότητας κατασκευής με ελαφρώς χειρότερης, υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος των λιγότερο ποιοτικών ηλιοστατών να είναι σημαντικά χαμηλότερο. Οι «φτηνότεροι» ηλιοστάτες τοποθετούμενοι στους σωστούς τομείς του πεδίου θα συνεισφέρουν εξίσου στην παραγωγή του συστήματος και δεν θα έχουμε προβλήματα στατικότητας.



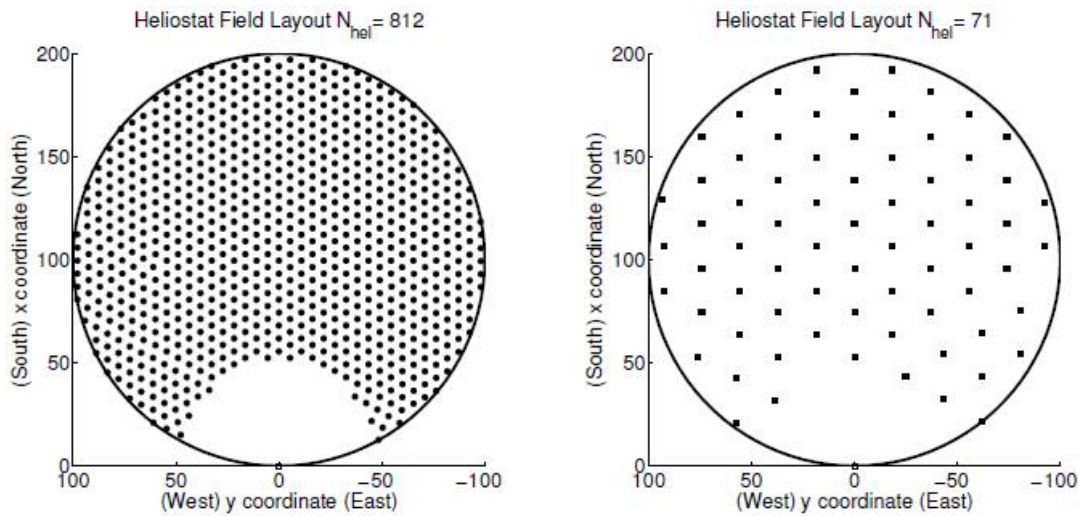
Σχήμα 5.26. Κατανομή ετήσιου βαθμού απωλειών ηλιοστατών σε ένα πεδίο ηλιοστατών (Πηγή: S.M.Besarati, D.Y.Goswam. "A computationally efficient method for the design of the heliostat field for solar power tower plant", Renewable Energy 69, 2014)

Οι τελευταίες μελέτες στον τομέα σχεδιασμού πεδίων ηλιοστατών έχουν να κάνουν με τη χρησιμοποίηση ηλιοστατών διαφορετικών διαστάσεων στο ίδιο πεδίο [25]. Όλα τα πεδία ηλιοστατών που έχουν κατασκευαστεί μέχρι στιγμής χρησιμοποιούν ηλιοστάτες ίδιας γεωμετρίας. Πράγμα λογικό μιας και οι γεωμετρικές κατανομές (βλέπε κεφάλαιο 5.5.1) που χρησιμοποιούνται για τη διάταξη των ηλιοστατών προϋποθέτουν να έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Ακόμα, οι υπολογισμοί για τις απώλειες και την παραγωγή ισχύος είναι ευκολότεροι. Χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας όμως, είμαστε πλέον σε θέση να μελετήσουμε και εναλλακτικά σχέδια πεδίων. Την αρχή έκανε το πανεπιστήμιο της Σεβίλλης δημιουργώντας έναν αλγόριθμο που τοποθετεί ηλιοστάτες διαφορετικών διαστάσεων σε καίρια σημεία του πεδίου. Η έρευνα βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο αλλά τα μηνύματα είναι ενθαρρυντικά.

Προκειμένου να γίνουν οι πρώτοι υπολογισμοί επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν μόλις δύο μοντέλα ηλιοστατών, το ένα με εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας $4,35\text{m}^2$ και το άλλο με εμβαδόν 120m^2 [25]. Στο σχήμα 5.27 βλέπουμε τη διάταξη των πεδίων με ηλιοστάτες ίδιων διαστάσεων και στον πίνακα 5.4 τα χαρακτηριστικά απόδοσης για τα δυο πεδία.

Σε επόμενο βήμα θα γίνει ο σχεδιασμός μεικτών πεδίων και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος που δημιούργησε το πανεπιστήμιο προτείνεται τη χρησιμοποίηση ηλιοστατών μεγάλου μεγέθους στις πιο αποδοτικές περιοχές του πεδίου, και

ηλιοστάτες μικρού μεγέθους, οι οποίοι είναι πιο ευέλικτοι, στα άκρα και στη συμπλήρωση κάποιων κενών



Σχήμα 5.27. (α) Διάταξη πεδίου ηλιοστατών $4,35\text{m}^2$ (β) Διάταξη πεδίου ηλιοστατών 120m^2 , για δεδομένη διαθέσιμη έκταση (Πηγή: E.Carrizosa, C.Domínguez-Bravo, E.Fernández-Cara, M. Quero. «An Optimization Approach to the Design of Multi-Size Heliostat fields», 2014)

Size	N_{hel}	E (GWhth)	Ψ (u.c.)	F
Small	812	6.7228	0.5650	8.3213
Large	71	15.9619	1.3783	17.4656

Πίνακας 5.4. Πειραματικά αποτελέσματα για τις δύο διατάξεις [25]

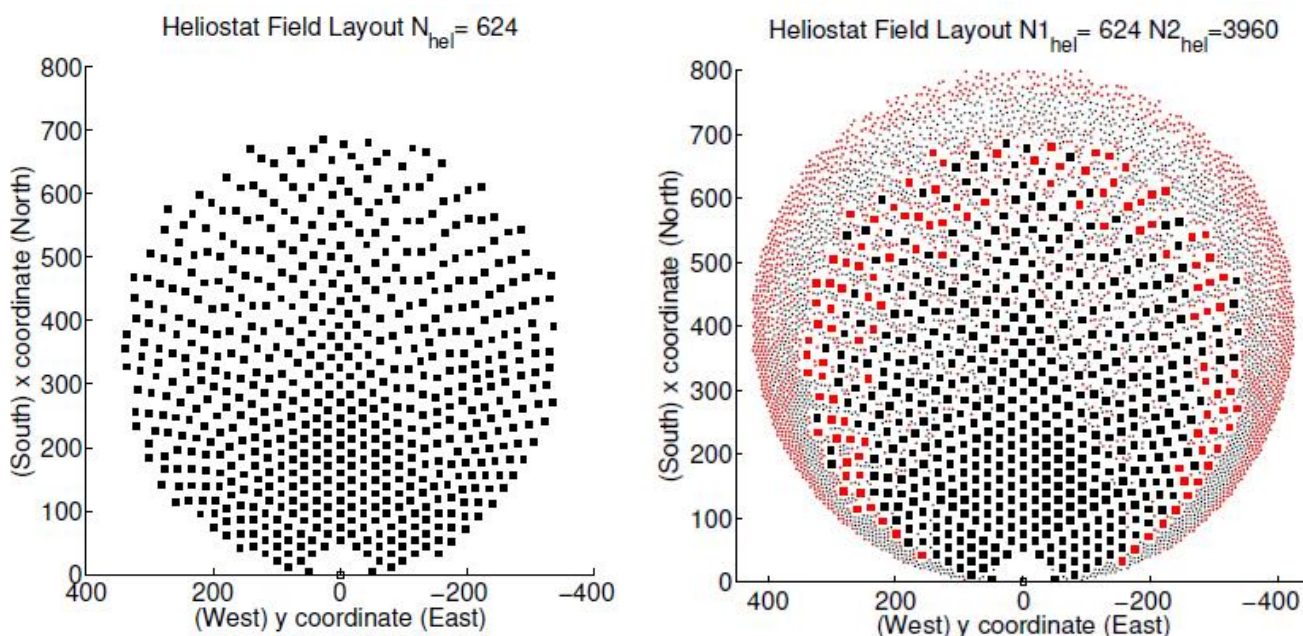
Σημείωση: Με E συμβολίζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας, Ψ το κόστος των ηλιοστατών και F την αναλογία μεταξύ ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και κόστους πεδίου

Με τη χρήση του αλγόριθμου αποδείχτηκε ότι πεδία με ηλιοστάτες πολλαπλών διαστάσεων επιτυγχάνουν καλύτερες ετήσιες τιμές ενέργειας ανά μονάδα κόστους, σε σύγκριση με πεδία που αποτελούνται από ηλιοστάτες ενός μόνο μεγέθους (βλέπε πίνακα 5.5). Ακόμα, όταν προσπαθούμε να επιτύχουμε μια συγκεκριμένη ισχύς, ο αριθμός των ηλιοστατών εξαρτάται προφανώς από τις διαστάσεις του μοντέλου του ηλιοστάτη. Έτσι σε περιπτώσεις που απαιτείται ισχύς πάνω από 10MW, ο αριθμός των ηλιοστατών μικρού μεγέθους που απαιτείται για να επιτευχθεί η ισχύς στο σημείο σχεδιασμού είναι υπερβολικός σε σύγκριση με ένα πεδίο ηλιοστατών μεγάλου μεγέθους. Για παράδειγμα, ένα πεδίο που αποτελείται από 624 ηλιοστάτες μεγάλου μεγέθους επιτυγχάνει ισχύ 45,53 MWth στο σημείο σχεδιασμού, ενώ ένα πεδίο που αποτελείται από 4700 ηλιοστάτες μικρού μεγέθους και καταλαμβάνει την ίδια επιφάνεια επιτυγχάνει ισχύ 12,70 MWth. Ως εκ

τούτου, το πεδίο ηλιοστατών μικρού μεγέθους δεν είναι επαρκές για να επιτευχθεί η ίδια ισχύς για το κοινό σημείο σχεδιασμού όταν η διαθέσιμη έκταση είναι συγκεκριμένη.

Field	N_{hel}	small-size	Large-size	$\Pi_{T_d}(\Omega)$ (MWth)	$E(\Omega)$ (GWhth)	$F(\Omega)$	$F_1(\Omega)$	$F_2(\Omega)$
PS10	592	0	592	42.9619	121.5665	54.4701	54.4701	54.4701
Ω_1	2680	2167	513	42.9346	120.8271	54.2190	55.1923	56.2012
Ω_2	3574	3094	480	42.9688	121.1273	54.3391	55.7445	57.2218
Ω_3	3886	3418	468	42.9533	121.0970	54.3498	55.9055	57.5528
Ω_4	4018	3555	463	42.9451	121.1211	54.3655	55.9864	57.7069
Ω_5	4081	3620	461	42.9576	121.2041	54.3833	56.0351	57.7877

Πίνακας 5.5. Πειραματικά αποτελέσματα από πεδία ηλιοστατών πολλαπλών διαστάσεων [25]



Σχήμα 5.28. (α) Πεδίο ηλιοστατών πριν τη χρήση του αλγόριθμου, (β) Πεδίο ηλιοστατών με ηλιοστάτες πολλαπλών διαστάσεων μετά τη χρήση του αλγόριθμου [25]

Αξιολογώντας τα παραπάνω ευρήματα στη συγκεκριμένη διπλωματική επιλέξαμε τη χρησιμοποίηση ηλιοστατών μεγάλου μεγέθους, με εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας περίπου 120m^2 . Κρίθηκε ως μια ασφαλής επιλογή, έχοντας ως δεδομένα τον σταθμό PS10 στην Ισπανία και πειραματιστήκαμε σε ότι αφορά τις πιθανές μεταβολές ύψους-πλάτους, αρκεί το εμβαδόν της ανακλαστικής επιφάνειας να παραμένει το ίδιο.

5.5 Παρουσίαση Προγραμμάτων

5.5.1 Καταγραφή μεθοδολογιών για το σχεδιασμό πεδίου ηλιοστατών

Το πεδίο ηλιοστατών είναι ίσως το σημαντικότερο υποσύστημα στις διατάξεις πύργου ηλιακής ισχύος, επειδή αποτελεί περίπου το 40-50% του συνολικού κόστους του συστήματος και προκαλεί απώλειες που μπορεί να φτάσουν το 40%. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση της διάταξης του πεδίου ηλιοστατών είναι πολύ σημαντικά βήματα για το σχεδιασμό ενός συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη.

Η απόδοση του πεδίου εξαρτάται άμεσα από την οπτική του απόδοση, η οποία με τη σειρά της ορίζεται ως η αναλογία της καθαρής ισχύος που παραλαμβάνει ο δέκτης προς την προσπίπτουσα ισχύ που συγκεντρώνει το πεδίο. Οι οπτικές απώλειες περιλαμβάνουν τις απώλειες συνημίτονου, τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης, τις απώλειες ανακλαστικότητας των κατόπτρων, τις ατμοσφαιρικές απώλειες και τις απωλειών διαρροής δέκτη. Όταν οι ηλιοστάτες τοποθετούνται με μεγαλύτερη πυκνότητα σε μια έκταση, οι απώλειες παρεμπόδισης και σκίασης αυξάνονται, αλλά τα κόστη για τη χρήση γης και της καλωδίωσης μειώνονται.

Η οπτική απόδοση του πεδίου επηρεάζει έντονα την αποτελεσματικότητα της παραγωγής του σταθμού. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός της διάταξης του πεδίου ηλιοστατών είναι σημαντικός. Υπάρχουν σημαντικές υφιστάμενες μεθοδολογίες για το σχεδιασμό πεδίου ηλιοστατών, όπως οι κώδικες/προγράμματα HELIOS, ASPOC, HFLCAL, RCELL, DELSOL κ.λπ. Αυτές οι μεθοδολογίες δημιουργήθηκαν τη δεκαετία του '80 και εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα των υπολογισμών δεν είναι ακριβή, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν και στερούνται γραφικών αποτελεσμάτων. Πρόσφατα, με την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας στον κόσμο, σημαντικά νέο λογισμικά και νέες μέθοδοι για το σχεδιασμό του πεδίου ηλιοστατών αναπτύσσονται. Το 2001, το λογισμικό WinDELSOL 1.0 αναπτύχθηκε στο PSA στην Ισπανία. Βασίζεται στον κώδικα DELSOL3 και μπορεί να τρέξει στο σύστημα των Windows. Το 2005, το λογισμικό SENSOL δημιουργήθηκε από την εταιρεία Senser στο Μεξικό. Το εν λόγω λογισμικό μπορεί να σχεδιάσει και να αναλύσει και τα τέσσερα είδη των ηλιακών συστημάτων παραγωγής, δηλαδή τα παραβολικά κάτοπτρα, το σύστημα κεντρικού δέκτη, φωτοβολταϊκά σύστημα και το σύστημα «Beam Down Optics».

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται όλα τα λογισμικά που βρίσκονται αυτή τη στιγμή στην αγορά και αφορούν το σχεδιασμό και τους υπολογισμούς ισχύος και απωλειών για πεδίο ηλιοστατών. Παρατηρούμε ότι μόλις δύο εξ αυτών διατίθενται προς δωρεάν χρήση, το SolTrace και το Tonatiuh. Τονίζεται όμως ότι και τα δύο αυτά προγράμματα χρησιμεύουν για τον υπολογισμό απωλειών και για την παραγωγή ισχύος, και όχι για τη διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο.

	Organization	Function	Calculation Method	Availability
Spray	DLR	Heliostat and Field simulation	Monte Carlo ray tracing	Commercially available
SolTrace	NREL	Heliostat and Field simulation	Monte Carlo ray tracing	Free to use
Tonatiuh	CENER	Heliostat and Field simulation	Monte Carlo ray tracing	Open source
STRAL	DLR	Heliostat and Field simulation	Backward ray tracing	Commercially available
Tiesol	Tietronix	Heliostat and Field simulation	Backward ray tracing	Commercially available
ISOS	Universidad Nacional Autónoma de México	Flux distribution of individual heliostat	Mathematical algorithm	Academically available
HFLCAL	DLR	Layout and optimization of heliostat fields	Normal distribution	Commercially available
CRS4	CRS4	Simulation of CRS plants	Tessellation	Not at present
HFLD	Chinese Academy of Science	Design and analysis of CRS field layout	Edge ray	Commercially available
Biomem.	MIT	Design and analysis of CRS field layout	Biometry	Pending

Πίνακας 5.6. Διαθέσιμα λογισμικά για σχεδιασμό πεδίου ηλιοστατών

5.5.2 Περιγραφή προγράμματος CSPsim [26]

Στην προσπάθεια εξεύρεσης ενός προγράμματος που να ορίζει τη διάταξη των ηλιοστατών, έγινε η πρώτη επαφή με την εφαρμογή CSPsim®. Η συγκεκριμένη εφαρμογή ανήκει στο πανεπιστήμιο Technion IIT (Israel Institute of Technology) και χρησιμοποιεί την μεθοδολογία DELSOL3 για διάταξη των ηλιοστατών στο χώρο. Αυτή τη στιγμή αποτελεί τη μοναδική εφαρμογή με ελεύθερη πρόσβαση.

Η εφαρμογή είχε αρκετά φιλικό περιβάλλον χρήσης και με την εκκίνησή της εμφάνιζε το παράθυρο δεδομένων εισόδου που φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Η εφαρμογή φαίνεται να λαμβάνει υπόψη πολλά δεδομένα μεταξύ των οποίων το ύψος του πύργου, τις διαστάσεις των ηλιοστατών, τον συντελεστή ανακλαστικότητας της επιφάνειάς τους, το ποσοστό κάλυψης των σειρών (rings cover ratio), το υψόμετρο της τοποθεσίας, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και η ώρα και ημερομηνία προσομοίωσης.

CSPsim: Input data

Input parameters:

Receiver aim point height:	120
Heliostat height:	10
Heliostat width:	12
Limit angle (max. 90 deg):	40
Number of rings:	25
Rings cover ratio:	0.9
Date (dd:mm:yyyy):	16 / 7 / 2014
dT GMT:	3
Hour:	12
Longitude:	38.257
Latitude:	22.969
Power-plant elevation [km]:	0.1
Mirror reflectivity:	0.95

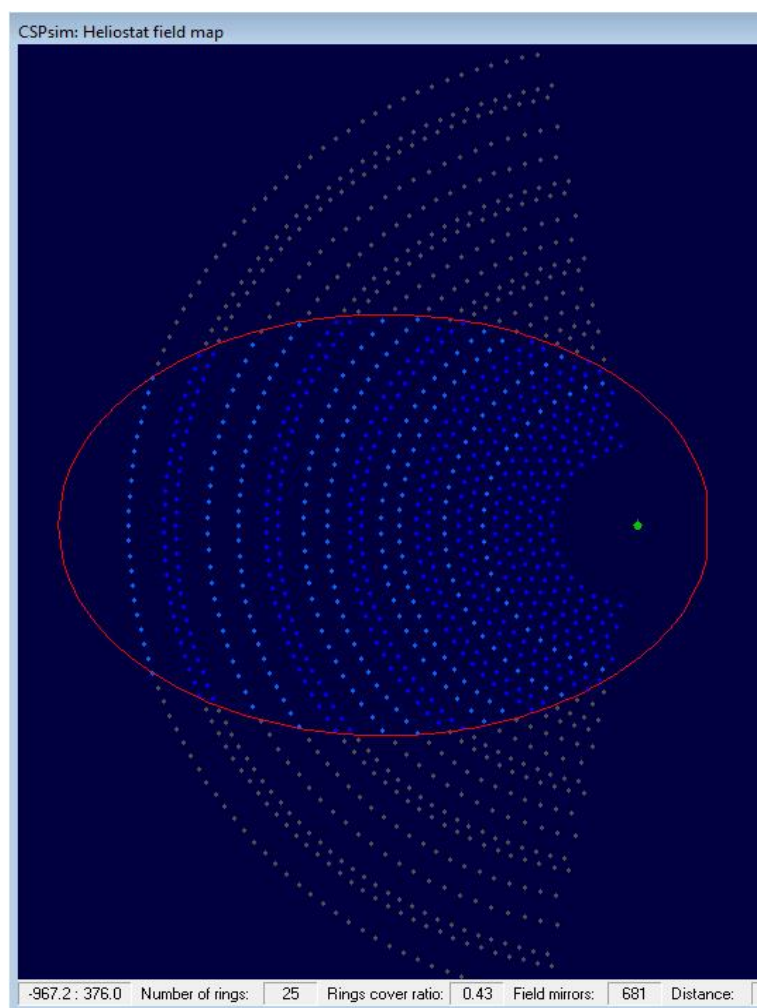
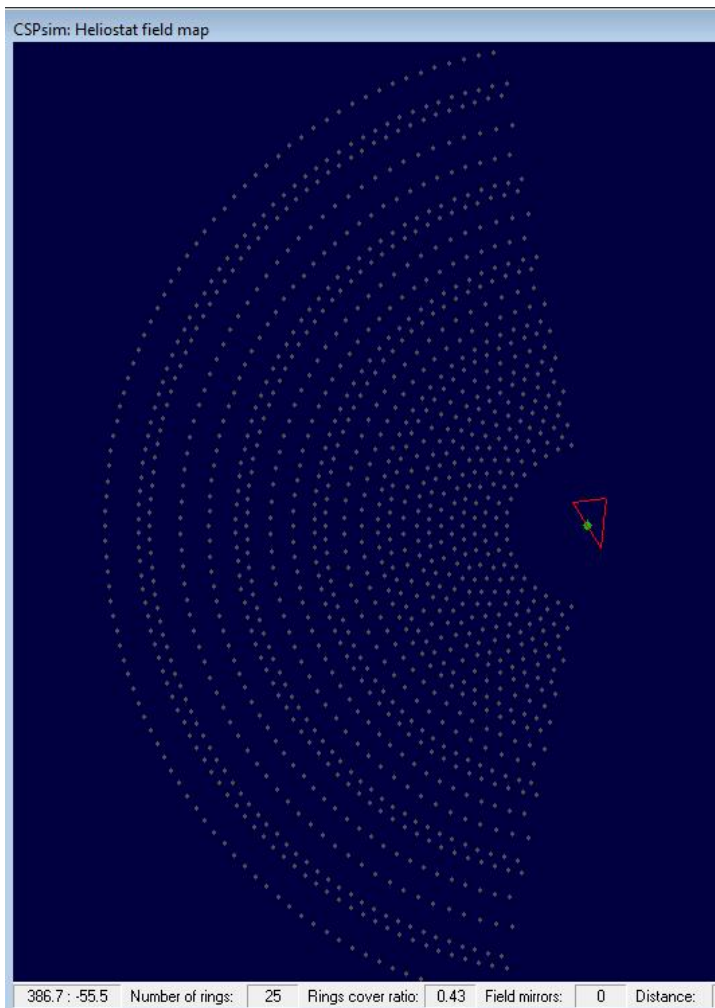
Buttons: [Refresh] [Run] [Save]

Σχήμα 5.29. Παράθυρο εισόδου δεδομένων εφαρμογής CSPsim

Αναλυτικότερα:

- Receiver aim point height: πρόκειται για το ύψος του σημείου εστίασης, που βρίσκεται στο μέσο του δέκτη
- Heliostat Height & Width: διαστάσεις του μοντέλου ηλιοστάτη
- Limit Angle : η γωνία του κυκλικού τομέα που οριοθετεί την έκταση του πεδίου
- Number of rings: αριθμός δακτυλίων του πεδίου
- Rings cover ratio : πυκνότητα τοποθέτησης ηλιοστατών
- Longitude & Latitude: Γεωγραφικό μήκος και πλάτος της τοποθεσίας αντίστοιχα
- Power-plant elevation: Υψόμετρο τοποθεσίας
- Mirror reflectivity: βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας

Τρέχοντας το λογισμικό από τα πρώτα πράγματα που παρατηρεί κανείς είναι ότι παρότι εμφανίζει τις συντεταγμένες των ηλιοστατών και τη διάταξη τους στο χώρο δεν περιέχει κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε ηλιακά πεδία όσα μεγάλα θέλουμε, απλά αυξάνοντας τον αριθμό των δακτυλίων του πεδίου (επιλογή «Number of Rings»). Αυτό όμως θα επρόκειτο για σφάλμα, μιας και στο πεδίο θα εμπεριέχονταν και ηλιοστάτες που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές τιμές απωλειών, και ιδιαίτερα στις απώλειες συνημιτόνου. Ακόμα πιο σημαντικό είναι ότι θα έχουμε υπερ-διαστασιολόγηση του πεδίου, με αποτέλεσμα να αυξάνονται κατακόρυφα τα κατασκευαστικά και λειτουργικά έξοδα.



Σχήμα 5.30. (α)Πεδίο ηλιοστατών χωρίς βελτιστοποίηση, (β) πεδίο ηλιοστατών με μέθοδο βελτιστοποίησης

Στην ουσία, η εφαρμογή CSPsim® ζητάει από τον χρήστη να προσδιορίσει, με διακριτά σημεία στο επίπεδο τα όρια του πεδίου. Εμβαθύνοντας περισσότερο στις μεθοδολογίες διάταξης των ηλιοστατικών πεδίων έγινε αντιληπτό ότι πρέπει να καταλήξουμε σε μια μέθοδο βελτιστοποίησης που θα μπορέσουμε να εφαρμόσουμε στην εφαρμογή προκειμένου να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Αναλυτικότερα σχετικά με τη διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου και τη μέθοδο βελτιστοποίησης θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Εδώ απλά θα συγκρίνουμε τα σχήματα 5.30(α) και 5.30(β) και θα αναφέρουμε ότι στην δεύτερη περίπτωση έχει εφαρμοστεί η μέθοδος βελτιστοποίησης και έχουν επιλεγεί οι ηλιοστάτες που βρίσκονται μέσα στην κόκκινη έλλειψη. Έτσι εν μέρει ξεπεράστηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Το «εν μέρει» έχει να κάνει με το ότι ο σχηματισμός των ορίων του πεδίου δεν γίνεται αυτόματα, αλλά πρέπει να ακολουθήσουμε μια συγκεκριμένη διαδικασία και να το περάσουμε χειροκίνητα στην εφαρμογή. Αυτό μας περιορίζει πολύ σε περίπτωση που θέλουμε να δημιουργήσουμε περισσότερα του ενός πεδίου.

Σε δεύτερο χρόνο, η εφαρμογή υπολογίζει την ισχύ του συστήματος για τα δεδομένα εισόδου που έχουμε θέσει, δηλαδή για την ημερομηνία και ώρα της προσομοίωσης. Εδώ δεν θα παραθέσουμε κάποιο αποτέλεσμα μιας και αργότερα διαπιστώσαμε μεγάλη απόκλιση από τα νούμερα που τελικά βρήκαμε. Σημειώνεται επίσης ότι το λογισμικό δεν λειτουργούσε για ηλιακά πεδία με περισσότερους από χίλιους ηλιοστάτες. Ψάχνοντας την αιτία για τη μεγάλη απόκλιση στους υπολογισμούς, ακόμα στα μικρά πεδία, εντοπίσαμε το

πρώτο πρόβλημα στα δεδομένα εισόδου για το πεδίο. Συγκεκριμένα, για την επιλεγμένη ημερομηνία και ώρα προσομοίωσης τρέχει ένας αλγόριθμος που υπολογίζει τη θέση του ηλίου (μαζί με ηλιακές γωνίες κ.τ.λ.) και σε συνδυασμό με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας γίνεται μια εκτίμηση για την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία. Οι τιμές όμως που δίνει ο αλγόριθμος δεν είναι αξιόπιστες, πράγμα λογικό, αφού το ηλιακό δυναμικό μπορεί να έχει μεγάλες αλλαγές από έτος σε έτος και απαιτείται πολύ μεγάλη βάση δεδομένων. Το δεύτερο πρόβλημα, αν και σίγουρα πολύ μικρότερης κλίμακας, εντοπίζεται στην έλλειψη δεδομένων για τον ηλιακό δέκτη, θεωρώντας ότι δεν έχουμε απώλειες διαρροής. Ωστόσο, δεν αναμένεται να έχει μεγάλη επιρροή στα αποτελέσματα.

Στα θετικά της εφαρμογής είναι ότι η τοποθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο γίνεται με τέτοια διάταξη ώστε να μην έχουμε απώλειες παρεμπόδισης και ότι εμπεριέχει γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που βοηθάει πολύ στην οριοθέτηση του πεδίου.

Συνοψίζοντας, μπορεί τελικά να μην καταλήξαμε στην επιλογή του λογισμικού CSPsim® για τη διαδικασία δημιουργίας πεδίων ηλιοστατών αλλά άξιζε να αναφερθούμε σε αυτό, μιας και αποτέλεσε το εφελτήριο για ένα μεγάλο κομμάτι ενασχόλησης της διπλωματικής αυτής.

5.5.3 Περιγραφή δημιουργίας προγράμματος για τη διάταξη ηλιοστατικών πεδίων

Ένα από τα οφέλη της ενασχόλησης με το πρόγραμμα CSPsim® ήταν η γρήγορη διαπίστωση ότι για τη δημιουργία ενός ηλιοστατικού πεδίου απαιτούνται δύο ξεχωριστές εφαρμογές :

- μία εφαρμογή που θα ορίζει τη γενική διάταξη του πεδίου, δηλαδή το ύψος του πύργου, τις συντεταγμένες και τις διαστάσεις των ηλιοστατών, και τα γεωμετρικά όρια του πεδίου
- μία εφαρμογή που θα αναλαμβάνει τη διεξαγωγή των υπολογισμών για την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε ηλιοστάτη, τις απώλειες και την παραγόμενη ισχύ στο δέκτη

Το λογισμικό, λοιπόν, που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι μια εφαρμογή που διεξάγει το πρώτο μέρος της διαδικασίας. Αφορά κατά κύριο λόγο πύργους με δέκτες κοιλότητας, αλλά όχι αναγκαστικά, και καθορίζει τη διάταξη των ηλιοστατών στο χώρο, έχοντας ως δεδομένα εισόδου το ύψος του δέκτη, τις διαστάσεις των ηλιοστατών και τη γωνία του κυκλικού τομέα για την οριοθέτηση του πεδίου. Προτού όμως γίνει η παρουσίαση του προγράμματος, θα γίνει μια συνοπτική της μεθοδολογίας πάνω στην οποία βασίζεται ο αλγόριθμος.

Καταρχάς, αναφέρουμε ότι το πρόγραμμα αφορά αποκλειστικά πεδία με διάταξη βόρεια του πύργου, καθότι διέπονται από απλούστερη γεωμετρία και είναι (συνήθως) μικρότερης έκτασης. Προκειμένου να καταλήξουμε στη συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκαν προσεγγίσεις και μεθοδολογίες για το ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο διάταξης από ένα σύνολο δημοσιεύσεων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [27],[28],[29],[30],[31]]. Αφού εισάγονται τα ζητούμενα δεδομένα εισόδου, ο αλγόριθμος υπολογισμού της διατάξεως ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Ορίζεται ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή το σημείο (0,0) που αντιπροσωπεύει τη θέση του πύργου στο χώρο. Οι άξονες x,y έχουν κανονική φορά προς Ανατολή και Βορρά αντίστοιχα.
2. Υπολογίζεται η ακτινική απόσταση της πρώτης σειράς ηλιοστατών από τη βάση του πύργου με τη σχέση $R_{min} = 0,8 \times THT$, (όπου THT το ύψος του δέκτη)
3. Υπολογίζεται η ακτινική απόσταση της τελευταίας σειράς ηλιοστατών από τη βάση του πύργου με τη σχέση $R_{max} = 7,15 \times THT$
4. Υπολογίζεται η διάμετρος για το μοντέλο ηλιοστάτη που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε από τη σχέση $D = \sqrt{(HW)^2 + (HH)^2}$, όπου H_W και H_H συμβολίζουν το πλάτος και το ύψος του ηλιοστάτη αντίστοιχα. Ο υπολογισμός της διαμέτρου είναι κρίσιμος στον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των ηλιοστατών στο πεδίο, ώστε να μην υπάρχει περίπτωση επαφής μεταξύ τους. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ότι στα δεδομένα εισόδου δίνεται η δυνατότητα ύπαρξης επιπλέον απόστασης μεταξύ των ηλιοστατών. Η απόσταση αυτή αποδεικνύεται χρήσιμη σε περίπτωση χρήσης κάποιου οχήματος για τον καθαρισμό των κατόπτρων (βλέπε κεφάλαιο 5.3.1).
5. Υπολογίζεται η απόσταση ακτινικού διάκενου από τη σχέση

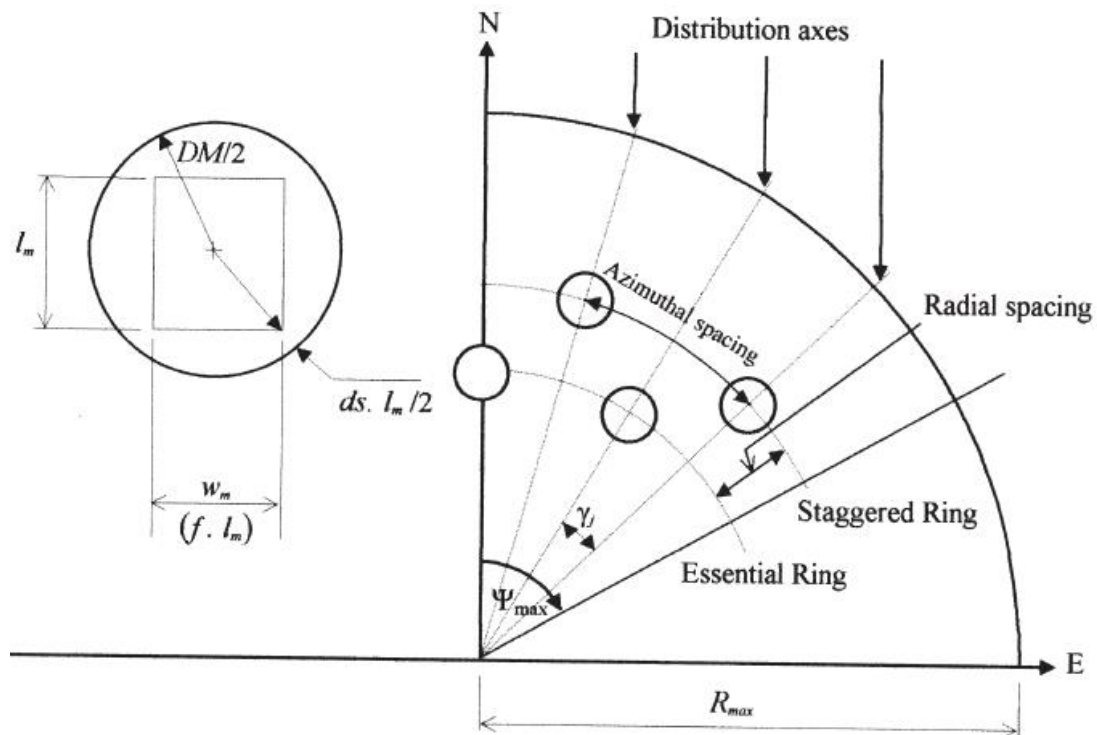
$$DR = (HH) \times (1,4424 \times \cot\theta_L - 1,0935 + 3,0684 \times \theta_L - 1,1256 \times \theta_L^2)$$
και η απόσταση αζιμουθιακού διάκενου από τη σχέση

$$DA = (HH) \times (1,749 + 0,6369 \times \theta_L) + \frac{0,2873}{\theta_L - 0,04902}$$

Όπου θ_L η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του εδάφους και της ευθείας που ενώνει τον εκάστοτε ηλιοστάτη με τον κεντρικό ηλιακό δέκτη και υπολογίζεται από τη σχέση : $\theta_L = \tan^{-1}\left(\frac{THT}{R}\right)$, όπου R η απόσταση του ηλιοστάτη από τη βάση του πύργου. Οι ηλιοστάτες που ανήκουν στον ίδιο δακτύλιο προφανώς θα έχουν και ίδια γωνία θ_L , αφού λόγω του ακτινικού μοτίβου διάταξης θα ισαπέχουν από τον πύργο. Έτσι ο υπολογισμός της γωνίας θ_L θα επαναλαμβάνεται μόνο όταν τοποθετείται ηλιοστάτης σε νέο δακτύλιο.

6. Η αζιμουθιακή γωνία, που αντιστοιχεί στο διάκενο DA, υπολογίζεται ως εξής :

$$\theta_{DA} = \frac{DA}{R}$$



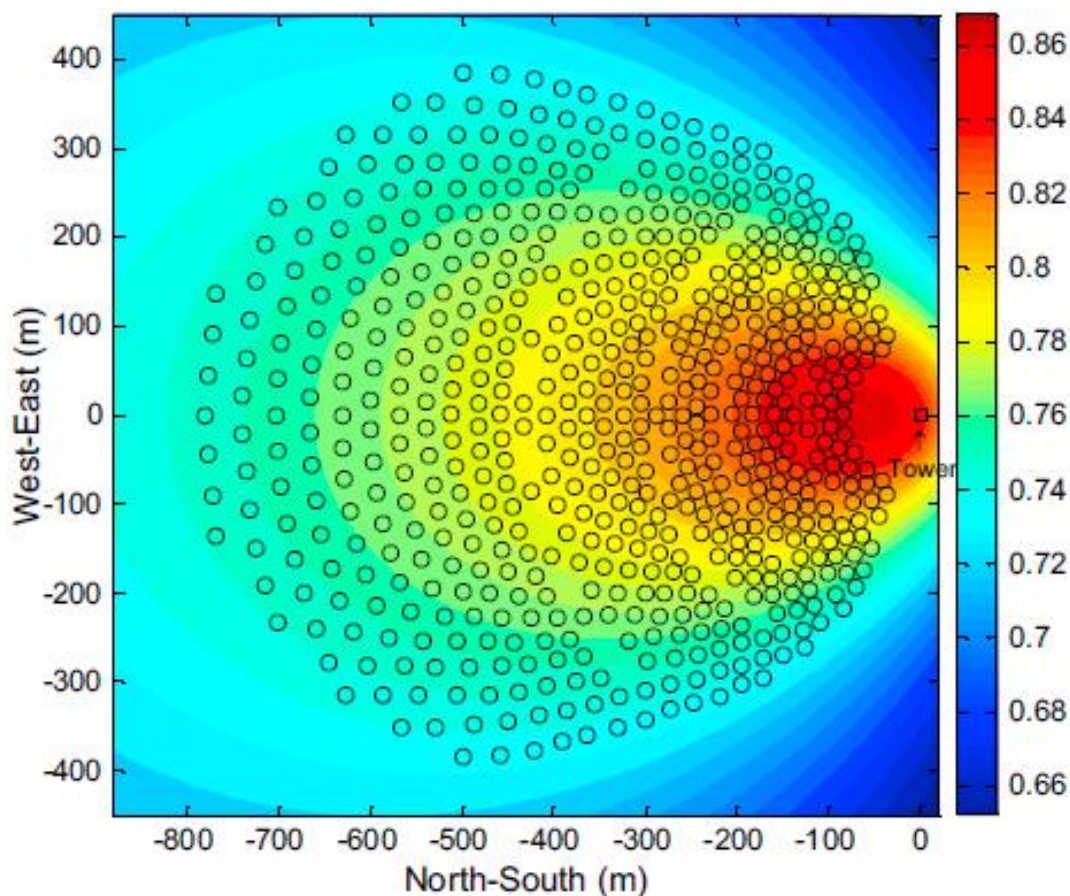
Σχήμα 5.31. Απεικόνιση βασικών χαρακτηριστικών του πεδίου [28]

Από εδώ και πέρα ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου, η οποία εναποθέτει ηλιοστάτες σε ημικυκλικό μοτίβο. Παρατηρήθηκε ότι όσο προχωράμε προς τους έξω δακτυλίους το αζιμουθιακό διάκενο DA μεταξύ των ηλιοστατών θα αυξάνεται. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγξουμε αν μπορούμε να τοποθετήσουμε στο μέσο δυο ηλιοστατών έναν επιπλέον, με την προϋπόθεση να μην παρεμποδίζει την κίνηση των υφιστάμενων ηλιοστατών. Αν ικανοποιείται η συγκεκριμένη συνθήκη, τότε τοποθετείται ο επιπλέον ηλιοστάτης και υπολογίζεται ξανά το νέο αζιμουθιακό διάκενο του δακτυλίου, ώστε να γίνει συμπλήρωση όλων των κενών. Αυτό σημαίνει ότι υπολογίζεται ξανά και η αζιμουθιακή γωνία. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του διαθέσιμου εμβαδού. Στην πρώτη φάση λοιπόν, ο αλγόριθμος υπολογίζει όλες τις πιθανές θέσεις που μπορούμε να τοποθετήσουμε τους ηλιοστάτες με μοναδικό περιορισμό το ύψος του πύργου. Η τοποθέτηση ηλιοστατών πέρα από την απόσταση R_{max} θα οδηγούσε σε υπερβολικά μεγάλες αποστάσεις ηλιοστατών, άρα και σε υψηλές απώλειες πεδίου.

Για πεδία με ακτινική κλιμακωτή διάταξη, αν υποθεθεί ότι η θέση του πεδίου, το ύψος του πύργου και ο αριθμός των ηλιοστατών είναι σταθερά, τότε η διάταξη καθορίζεται κυρίως από τα γεωμετρικά όρια του πεδίου, τις ακτινικές και γωνιακές αποστάσεις μεταξύ των ηλιοστατών και την απόσταση μεταξύ του πρώτου δακτυλίου και τη βάση του πύργου. Οι απώλειες συνημιτόνου και οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας του συστήματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα όρια του πεδίου. Έτσι, η απόδοση του συστήματος μπορεί να αυξηθεί με τη βελτιστοποίηση του καθορισμού των γεωμετρικών ορίων του πεδίου. Η αποτελεσματικότητα του πεδίου εξαρτάται επίσης έντονα από τις απώλειες παρεμπόδισης και σκίασης, οι οποίες στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούνται μηδενικές, καθώς ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ότι η τοποθέτηση

των ηλιοστατών θα γίνεται με τέτοιο τρόπο που να μην υπάρχει παρεμπόδιση της ανακλώμενης ακτινοβολίας.

Σε δεύτερη φάση λοιπόν, γίνεται η οριοθέτηση των ορίων του πεδίου, που αποτελεί ταυτόχρονα και μια μέθοδο βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε πειραματικές μελέτες που έγιναν για το σταθμό PS10 στην Ισπανία. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα οι ηλιοστάτες με τους υψηλότερους βαθμούς απόδοσης φαίνεται να εμπεριέχονται στο εμβαδόν ενός σχήματος που προσεγγίζει τη γεωμετρία έλλειψης.

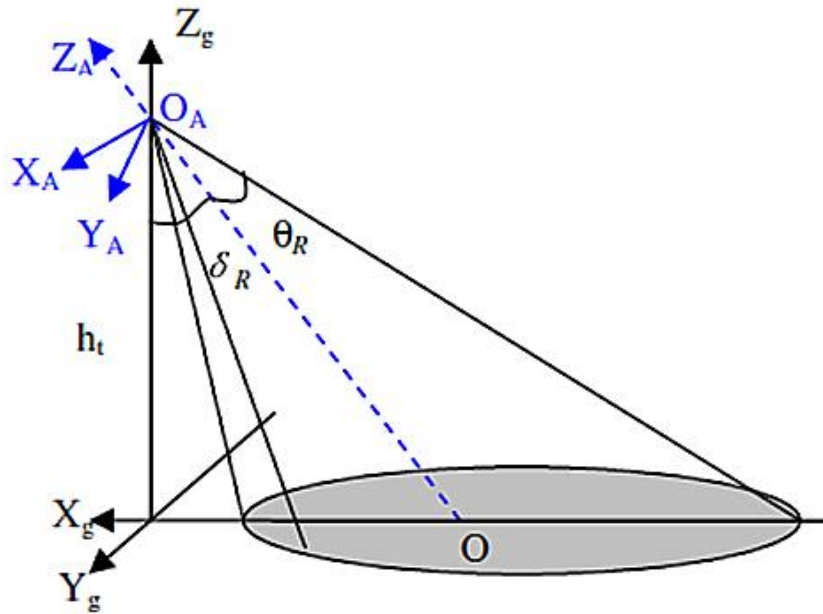


Σχήμα 5.32. Βαθμοί απόδοσης ηλιοστατών για το σταθμό PS10, Ισπανία

Η ελλειπτική αυτή ορίζει τα σύνορα του ηλιοστατικού πεδίου που αναζητούμε, και το περίγραμμά της δίνεται από την εξίσωση :

$$x^2 + [(-y) \times \cos\delta_R + THT \times \sin\delta_R]^2 - \tan^2\theta_R \times [(-y) \times \sin\delta_R - THT \times \cos\delta_R]^2 = 0$$

Όπου θ_R η γωνία του κυκλικού τομέα ή αλλιώς η γωνία κλίσης του δέκτη (σε περίπτωση δέκτη κοιλότητας) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.33. Βελτιστοποίηση ορίων ηλιοστατικού πεδίου

Με βάση το σχήμα 5.33 η γωνία θ_R υπολογίζεται ως εξής :

$$\theta_R = 90^\circ - \theta - \delta_R = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\text{THT}}{7,15 \times \text{THT}}\right) - \delta_R = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{1}{7,15}\right) - \delta_R$$

Τρέχοντας το λογισμικό εμφανίζεται το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων (σχήμα 6) για το πεδίο ηλιοστατών που επιθυμούμε να σχεδιάσουμε.

	Xleft inside	Yi	Xright inside
*			

Σχήμα 5.34. Παράθυρο εισόδου δεδομένων

Στις δύο πρώτες στήλες συμπληρώνουμε τις τιμές στα κουτιά, όπου:

- THT : το ύψος του σημείου εστίασης, που βρίσκεται στο μέσο του δέκτη
- Dr_p : η γωνία του κυκλικού τομέα, που οριοθετεί την έκταση του πεδίου και ταυτόχρονα αποτελεί την γωνία κλίσης σε περίπτωση δέκτη κοιλότητας
- HM : το ύψος για το μοντέλο του ηλιοστάτη που θα χρησιμοποιήσουμε
- WM : το πλάτος για το μοντέλο του ηλιοστάτη που θα χρησιμοποιήσουμε
- S : προαιρετική επιπλέον απόσταση ασφαλείας μεταξύ των ηλιοστατών

Τα κελιά που βρίσκονται στις δύο δεξιές στήλες τα αφήνουμε κενά και υπολογίζονται από τον αλγόριθμο, όπου :

- #Mirrors : ο συνολικός αριθμός ηλιοστατών του πεδίου
- R1: η ελάχιστη απόσταση μεταξύ ηλιοστατών και πύργου
- R2: η μέγιστη απόσταση μεταξύ ηλιοστατών και πύργου
- E_Total: το συνολικό εμβαδό που καταλαμβάνει το πεδίο ηλιοστατών (με τετραγωνική εκτίμηση, ώστε να αξιοποιείται στον υπολογισμό δαπανών για χρήση γης)
- -E: το εμβαδόν που μένει ανεκμετάλλευτο στην πίσω μεριά του πύργου και ενδεχομένως μπορεί να αξιοποιηθεί με επιπλέον κοιλότητα.
- +E: Το καθαρό εμβαδόν γης που καταλαμβάνουν οι ηλιοστάτες του πεδίου.

Μετά το τρέξιμο του αλγόριθμου, το πρόγραμμα εμφανίζει τα αποτελέσματα στις στήλες που βλέπουμε στο επόμενο σχήμα :

ROW	Xi (left)	Yi	Xi (right)
1	0	112	0
1	-29.8816794434...	107.9401928552...	29.88167944347...
1	-57.597040035149	96.05509345781...	57.597040035149
1	-81.1368135795...	77.20633058345...	81.13681357952...
1	-98.7944475619...	52.76037462838...	98.79444756195...
1	-109.289824328...	24.48947321128...	109.2898243288...
1	0	117.7100059184...	0
1	-31.4051130727...	113.4432208913...	31.40511307270...
1	-60.5334636019...	100.9521930304...	60.53346360197...
1	-85.2733464879...	81.14247883854...	85.27334648792...
1	-103.831205421...	55.45021437290...	103.8312054216...
1	-114.861659540...	25.73800032713...	114.8616595408...
2	-50.0476210294...	125.8304132339...	50.04762102946...
2	-50.0476210294...	116.7081416148...	50.04762102946...
2	-50.0476210294...	99.12493165337...	50.04762102946...
2	-50.0476210294...	74.35550551788...	50.04762102946...

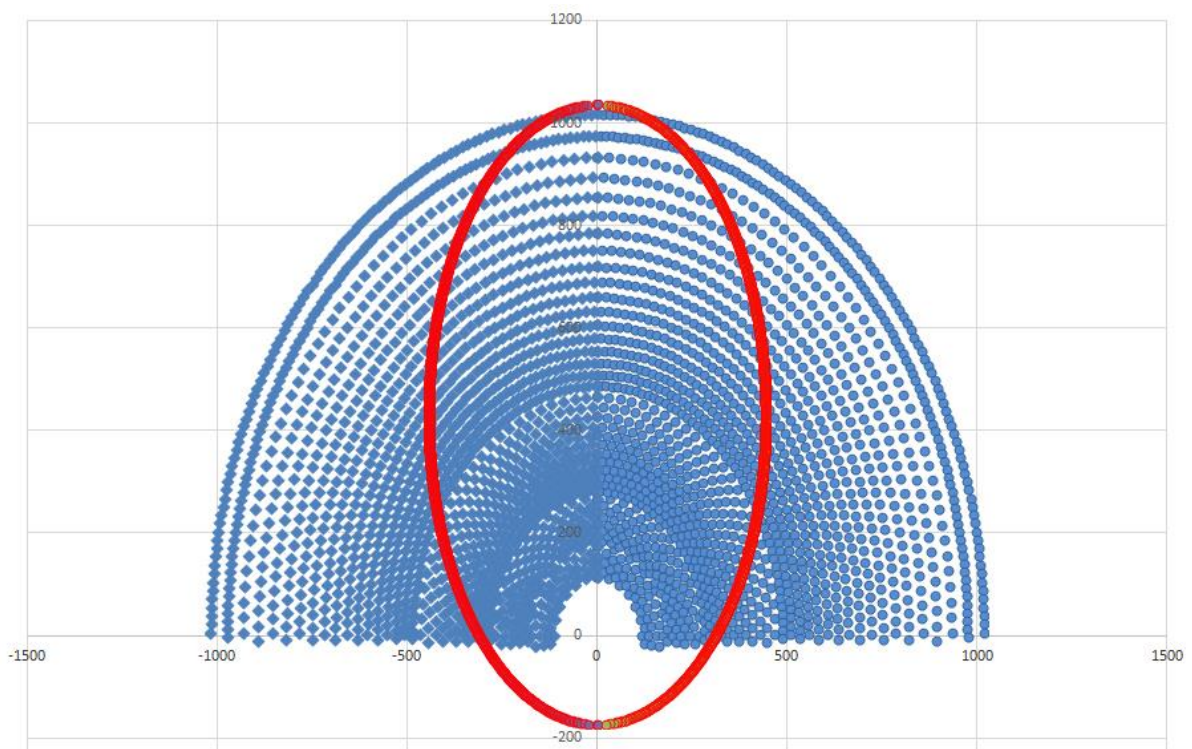
Σχήμα 5.35. Αποτελέσματα προγράμματος

Τα τελικά αποτελέσματα που περιέχονται στις στήλες μπορούν να περαστούν εύκολα σε αρχεία κειμένου (txt files) και περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες των ηλιοστατών καθώς και όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου, δηλαδή τις ακτίνες όλων των δακτυλίων, όλα τα αζιμουθιακά και ακτινικά διάκενα και όλες τις γωνίες θ_L .

Πιο συγκεκριμένα :

- «All_Heliostats_X-Y» : περιέχει τις συντεταγμένες για όλες τις πιθανές θέσεις ηλιοστατών, χωρίς να έχει ακολουθήσει κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης ακόμα, ώστε να έχουν αφαιρεθεί αυτοί με τη μεγαλύτερη απόσταση. Μας χρησιμεύει σε περίπτωση που θέλουμε να συμπληρώσουμε έναν αριθμό ηλιοστατών σε κάποιο πεδίο που βρίσκεται πολύ κοντά στην επιθυμητή ισχύ.
- «Ri_DA_DR» : περιέχει όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου. Συγκεκριμένα, για κάθε δακτύλιο υπολογίζεται η ακτινική του απόσταση από τη βάση (R), η γωνία θ_L για τους ηλιοστάτες που ανήκουν σε αυτόν τον δακτύλιο, το ακτινικό και αζιμουθιακό διάκενο και η γωνία αζιμουθιακού διακενου θ_{DA} .
- «X_Y_Inside» : περιέχει όλες τις συντεταγμένες των ηλιοστατών μετά τη μέθοδο βελτιστοποίησης, δηλαδή αυτούς που περιέχονται στην έλλειψη.

Παραθέτουμε ενδεικτικά το σχήμα για το παραπάνω που δημιουργήσαμε με τη βοήθεια της εφαρμογής.



Σχήμα 5.36 Σχήμα πεδίου ηλιοστατών από τα δεδομένα του αλγόριθμου

5.5.4 Πρόγραμμα προσομοίωσης λειτουργίας του πεδίου ηλιοστατών

Με τη βοήθεια της εφαρμογής που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορούμε πλέον να δημιουργήσουμε ηλιακά πεδία για σχεδόν οποιαδήποτε πιθανά μοντέλα ηλιοστατών και πύργου. Αυτό που χρειαζόμαστε ακόμα είναι η εφαρμογή που θα αναλαμβάνει τη διεξαγωγή των υπολογισμών για την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε ηλιοστάτη, τις απώλειες και την παραγόμενη ισχύ στο δέκτη με βάση την μελέτη ηλιακού δυναμικού που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.4.

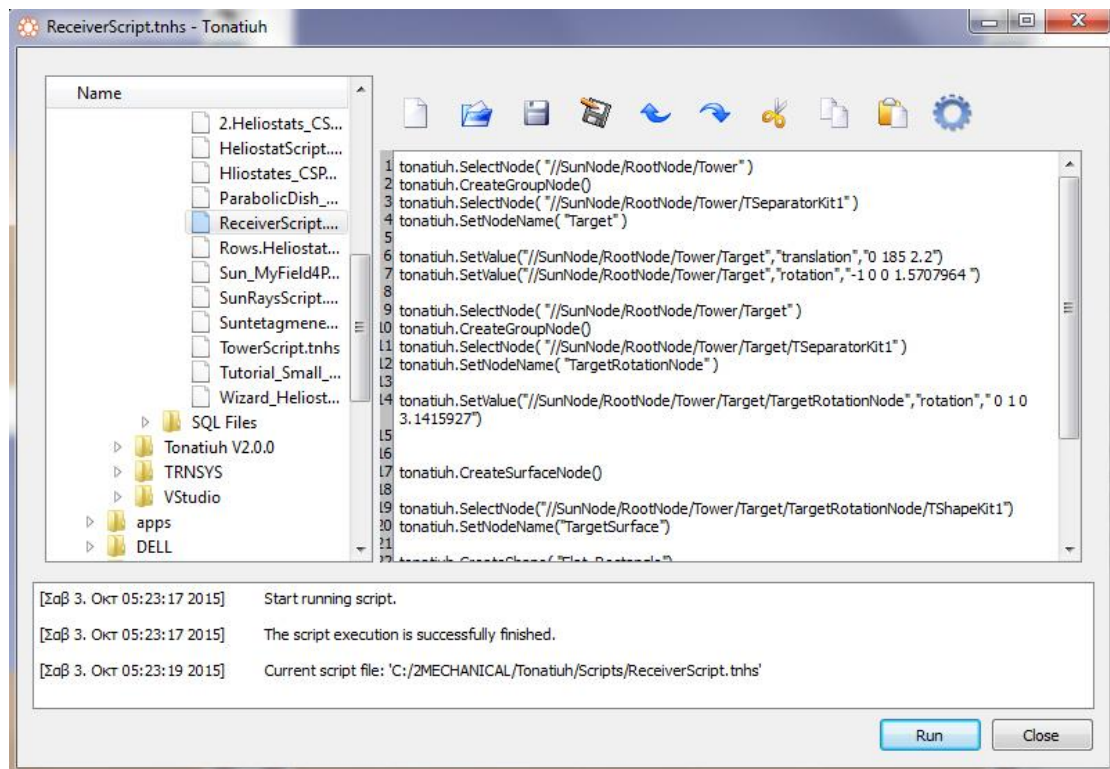
Χρειαζόμαστε δηλαδή μια εφαρμογή με ενσωματωμένη στατιστική ανάλυση Monte Carlo, η οποία αποτελεί την καταλληλότερη λύση για τη μοντελοποίηση όλων των πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ φωτός και αντικειμένων. Η υλοποίηση της ανάλυσης Monte Carlo γίνεται με τη χρήση αλγόριθμου που εμπεριέχει μέθοδο ιχνηλάτησης των ακτινών, ανιχνεύει δηλαδή την κίνηση σωματιδίων που εκτελούν μια τυχαία διαδρομή στο χώρο. Ανατρέχοντας στον πίνακα 1, βλέπουμε ότι υπάρχουν δύο διαθέσιμα λογισμικά για που παραχωρούνται ελεύθερα προς χρήση : το λογισμικό SolTrace και το λογισμικό Tonatiuh. Η κύρια διαφορά τους, η οποία έπαιξε και καθοριστικό ρόλο στην τελική επιλογή, είναι πως το Tonatiuh είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα και μάλιστα διαθέτει ενσωματωμένη ψευδογλώσσα προγραμματισμού επιτρέποντας μας σχεδιάσουμε τα δικά μας μοντέλα πύργου και ηλιοστατών. Τέλος, για τονίσουμε την αξιοπιστία του, αναφέρουμε ότι το λογισμικό Tonatiuh αναπτύχθηκε στην Ισπανία από το κρατικό τεχνολογικό κέντρο ερευνών CENER.

Το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει πολλές ρυθμίσεις παραμέτρων που εξασφαλίζουν τη διεξαγωγή ορθών υπολογισμών σε ένα πεδίο ηλιοστατών και εδώ αξίζει να αναφέρουμε μερικές από αυτές :

- Εισαγωγή Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας : έχουμε τη δυνατότητα να εισάγουμε χειροκίνητα την τιμή της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε προσομοίωση.
- Ακριβής υπολογισμός ηλιακών γωνιών : όπως φαίνεται και στην εικόνα 2 εισάγουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας, την ημερομηνία και ώρα της προσομοίωσης και το λογισμικό υπολογίζει τη γωνία ζενίθ, τη γωνία αζιμούθιου και το ηλιακό ύψος (declination).
- Ατμοσφαιρική Διαπερατότητα : στο κεφάλαιο 5.2. αναφερθήκαμε στις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας οι οποίες κυμαίνονται στο 6% αλλά δεν είναι σταθερές για όλο το πεδίο. Το λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ έξι διαφορετικών επιλογών για την ατμοσφαιρική διαπερατότητα.
- Απώλειες ανακλαστικότητας : κατά τη δημιουργία του μοντέλου ηλιοστάτη μας δίνεται η δυνατότητα να εισάγουμε το συντελεστή ανακλαστικότητας.

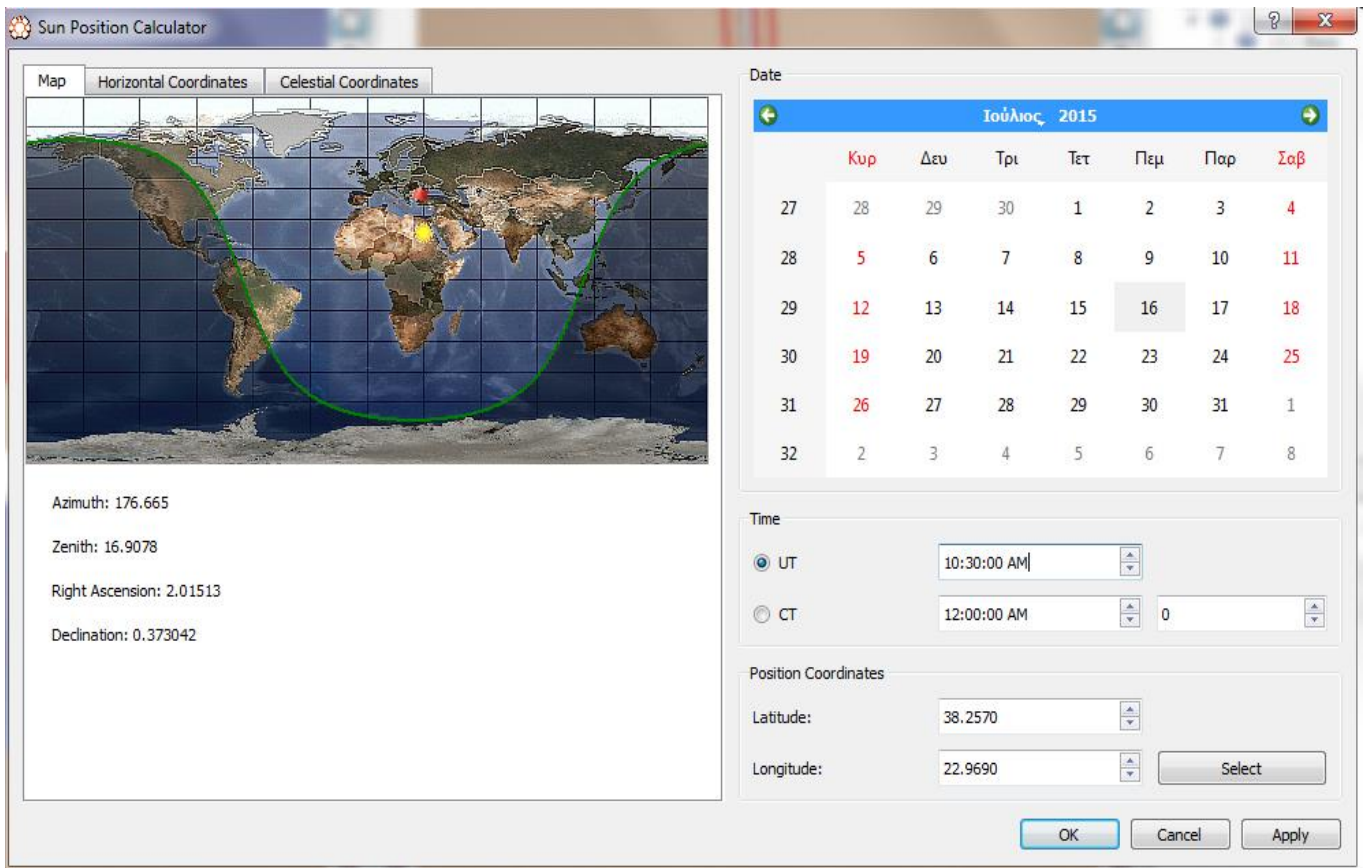
Περιγραφή Δημιουργίας Πεδίου Ηλιοστατών

- 1 Τρέχουμε το λογισμικό που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 5.5.3 .Για το παράδειγμά μας θα εισάγουμε ως δεδομένα εισόδου τα εξής:
 - $THT = 145$
 - $HM = 10$
 - $WM = 12$
 - $Dr_p = 40$
- 2 Έχουμε πλέον σε αρχεία κειμένου τις συντεταγμένες για όλους τους ηλιοστάτες που θα αποτελούν το ηλιακό μας πεδίο. Ανοίγουμε το λογισμικό Tonatiuh και πηγαίνουμε στην επιλογή «Automation». Το παράθυρο που εμφανίζεται είναι στην ουσία ένας κατάλογος εισαγωγής εντολών (script editor) που μας επιτρέπει να σχεδιάσουμε τα μοντέλα για τον πύργο, το δέκτη και τον ηλιοστάτη που θα χρησιμοποιήσουμε (βλέπε εικόνα 5.37). Έτσι σχεδιάζουμε τα τρία βασικά μοντέλα του ηλιοστατικού πεδίου.



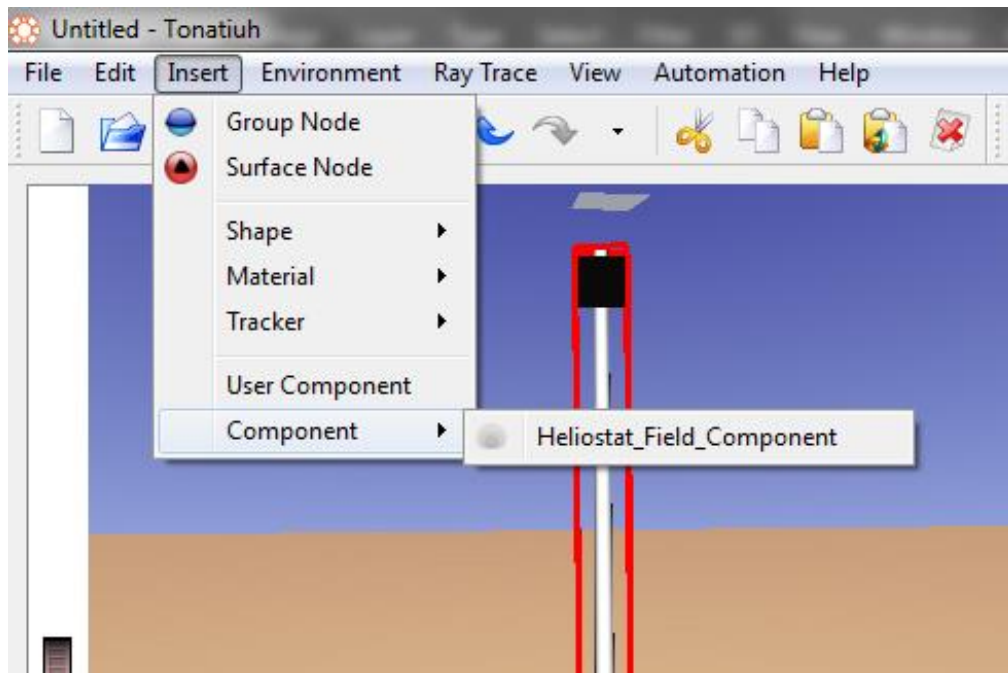
Εικόνα 5.37. Κατάλογος εντολών για τη δημιουργία δέκτη στο λογισμικό Tonatiuh

- 3 Καθορίζουμε τις συνθήκες της προσομοίωσης, επιλέγοντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες για την τοποθεσία, την ημερομηνία, την ώρα και την τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (εικόνα 5.38).

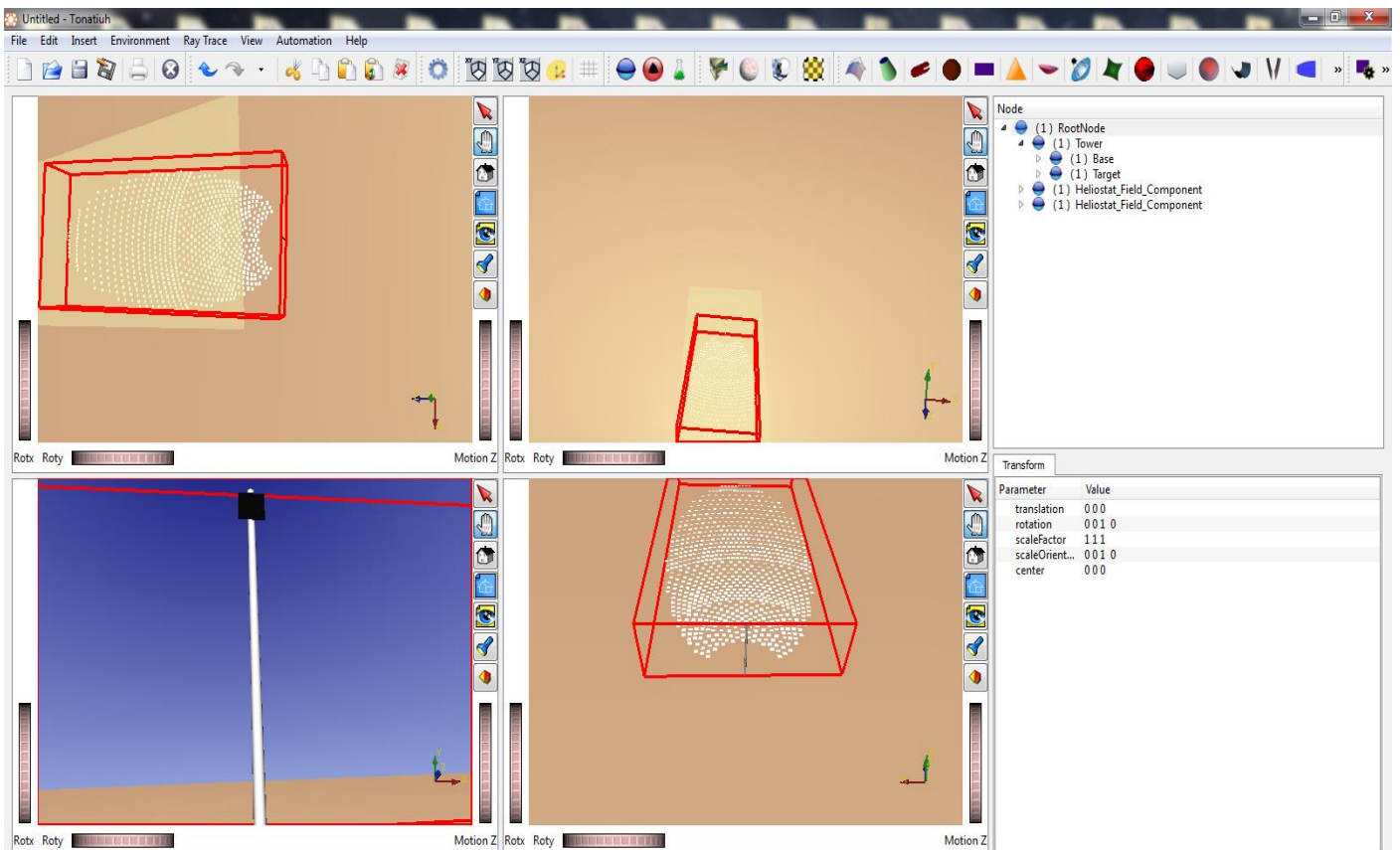


Εικόνα 5.38. Καθορισμός συνθηκών προσομοίωσης

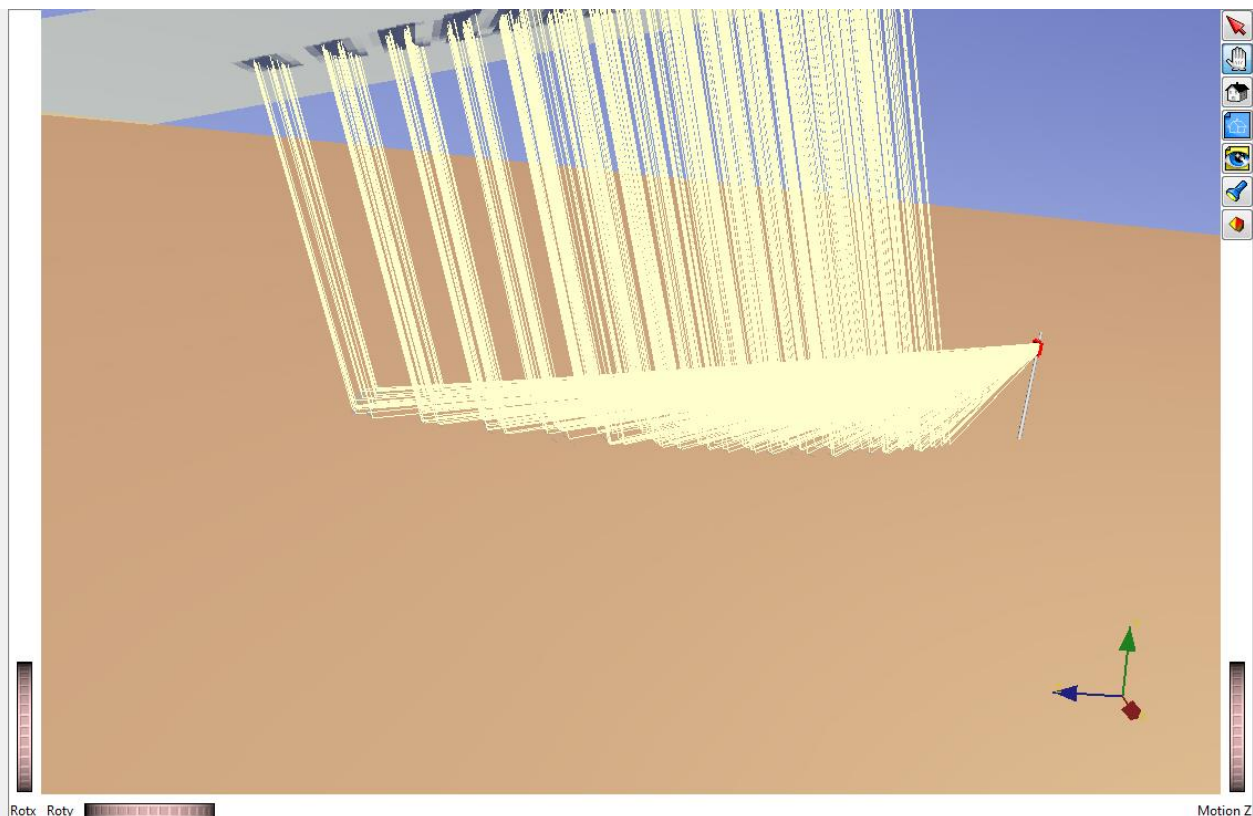
- 4 Στην τελευταία έκδοση του λογισμικού Tonatiuh έχει προστεθεί η επιλογή προσθήκης ηλιοστατών αυτόματα στο πεδίο αρκεί να γνωρίζουμε τις συντεταγμένες τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι αλλιώς θα έπρεπε να γίνει χειροκίνητα και θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρο, αφού έχουμε να κάνουμε πεδία εκατοντάδων ή και χιλιάδων ηλιοστατών. Με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε από τον δικό μας αλγόριθμο είναι πλέον εύκολο να τα εισάγουμε στο σύστημα (εικόνα 5.39).
- 5 Στο τελευταίο μας βήμα καθορίζουμε το μαθηματικό μοντέλο κατανομής για τις ηλιακές ακτίνες (για το παράδειγμα επιλέξαμε Mersenne Twister) και το πλήθος των ακτινών που χρειαζόμαστε για την προσομοίωση. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ακτινών που θέτουμε τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα θα έχουμε. Εδώ διευκρινίζουμε ότι το πλήθος των ακτινών δεν αυξάνει την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο δέκτη από άποψη ισχύος. Η ισχύ στο δέκτη έχει να κάνει με τον αριθμό φωτονίων που προσπίπτουν πάνω του, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω.



Εικόνα 5.39. Αυτόματη εισαγωγή ηλιοστατών με βάση τις συντεταγμένες



Εικόνα 5.40. Απεικόνιση ηλιοστατικού πεδίου



Εικόνα 5.41. Προσομοίωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

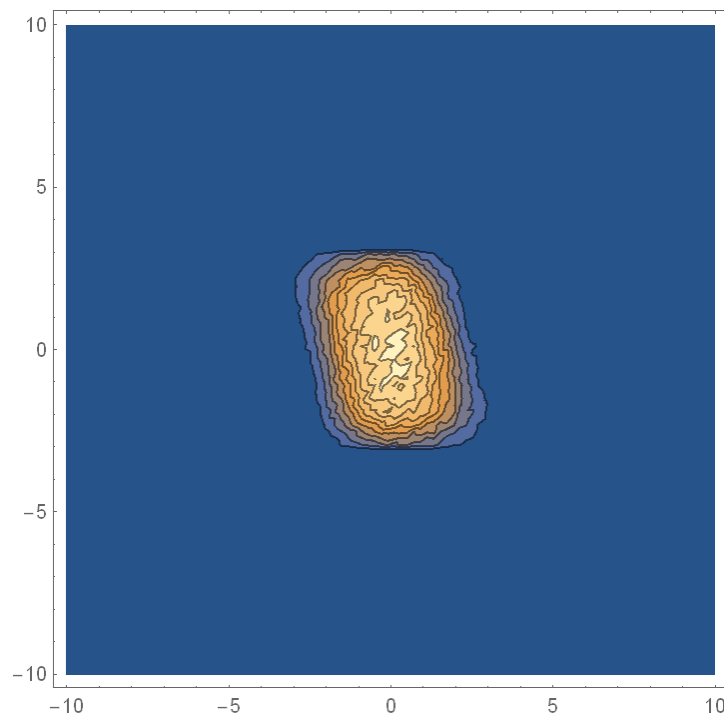
Προτού αναλύσουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από το λογισμικό Tonatiuh, καλό είναι να αναφέρουμε τι συμβαίνει στην προσομοίωση ηλιακής ακτινοβολίας. Η μεταφορά της ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία γίνεται μέσω φωτονίων, κοινώς αναφερόμενα ως σωματίδια ηλιακής ακτινοβολίας. Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη προκαλώντας διέγερση των μορίων. Έτσι έχουμε είτε ανακατεύθυνση των φωτονίων σε τυχαία διεύθυνση (φαινόμενο σκέδασης) είτε σύγκρουση με άλλα σώματα/επιφάνειες (φαινόμενο απορρόφησης). Στη δική μας περίπτωση, εφόσον γνωρίζουμε τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια μέσω της τιμής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (σε μονάδες W/m^2), μας ενδιαφέρει να δούμε πόση από αυτή την ακτινοβολία έφτασε τελικά στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη. Στην πραγματικότητα, δηλαδή, αυτό που ψάχνουμε είναι ο αριθμός των φωτονίων που κατέληξαν πάνω στο δέκτη.

Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

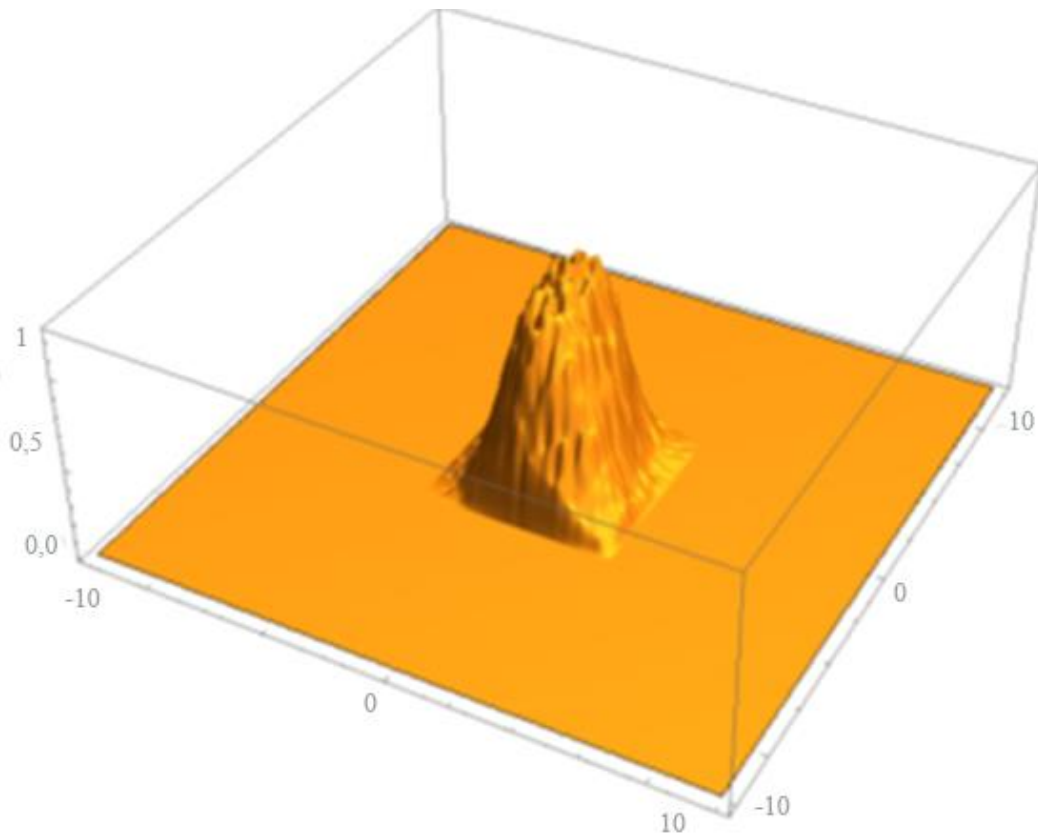
Με το τέλος της προσομοίωσης το λογισμικό Tonatiuh μας δίνει ως αποτέλεσμα έναν χάρτη φωτονίων για την επιφάνεια του δέκτη (σε μορφή binary file) και ένα αρχείο κειμένου (txt file) με τα χαρακτηριστικά της ενέργειας των φωτονίων. Προς το παρόν, το Tonatiuh δεν παρέχει επεξεργαστή για την ανάλυση του χάρτη φωτονίων, οπότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα. Για τους σκοπούς της διπλωματικής αυτής επιλέχθηκε το πρόγραμμα Mathematica, στο οποίο φτιάξαμε έναν σχετικά απλό

αλγόριθμο επεξεργασίας δεδομένων για την επιφάνεια του δέκτη. Η λογική του αλγόριθμου είναι η εξής :

- Εισάγουμε τις διαστάσεις της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη και υπολογίζουμε το εμβαδόν της επιφάνειας.
- Θέλοντας να δημιουργήσουμε ένα χωροταξικό πλέγμα για την επιφάνεια του δέκτη, ορίζουμε τον αριθμό επιμέρους επιφανειών που θα χωρίσουμε την επιφάνεια.
- Διαιρούμε το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας με τον αριθμό των τετραγωνικών πλεγμάτων και υπολογίζουμε το εμβαδόν τους.
- Εισάγουμε τα δεδομένα από τον χάρτη φωτονίων και βάζουμε τον αλγόριθμο να εντοπίσει σε κάθε επιμέρους επιφάνεια τον αριθμό των φωτονίων που έχουν προσπέσει πάνω της. Έτσι υπολογίζουμε την ισχύ που δέχεται ο δέκτης (Q_{rec})
- Με χρήση μαθηματικών μοντέλων που περιέχει το Mathematica οπτικοποιούμε την εκτιμώμενη κατανομή της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη. Αυτό είναι χρήσιμο σε περίπτωση που θέλουμε να προσαρμόσουμε το μέγεθος της επιφάνειας του δέκτη, να ελέγξουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δέκτη αλλά και να δούμε πως κατανέμεται η ροή σε περίπτωση εξωτερικού δέκτη(βλέπε σχήμα 5.42)



Σχήμα 5.42. Δισδιάστατη κατανομή της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής στην επιφάνεια του δέκτη



Σχήμα 5.43 . Τρισδιάσταση κατανομή της ροής στην επιφάνεια του δέκτη

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ

Για όλες τις προσομοιώσεις η στόχευση των ηλιοστατών γινόταν για το κέντρο της κοιλότητας του δέκτη με τη βοήθεια του λογισμικού Tonatiuh. Έτσι, η κατανομή της συγκεντρωμένης ροής γινόταν σε εμβαδόν σχεδόν ελλειπτικού σχήματος με μέγιστη διάμετρο 8 μέτρων. Αυτό σημαίνει ότι όλη η συγκέντρωση της ροής γινόταν σε αυτή την επιφάνεια, στοιχείο ιδιαίτερα χρήσιμο για τη διαστασιολόγηση της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη. Δεδομένου ότι οι περισσότεροι δέκτες κοιλότητας έχουν άνοιγμα αρκετά μεγαλύτερο, επιλέξαμε να κατασκευάσουμε την επιφάνεια δέκτη σε μεγαλύτερες διαστάσεις για να εξασφαλίσουμε ότι δεν θα χάνουμε ποσοστό ακτινοβολίας λόγω κακής εστίασης. Έτσι επιλέχθηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις δέκτη, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου τόσο μεγαλύτερο και το άνοιγμα της κοιλότητας. Για τα περισσότερα πεδία χρησιμοποιήθηκε δέκτης τετραγωνικής κοιλότητας 10x10. Σε αυτό το σημείο θα μπορούσε να τεθεί θέμα υπερ-διαστασιολόγησης του δέκτη αλλά η διαστασιολόγηση του δέκτη κοιλότητας δεν ακολουθεί τα ίδια πρότυπα με τους εξωτερικούς δέκτες που βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην ενεργή επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας και στο άνω όριο θερμικής ροής (critical heat flux-CHF).

Με βάση το σχήμα 5.43 μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος που φτάνει στην επιφάνεια του δέκτη. Στον δέκτη τα άνω όρια θερμικής ροής ανά μονάδα επιφάνειας του δέκτη καθορίζονται από τα όρια θερμικής αντοχής των υλικών των σωληνώσεων και από τις απαιτήσεις συναλλαγής θερμότητας σε αυτούς. Ο δέκτης κοιλότητας έχει άνω όριο θερμικής ροής (CHF) πάνω από 900 kW/m^2 , αρκετά υψηλότερα δηλαδή από τις τιμές που παρατηρούμε στο σχήμα 5.43, που είχε μέγιστη τιμή 713 kW/m^2 . Στην περίπτωση που η μέγιστη τιμή ροής ξεπερνούσε την τιμή

αυτή θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε μέθοδο στόχευσης των ηλιοστατών σε διαφορεικά σημεία του δέκτη, ώστε να πετύχουμε καλύτερη κατανομή της ροής.

5.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] W.B. Stine, M.Geyer. "Power From The Sun". Chapter 10, Central Receiver Systems. Copyright © 2001
- [2] W.B. Stine, R.W. Harrigan. "Solar Energy Systems Design". John Wiley and Sons, Inc. 1986. Revised and updated version by William Stine and Michael Geyer.
- [3] X. Wei et al. "A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant". Renewable Energy 35 (2010) 1970–1975.
- [4] K. Kattke, L. Vant-Hull. "Optimum Target Reflectivity For Heliostat Washing". SolarPaces Paper (2012)
- [5] <http://mcensustainableenergy.pbworks.com/w/page/32181014/Central%20Receiver%20System%20%28Power%20Tower%29%20CSP> (Ηλεκτρονικό)
- [6] K.-K. Chong and M. H. Tan. Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field. International Journal of Photoenergy, Volume 2012, Article ID 908364 2012
- [7] Z. Yao, Z. Wang, Z. Lu, X. Wei. "Modeling and simulation of the pioneer 1 MW solar thermal central receiver system in China". Renewable Energy, Volume 34, Issue 11. Elsevier Ltd.
- [8] Robert Y. Ma. "Wind effects on convective heat loss from a cavity receiver for a parabolic concentrating solar collector" Department of Mechanical Engineering California State Polytechnic University Pomona, SAND7293 (1993) [7-50]
- [9] Siebers, D. L., and J. S. Kraabel, 1984, "Estimating Convective Energy Losses From Solar Central Receivers," SAND84-8717, Sandia National Laboratories.
- [10] Clausing, A. M., "An Analysis of Convective Losses From Cavity Solar Central Receivers," Solar Energy, Vol. 27, No. 4, (1981) [295-300]
- [11] R. Abdiwe, M. Haider, "Investigations on Heat Loss in Solar Tower Receivers with Wind Speed Variation", International Journal of Sustainable and Green Energy (2015) [159-165]
- [12] J. Kim, Jin-Soo Kim, W. Stein, "Simplified heat loss model for central tower solar receiver", Solar Energy 116 (2015) 314–322, (2015)

- [13] Ελευθέριος Σαατσάκης, "Μελέτη ηλιοθερμικής εγκατάστασης με πύργο ηλιακής ισχύος στην περιοχή του Αθερινόλακκου". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία (2012)
- [14] <http://www.dlr.de/>
- [15] G.E.Cohen,D.W.Kearney,G.J.Kolb, "Final report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants,SAND99-1290, (1999) [15-18]
- [16] "HECTOR-HEliostats Cleaning Team Oriented Robot", www.sener-aerospace.com
- [17] MurphyLM., "Wind loading on tracking and field mounted solar collectors",Technical Report for Colorado State University.Report No.SERI/TP-632-958 (1980)
- [18] RE<C: Heliostat Wind Mitigation (www.google.org)
- [19] RE<C: Heliostat Project Overview (www.google.org)
- [20] RE<C: Heliostat Flow Visualization Experiments (www.google.org)
- [21] RE<C: Heliostat Wind Tunnel Experiments (www.google.org)
- [22] P.Schramek, D.R. Mills, "Multi-tower solar array",Solar Energy 75 (2003) [249–260]
- [23] J.K.Kim, H.K.Yoon, Y.H.Kang, "EXPERIMENTAL STUDY ON HEAT LOSS FROM CAVITY RECEIVER FOR SOLAR POWER TOWER", Institute of Energy Research
- [24] L.Crespo, F.Ramos, F.Martínez. "Questions and Answers on Solar Central Receiver Plant Design" by NSPOC, SolarPACES (2011)
- [25] E.Carrizosa, C.Domínguez-Bravo,E.Fernández-Cara,M. Quero. "An Optimization Approach to the Design of Multi-Size Heliostat fields", (2014)
- [26] https://dl.dropboxusercontent.com/u/4132208/my_website/CSPsim.htm (Ηλεκτρονικό)
- [27] S.M.Besarati, D.Y.Goswam. "A computationally efficient method for the design of the heliostat field for solar power tower plant",Renewable Energy 69 (2014) [226-232]
- [28] F.M.F. Siala, M.E.Elayed, Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout, Renewable Energy 23 (2001) [77-92]
- [29] X.Wei, Z.Lu, W.Yu, Z.Wang, "A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system", Solar Energy 84 (2010) [685-690]
- [30] X.Wei, Z.Lu, W.Yu, Z.Wang, H.Zhang, Z.Yao, "A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower", Renewable Energy 35 (2010) [1970-1975]
- [31] X.Wei, Z.Lu, Z.Lin, H.Zhang, Z.Ni, "Optimization procedure for Design of Heliostat Field Layout of a 1MWe Solar Tower Thermal Power Plant"

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΘΙΣΒΗΣ

6.1 Παρουσίαση σταθμού-Χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου

Ο θερμικός σταθμός που τέθηκε προς μελέτη είναι ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο (NGCC-Natural Gas Combined Cycle) συνολικής εγκατεστημένης ισχύς 421MW. Όπως ήδη αναφέρθηκε βρίσκεται λίγο έξω από την περιοχή της Θίσβης, στη βιομηχανική περιοχή της Θήβας. Μία αεροφωτογραφία της ευρύτερης τοποθεσίας του σταθμού θα μας βοηθήσει να καταλάβουμε την τοπογραφία της περιοχής, ώστε να λάβουμε υπόψη τυχόν περιοριστικούς παράγοντες στην έκταση ή κατασκευή του ηλιακού πεδίου (π.χ. παρουσία δασικής έκτασης, ορεινού όγκου πλησίον του σταθμού κτλ).



Σχήμα 6.1. Αεροφωτογραφία ευρύτερης περιοχής του σταθμού της Θίσβης

Ευτυχώς παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποιος περιοριστικός παράγοντας στην τοποθεσία, καθώς ο σταθμός βρίσκεται αρκετά απομονωμένος από την κατοικήσιμη ζώνη και σε ακτίνα άνω των δύο χιλιομέτρων δεν υπάρχει κάποιο κτίσμα ή άλλος σταθμός. Αυτό σημαίνει ότι ο παράγοντας οπτικής ενόχλησης παύει να υφίσταται και επίσης δεν έχουμε κάποιον περιορισμό σε ότι αφορά τα όρια του πεδίου από άποψη έκτασης. Μάλιστα, βόρεια του σταθμού υπάρχει μεγάλη ανεκμετάλλευτη έκταση γης και μάλιστα επίπεδη, ώστε να μην απαιτούνται έξοδα για την ομαλοποίηση της κλίσης του εδάφους. Το μόνο αρνητικό είναι ότι ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στη θάλασσα και το ηλιακό πεδίο αναμένεται να είναι εκτεθειμένο σε σχετικά υψηλά ανεμικά φορτία, με δεδομένη την επίπεδη τοπογραφία της περιοχής. (Οι άνεμοι λόγω της παρουσίας θάλασσας αποκαλούνται θαλάσσιες και απόγειες αύρες, παρατηρούνται κυρίως στις παράλιες περιοχές, αλλά γίνονται αισθητές και

αρκετά χιλιόμετρα στο εσωτερικό.) Η παρουσία της θάλασσας πάλι εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα υγρασίας, άρα και παρουσία βροχοπτώσεων που εξασφαλίζουν φυσικό καθαρισμό των ηλιοστατών.

Για τον θερμικό σταθμό έχοντας εγκατεστημένη ισχύ 421MW περιμένουμε από ένα σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη να προσφέρει ισχύ τουλάχιστον 20MW, ώστε να αξιολογηθεί σαν επένδυση. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάστηκαν οι σταθμοί με σύστημα ηλιακού πύργου που βρίσκονται σε λειτουργία ανά την υφήλιο. Με τη λογική ότι η Ισπανία και η Ελλάδα βρίσκονται σε παρόμοιο γεωγραφικό πλάτος, άρα έχουν και παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες, εστίασαμε την προσοχή μας στους σταθμούς που κατασκευάστηκαν εκεί την τελευταία δεκαετία. Στον πίνακα συμπεριλαμβάνεται και ο σταθμός Khi Solar One που βρίσκεται στη Νότιο Αφρική για τον ίδιο λόγο. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Όνομα Σταθμού	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Εμβαδόν Επιφάνειας Ηλιοστάτη (m ²)	Πλήθος Ηλιοστατών πεδίου	Συνολικό Εμβαδόν Ανακλαστικής επιφάνειας (m ²)	Ύψος Πύργου (m)
PS10	11	120	624	74880	115
PS20	20	120	1255	150600	165
Gemasolar TSP	20	120	2650	318000	140
Khi Solar One	50	140	4120	576800	205

Πίνακας 6.1. Ηλιακά συστήματα πύργου στην Ισπανία και Ν.Αφρική

Αυτό που παρατηρούμε στον πίνακα 6.1 είναι πως και οι τέσσερις σταθμοί έχουν εγκατεστημένη ισχύ από 10 έως 50 MW και κάνουν χρήση ηλιοστατών μεγάλου εμβαδού (120m² ή 140m²). Το ύψος του πύργου ποικίλει, ξεκινώντας από 115 έως και 205 m. Με βάση τα παραπάνω θα επιχειρήσουμε να κατασκευάσουμε ηλιοστατικό πεδίο με ηλιοστάτες εμβαδού 120m² και θα κάνουμε δοκιμές για διαφορετικά ύψη πύργου.

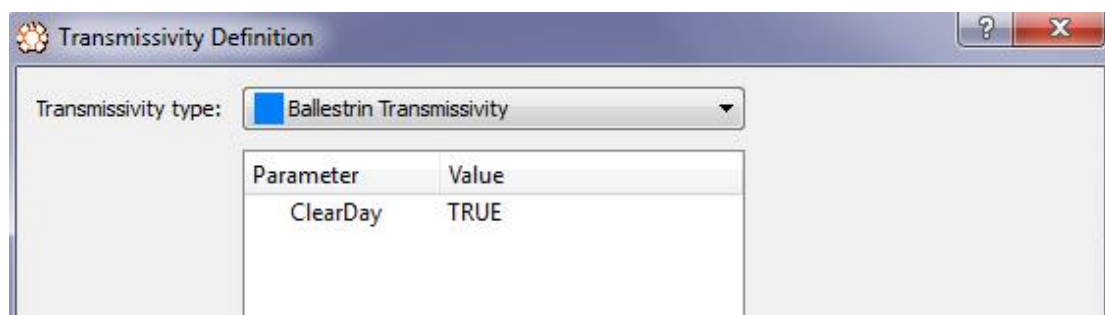
6.2 Μελέτη ηλιακών πεδίων Θίσβης

Προτού παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για τα ηλιακά πεδία που μελετήσαμε αναφέρουμε ότι για κάθε πεδίο που σχεδιάσαμε επιλέχθηκαν δύο σημεία προσομοίωσης με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης ηλιακού δυναμικού που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.4. Σαν πρώτο σημείο προσομοίωσης επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή DNI που παρουσιάζεται στην τοποθεσία, δηλαδή 656 W/m², για τις 16 Ιουλίου ώρα 12:30 (τοπική). Σαν δεύτερο σημείο, επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή DNI για τον μήνα με το χαμηλότερο μέσο όρο DNI, δηλαδή 282 W/m² για τις 16 Δεκεμβρίου. Πρόκειται στην ουσία για επιλογή δύο ακραίων τιμών που θα μας επιτρέψει να κατανοήσουμε τη συμβολή του συστήματος ηλιακού πύργου στην παραγωγή ισχύος τόσο σε ιδανικές συνθήκες, όσο και σε οριακές.

Ακόμα θα κάνουμε μια ανασκόπηση στις απώλειες του πεδίου και πως ενσωματώθηκαν στους υπολογισμούς :

Απώλειες του πεδίου ηλιοστατών

- Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας : Οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας κυμαίνονται στο 6% ετησίως αλλά δεν είναι σταθερές για όλο το πεδίο. Εξαρτώνται κυρίως από τα καιρικά φαινόμενα και την παρουσία λυμάτων στην ατμόσφαιρα. Έτσι, στο πρώτο σημείο της προσομοίωσης με μέγιστη τιμή ηλιοφάνειας αναμένουμε καθαρή ατμόσφαιρα, ενώ στο δεύτερο σημείο σχεδίασης αναμένουμε ομιχλώδη ατμόσφαιρα και γενικά παρουσία σύννεφων. Το λογισμικό Tonatiuh μας δίνει την επιλογή να ορίσουμε τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ώστε να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας (βλέπε εικόνα 6.2).
- Απώλειες Ανακλαστικότητας : Στο κεφάλαιο 5.3.1 προτείναμε μεθόδους καθαρισμού του πεδίου ηλιοστατών. Το γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι είναι οικονομικά αποδοτικό να διατηρείται η μέση ανακλαστικότητα του πεδίου πάνω από 90%. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής ο βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας των ηλιοστατών θεωρείται ίσος με: $\eta_{refl}=0,93$ (υπάρχει επιλογή ορισμού του βαθμού ανακλαστικότητας στο Tonatiuh).
- Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης : Στην περιγραφή του αλγόριθμου διάταξης του πεδίου ηλιοστατών αναφέραμε ότι η τοποθέτησή τους γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται μηδενικές απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης. Άρα $\eta_{sh}=1$ και $\eta_{bl}=1$.
- Απώλειες Διαρροής : Για πεδία ηλιακού δέκτη κοιλότητας ορίστηκαν 2%, δηλαδή συντελεστής απωλειών διαρροής $\eta_{spill}=0.98$ (βλέπε κεφάλαιο 5.2).



Εικόνα 6.2. Επιλογή καθορισμού συνθηκών ατμόσφαιρας στο λογισμικό Tonatiuh

Απώλειες του κεντρικού δέκτη

- Απώλειες Ακτινοβολίας και Απώλειες λόγω Συναγωγής : Το άθροισμα και των δύο αυτών απωλειών ισοδυναμεί περίπου με το 5-15% της μέγιστης εισερχόμενης ενέργειας από το ηλιοστατικό πεδίο στο δέκτη. Οι απώλειες αυτές δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν με ακρίβεια με τα διαθέσιμα μέσα, ωστόσο με βάση την ανάλυση

που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 5.2 προτείνεται η χρήση δέκτη κοιλότητας ώστε να περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατόν. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρούμε ότι οι το «άθροισμα» (στην πραγματικότητα πρόκειται για γινόμενο) των απωλειών αυτών ισούται με 10%, δηλαδή $\eta_{conv} \times \eta_{rad} = 0.9$.

- Απώλειες Απορρόφησης/Ανάκλασης : Για πεδία ηλιακού δέκτη κοιλότητας ορίστηκαν 2%, δηλαδή συντελεστής απωλειών διαρροής $\eta_{abs} = 0.98$ (βλέπε κεφάλαιο 5.2).
- Απώλειες Αγωγής : Οι απώλειες αγωγής είναι συνήθως κάτω από 1%, οπότε παραλείπονται στους υπολογισμούς.

Ξεχωριστά θα αναφερθούμε στις απώλειες συνημιτόνου, που ανήκουν στις απώλειες του πεδίου ηλιοστατών. Οι απώλειες αυτές, όπως ήδη αναφέραμε στο κεφάλαιο 5.2, αναφέρονται στο εμβαδόν της ανακλαστικής επιφάνειας του πεδίου που αξιοποιείται κάθε χρονική στιγμή σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν των εγκατεστημένων ηλιοστατών. Ωστόσο, οι απώλειες συνημιτόνου εξαρτώνται άμεσα από τη θέση του ηλίου και έτσι παρουσιάζουν έντονες μεταβολές όχι μόνο κατά τη διάρκεια ενός έτους, αλλά ακόμα και μέσα στην ίδια ημέρα. Ο συντελεστής των απωλειών συνημιτόνου έχει νόημα να υπολογιστεί μόνο σε ετήσια βάση. Αυτό απαιτεί υπολογισμό της ισχύς του πεδίου για κάθε ημέρα του έτους για όλες τις ώρες ηλιοφάνειας. Με μέσο όρο 7 ωρών ηλιοφάνειας ανά ημέρα στη Θίεβη αυτό θα απαιτούσε περίπου 2550 υπολογισμούς για κάθε πεδίο προκειμένου να υπολογισθεί ο συντελεστής απωλειών συνημιτόνου για το κάθε πεδίο. Για τα 36 πεδία που δημιουργήσαμε, όπως παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, θα απαιτούνταν δεκάδες χιλιάδες προσομοιώσεις, πράγμα αδύνατον στα περιορισμένα χρονικά όρια μιας διπλωματικής εργασίας.

Υπολογίζοντας την ισχύ που φτάνει στο δέκτη (Q_{rec}) για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, οι στιγμιαίες απώλειες συνημιτόνου περιλαμβάνονται στις απώλειες του πεδίου (η_{field}). Έτσι υπολογίζουμε αρχικά τις απώλειες του πεδίου ως εξής :

$$\eta_{field} = \frac{Q_{rec}}{N \times A_{hel} \times I \times \Gamma}$$

όπου

N : ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου,

A_{hel} : το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιοστάτη,

I : η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI),

Γ : συντελεστής που εκφράζει το ποσοστό των ηλιοστατών που είναι εστιασμένοι στον κεντρικό δέκτη (σε θέση λειτουργίας), και λαμβάνεται συνήθως ίσος με 1.

Γνωρίζοντας πλέον τις απώλειες του πεδίου ηλιοστατών μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή απωλειών συνημιτόνου του πεδίου για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή με τη βοήθεια της σχέσης :

$$\eta_{\cos} = \frac{\eta_{\text{field}}}{\eta_{\text{sh}} \times \eta_{\text{bl}} \times \eta_{\text{att}} \times \eta_{\text{refl}} \times \eta_{\text{spill}}}$$

Ωστόσο, ο στιγμιαίος συντελεστής απωλειών συνημιτόνου ως κριτήριο επιλογής ενός πεδίου ηλιοστατών μπορεί να είναι εντελώς παραπλανητικός και να οδηγήσει σε λανθασμένη επιλογή πεδίου. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε από ένα στέλεχος της CENER, που είχε ενεργό συμμετοχή στο λογισμικό Tonatiuh. Προκειμένου να μπορέσουμε να μελετήσουμε διαφορετικά πεδία μας συμβούλεψε αρχικά να επιλέξουμε μοντέλα ηλιοστατών με παρόμοιο εμβαδόν. Έτσι τα πεδία έχουν παρόμοια γεωμετρία, μπορούμε να θεωρήσουμε τις απώλειες συνημιτόνου σταθερές και να επικεντρωθούμε στην παραγόμενη ισχύ του πεδίου ως κριτήριο επιλογής. Αν επιλέγαμε μοντέλα ηλιοστατών με εντελώς διαφορετικές διαστάσεις, για παράδειγμα το ένα μοντέλο με διαστάσεις 10m x 12m (ΥxΠ) και το άλλο με διαστάσεις 3m x 4m, τότε θα αναμέναμε μεγάλη απόκλιση στον ετήσιο συντελεστή απωλειών συνημιτόνου που θα είχε όντως καθοριστική σημασία στον βαθμό απόδοσης του πεδίου και κατά συνέπεια και στην τελική επιλογή πεδίου.

Με βάση τα παραπάνω επιλέξαμε τη δημιουργία ηλιοστατικών πεδίων με τα εξής μοντέλα ηλιοστατών : 9m x 13m, 10m x 12m και 11m x 11m (ΥxΠ). Τα τρία αυτά μοντέλα ηλιοστατών έχουν εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας περίπου 120m² συμβαδίζοντας με τις πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα σχεδιασμού πεδίων ηλιοστατών, που υποδεικνύουν αυτό ως ιδανικό εμβαδόν για τους ηλιοστάτες, και ταυτόχρονα μας δίνουν τη δυνατότητα να μελετήσουμε την επίδραση της αναλογίας ύψους-πλάτους των διαστάσεων στην παραγόμενη ισχύ του πεδίου.

6.2.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Υπενθυμίζουμε ότι σημείο σχεδίασης για τις προσομοιώσεις είναι η διάμεσος του μήνα Ιουλίου, τοπική ώρα 12:30 και $DNI=656 \text{ W/m}^2$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν:

ΤΗΤ=165 [m]					
Διαστάσεις [m]	DR	Κάλυψη γης [m ²]	Πλήθος Ηλιοστατών	Συνολική Επιφάνεια Ηλιοστατων [m ²]	Αποδιδόμενη Θερμική Ισχύς [MW]
9x13	0	2004647	3280	383760	121.8
9x13	20	889583	1712	200304	79.6
9x13	40	552437	1046	122382	54.0
9x13	60	308995	590	69030	31.0
10x12	0	2004647	3280	393600	127.5
10x12	20	889583	1712	205440	82.8
10x12	40	552437	1046	125520	55.7
10x12	60	308995	590	70800	31.8
11x11	0	2004647	3280	396880	132.0
11x11	20	889583	1712	207152	85.2
11x11	40	552437	1046	126566	56.9
11x11	60	308995	590	71390	32.3

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα ηλιακών πεδίων για ύψος ηλιακού πύργου 145m

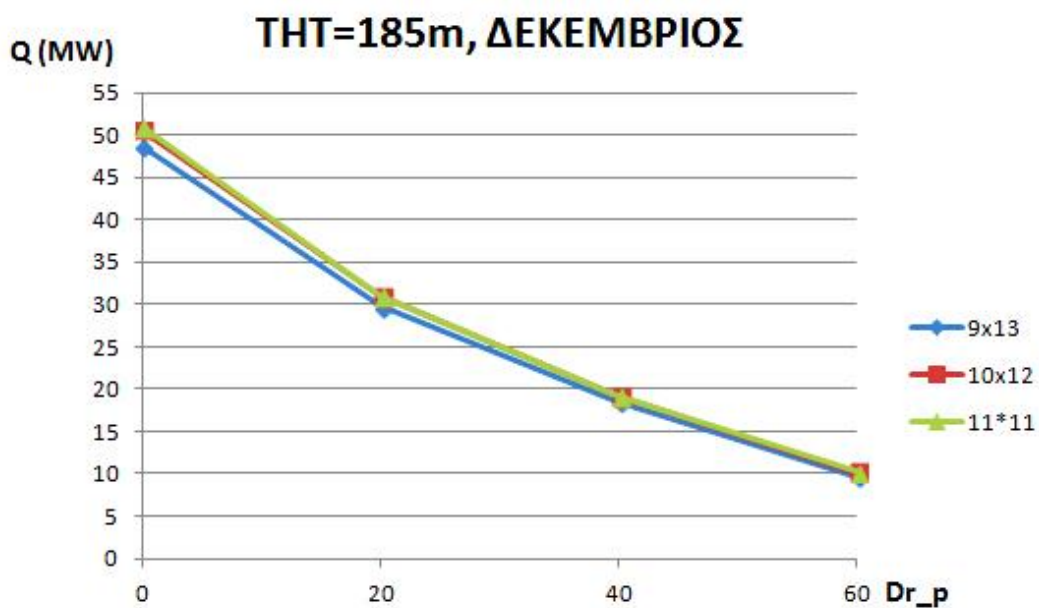
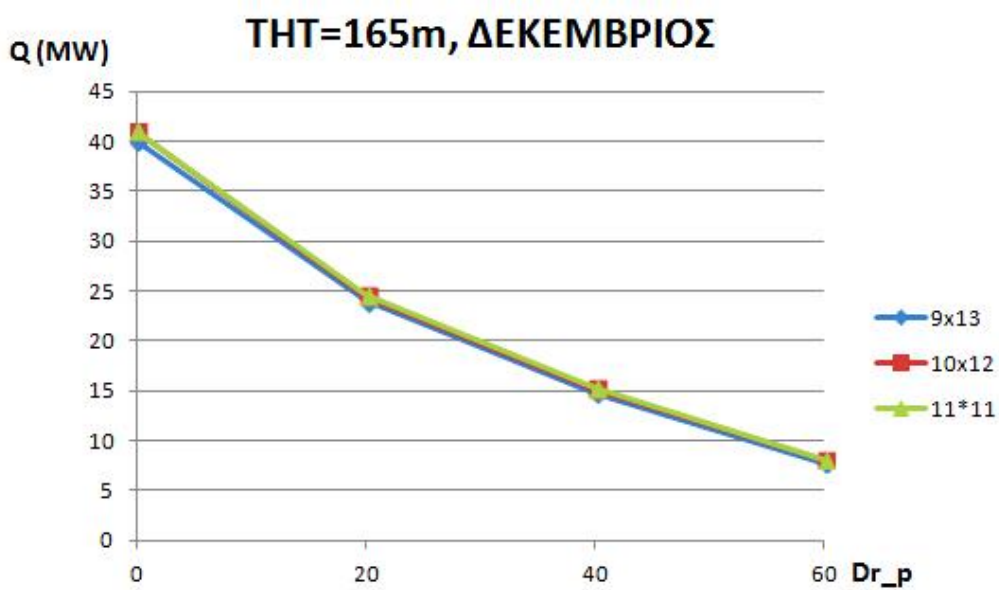
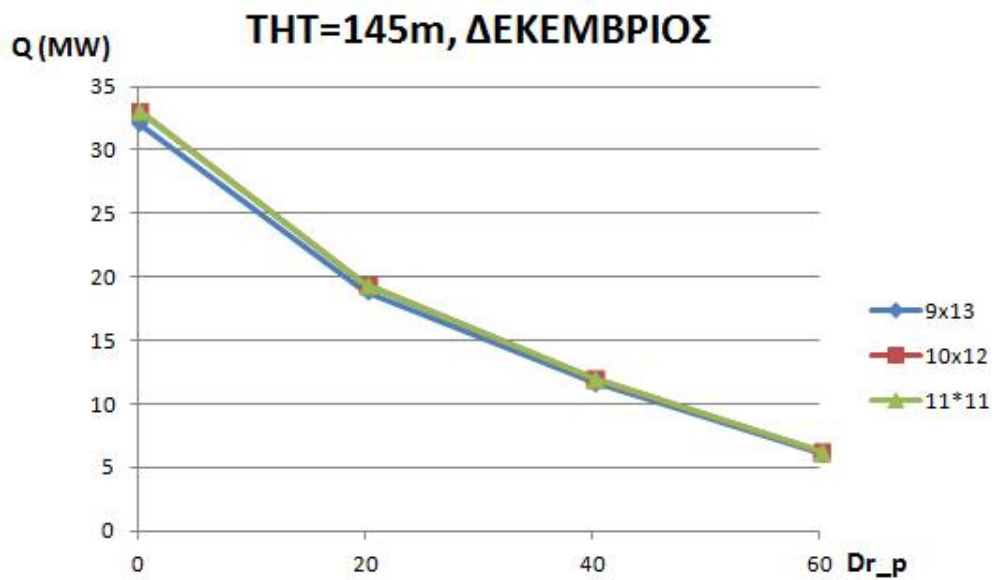
ΤΗΤ=165 [m]					
Διαστάσεις [m]	DR	Κάλυψη γης [m ²]	Πλήθος Ηλιοστατών	Συνολική Επιφάνεια Ηλιοστατων [m ²]	Αποδιδόμενη Θερμική Ισχύς [MW]
9x13	0	2004647	3280	383760	121.8
9x13	20	889583	1712	200304	79.6
9x13	40	552437	1046	122382	54.0
9x13	60	308995	590	69030	31.0
10x12	0	2004647	3280	393600	127.5
10x12	20	889583	1712	205440	82.8
10x12	40	552437	1046	125520	55.7
10x12	60	308995	590	70800	31.8
11x11	0	2004647	3280	396880	132.0
11x11	20	889583	1712	207152	85.2
11x11	40	552437	1046	126566	56.9
11x11	60	308995	590	71390	32.3

Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα ηλιακών πεδίων για ύψος ηλιακού πύργου 165m

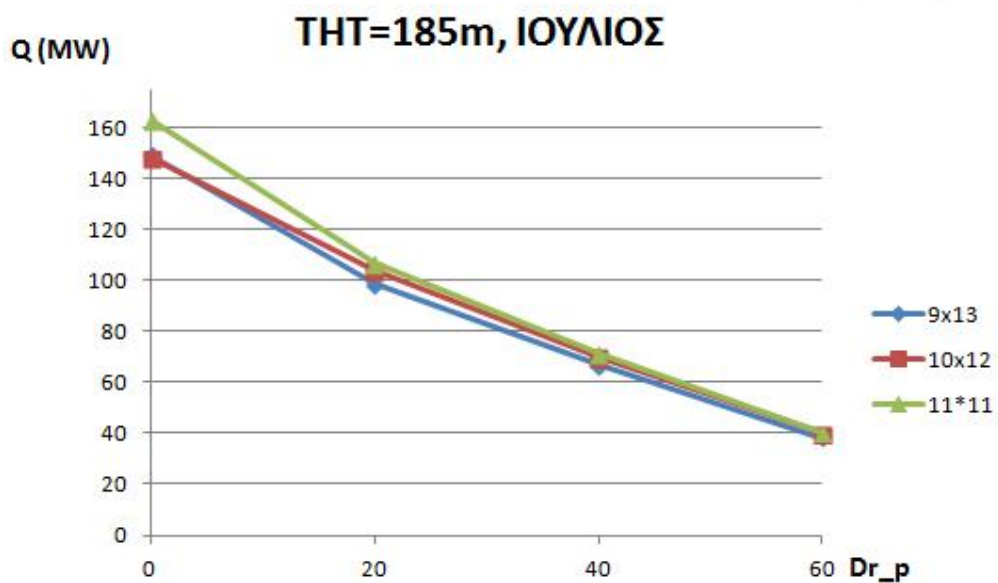
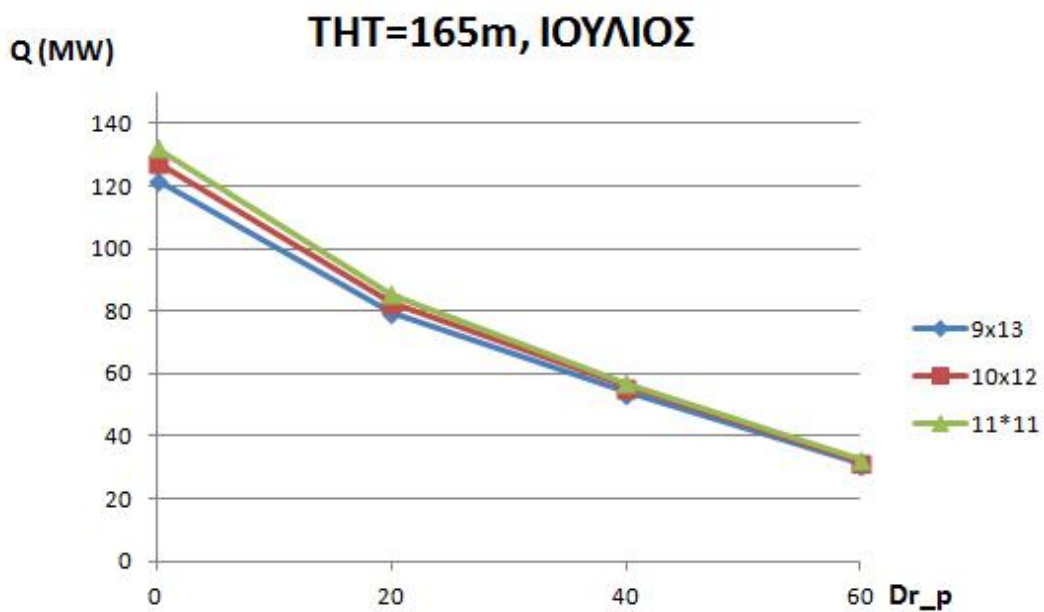
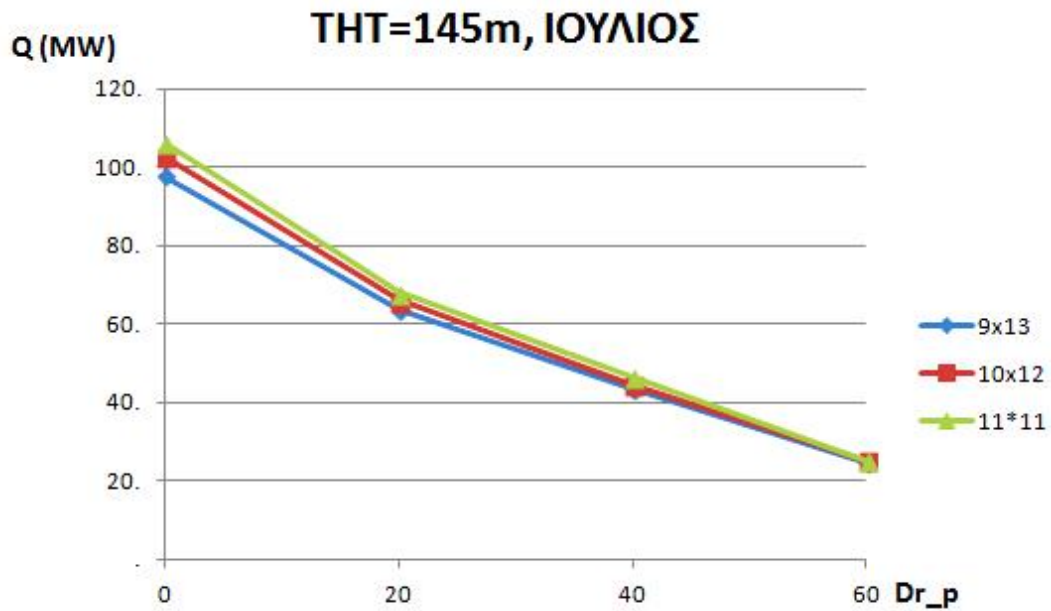
ΤΗΤ=185 [m]					
Διαστάσεις [m]	DR	Κάλυψη γης [m ²]	Πλήθος Ηλιοστατών	Συνολική Επιφάνεια Ηλιοστατων [m ²]	Αποδιδόμενη Θερμική Ισχύς [MW]
9x13	0	2518514	4161	486837	148.9
9x13	20	1118334	2193	256581	98.6
9x13	40	694668	1333	155961	66.9
9x13	60	388683	751	87867	38.4
10x12	0	2518514	4161	499320	148.1
10x12	20	1118334	2193	263160	103.9
10x12	40	694668	1333	159960	70.03
10x12	60	388683	751	90120	40.03
11x11	0	2518514	4161	503481	162.8
11x11	20	1118334	2193	265353	106.7
11x11	40	694668	1333	161293	71.3
11x11	60	388683	751	90871	40.6

Πίνακας 6.4. Αποτελέσματα ηλιακών πεδίων για ύψος ηλιακού πύργου 185m

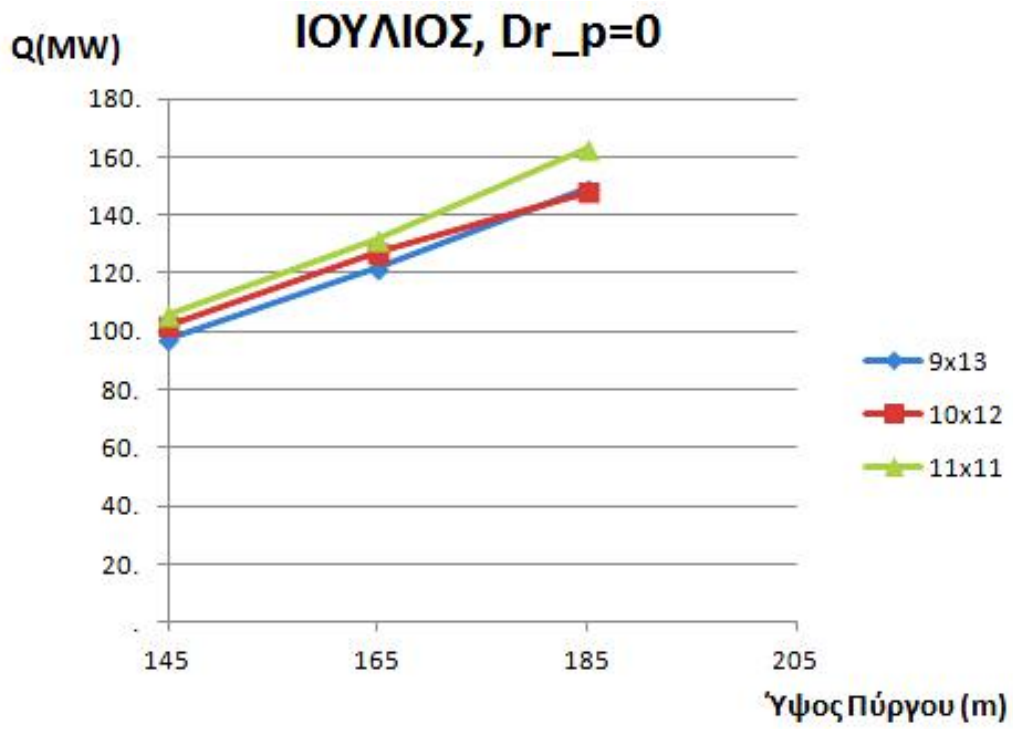
Σημείωση : Στο παράρτημα παρατίθενται πιο αναλυτικοί πίνακες με τα χαρακτηριστικά για το κάθε πεδίο που σχεδιάστηκε



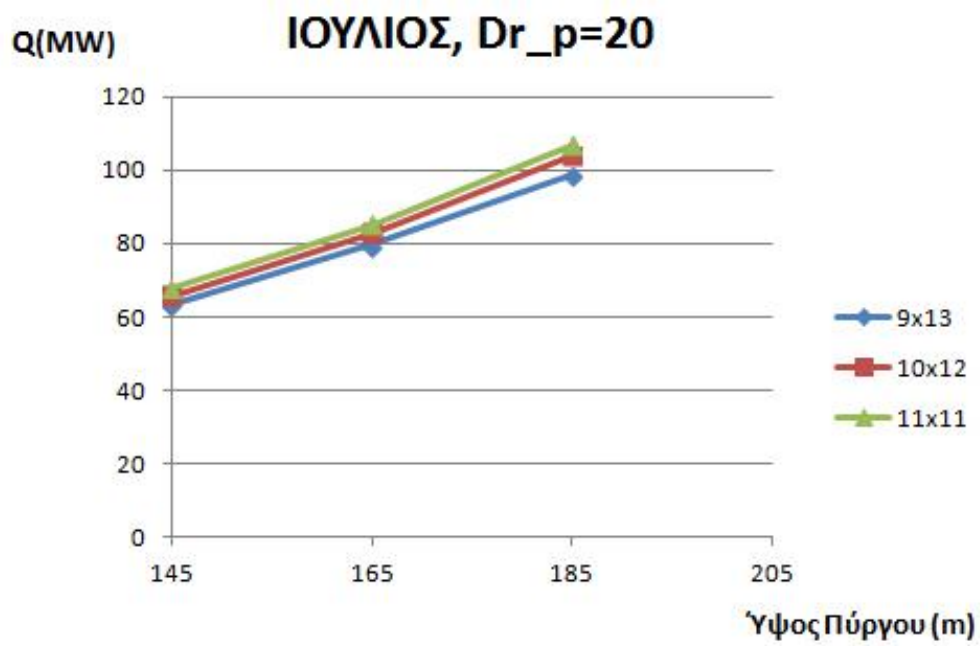
Σχήμα 6.3: Παραγόμενη ισχύς πεδίου για διαφορετική κλίση δέκτη και διαστάσεις ηλιοστατών στο σημείο σχεδιασμού για το μήνα Δεκέμβριο



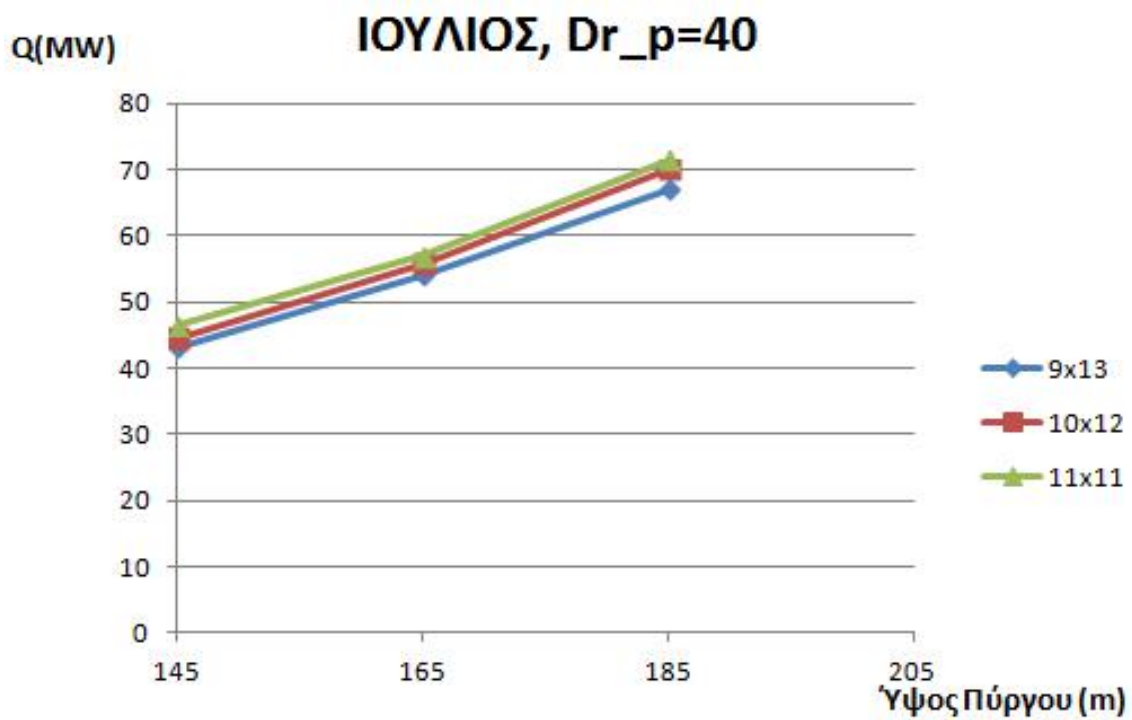
Σχήμα 6.3: Παραγόμενη ισχύς πεδίου για διαφορετική κλίση δέκτη και διαστάσεις ηλιοστατών στο σημείο σχεδιασμού για το μήνα Ιούλιο



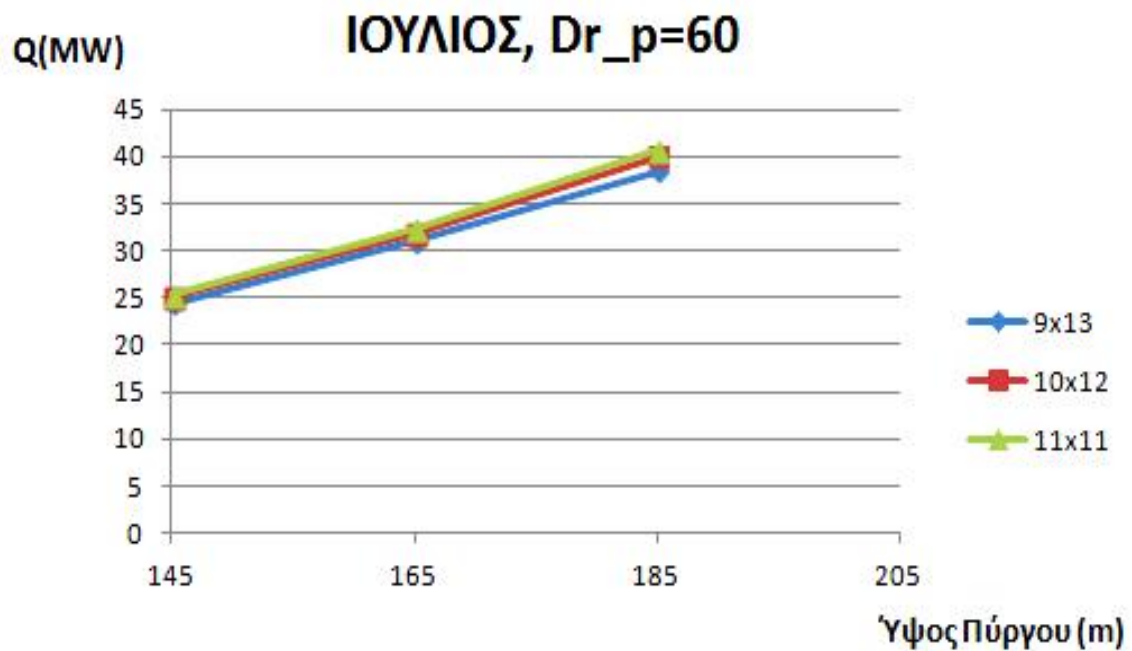
(α)



(β)



(γ)



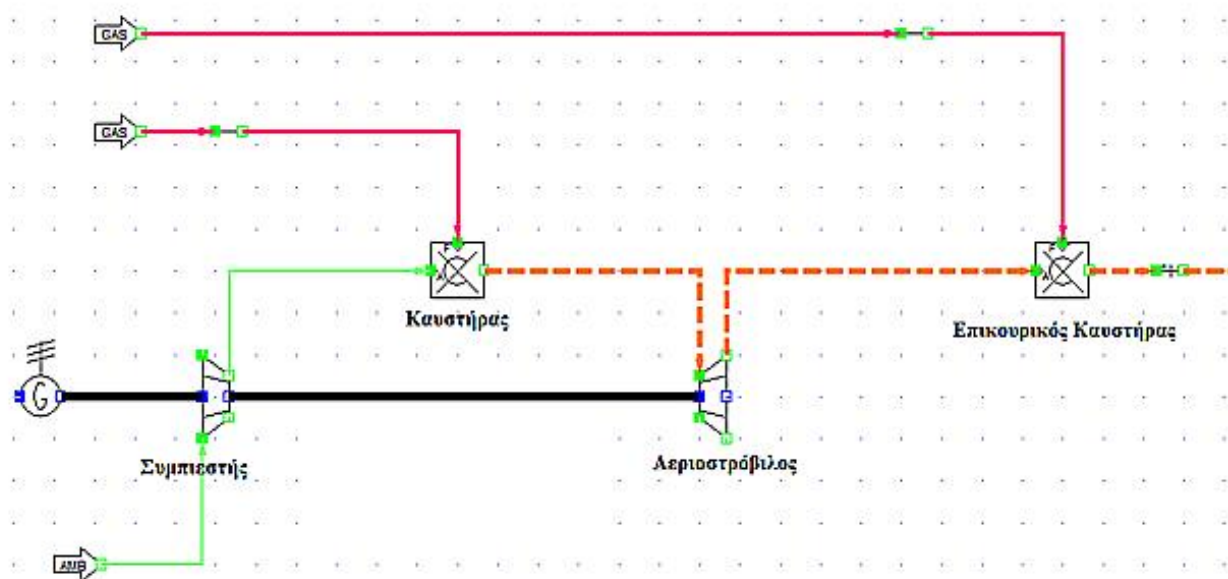
(δ)

Σχήμα 6.4 (α),(β),(γ),(δ) : Παραγόμενη ισχύς πεδίου για διαφορετικά ύψη πύργου και διαστάσεις ηλιοστατών στο σημείο σχεδιασμού για το μήνα Ιούλιο

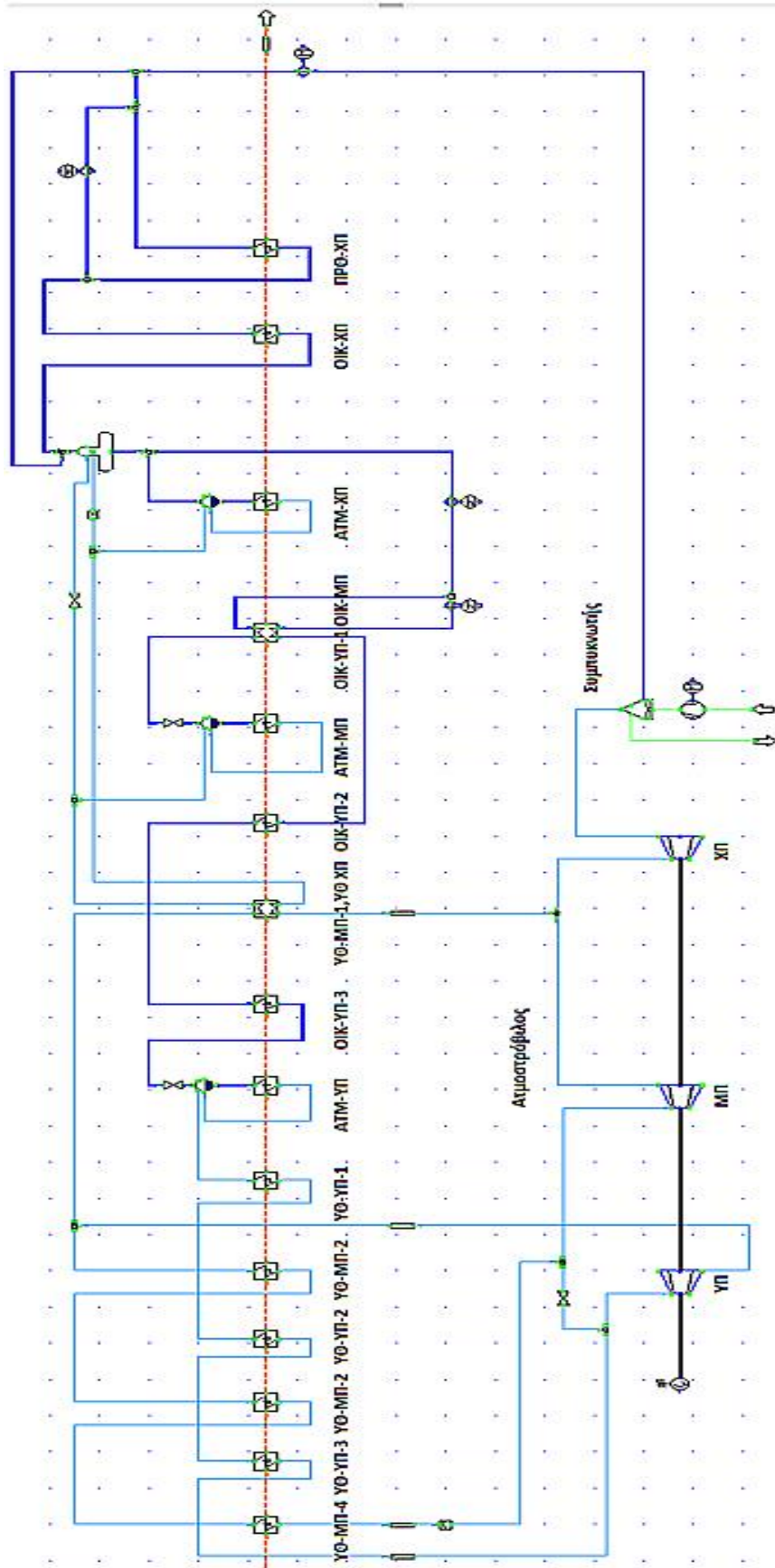
6.3 Περιγραφή μοντελοποίησης σταθμού

Για τη μοντελοποίηση του σταθμού της Θίσβης έγινε χρήση των λογισμικών IPSEpro και MDK. Το IPSEpro είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης της λειτουργίας κυκλωμάτων για ποίκιλα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής. Περιλαμβάνει σχεδόν όλα τα πιθανά υποσυστήματα που συναντάμε σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και είναι σε θέση να διεξάγει υπολογισμούς για τις θερμοδυναμικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε κάθε σημείο του κυκλώματος. Σε περίπτωση που κάποιο εξάρτημα δεν περιέχεται ήδη στο λογισμικό IPSEpro, έχει αναπτυχθεί η εφαρμογή MDK (Model Development Kit). Όπως υπονοεί η ονομασία του, το λογισμικό αυτό μας επιτρέπει να μοντελοποιήσουμε νέα εξαρτήματα και να τα χρησιμοποιήσουμε στο λογισμικό IPSEpro.

Ο σταθμός συνδυασμένου κύκλου της Θίσβης μοντελοποιήθηκε μέσω του λογισμικού IPSEpro κατόπιν συνεργασίας της εταιρείας Elpedison Power και του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων & Λεβήτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στα σχήματα 6.5 και 6.6 παρουσιάζεται ο μοντελοποιημένος σταθμός ενώ στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού. Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα αποτελέσματα από τη μελέτη υβριδοποίησης του σταθμού, όπως παρουσιάστηκαν στο συνέδριο «Ecos 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems».



Σχήμα 6.5. Συμπιεστής, Καυστήρας, Λεριοστρόβιλος, Επικουρικός Καυστήρας



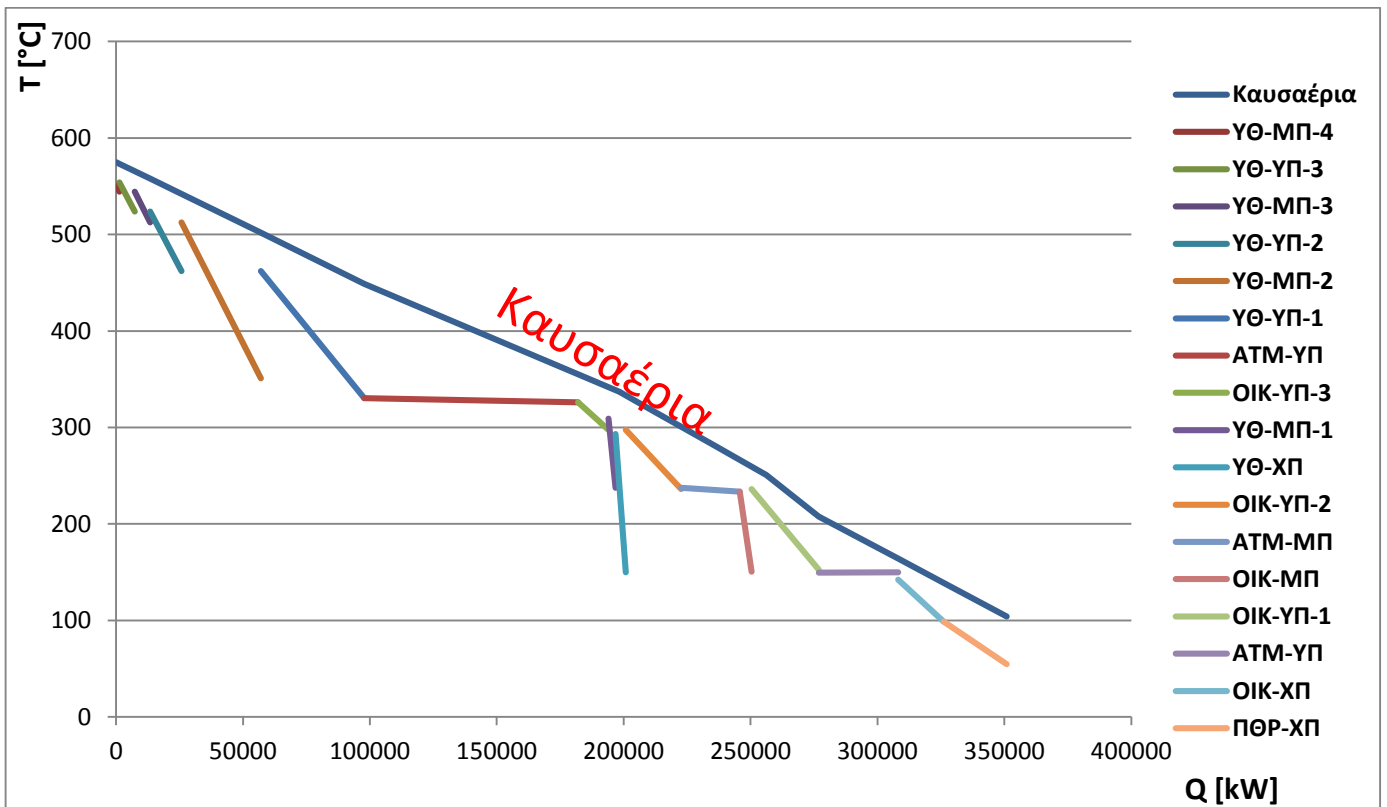
Σχήμα 6.6. Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας

Στοιχεία	Τιμές	Μονάδες
Ολόκληρος ο σταθμός		
Ονομαστική Πίεση Περιβάλλοντος	1	bar
Ονομαστική Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	15	°C
Αεριοστρόβιλος	1	-
Λ.Α.Θ.	1	-
Ατμοστρόβιλος	1	-
Επικουρικός Καυστήρας	Ναι	-
Ψύξη	Ξηρή	-
Συνολική Ισχύς	407.3	MWe
Ολική Απόδοση	57.93	%
Αεριοστρόβιλος		
Ονομαστική Ισχύς	275.2	MWe
Ονομαστική Απόδοση	39.14	%
Θερμοκρασία Εξόδου	1375	°C
Λόγος Συμπύεσης	33.92	%
Ατμοστρόβιλος		
Ονομαστική Ισχύς	132	MWe
Ονομαστική Απόδοση Κύκλου	18.79	%
Παροχή Μάζας ΥΠ	71.8	kg/s
Θερμοκρασία Εισόδου ΥΠ	550.89	°C
Πίεση Εισόδου ΥΠ	119.35	Bar
Θερμοκρασία Εξόδου ΥΠ	359.74	°C
Πίεση Εξόδου ΥΠ	32.53	bar
Παροχή Μάζας ΜΠ	84.63	kg/s
Θερμοκρασία Εισόδου ΜΠ	547.93	°C
Πίεση Εισόδου ΜΠ	29.35	bar
Θερμοκρασία Εξόδου ΜΠ	280.15	°C
Πίεση Εξόδου ΜΠ	4.04	bar
Παροχή Μάζας ΧΠ	97.84	kg/s
Θερμοκρασία Εισόδου ΧΠ	281.67	°C
Πίεση Εισόδου ΧΠ	4.04	bar
Θερμοκρασία Εξόδου ΧΠ	39	°C
Πίεση Εξόδου ΧΠ	0.07	bar
ΛΑΘ		
Παροχή Μάζας Καυσαερίων	669.6	kg/s
Θερμοκρασία Εισόδου Καυσαερίων	574.98	°C
Θερμοκρασία Εξόδου Καυσαερίων	103.94	°C

Πίνακας 6.5: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Μοντελοποιημένου Σταθμού Θίσβης

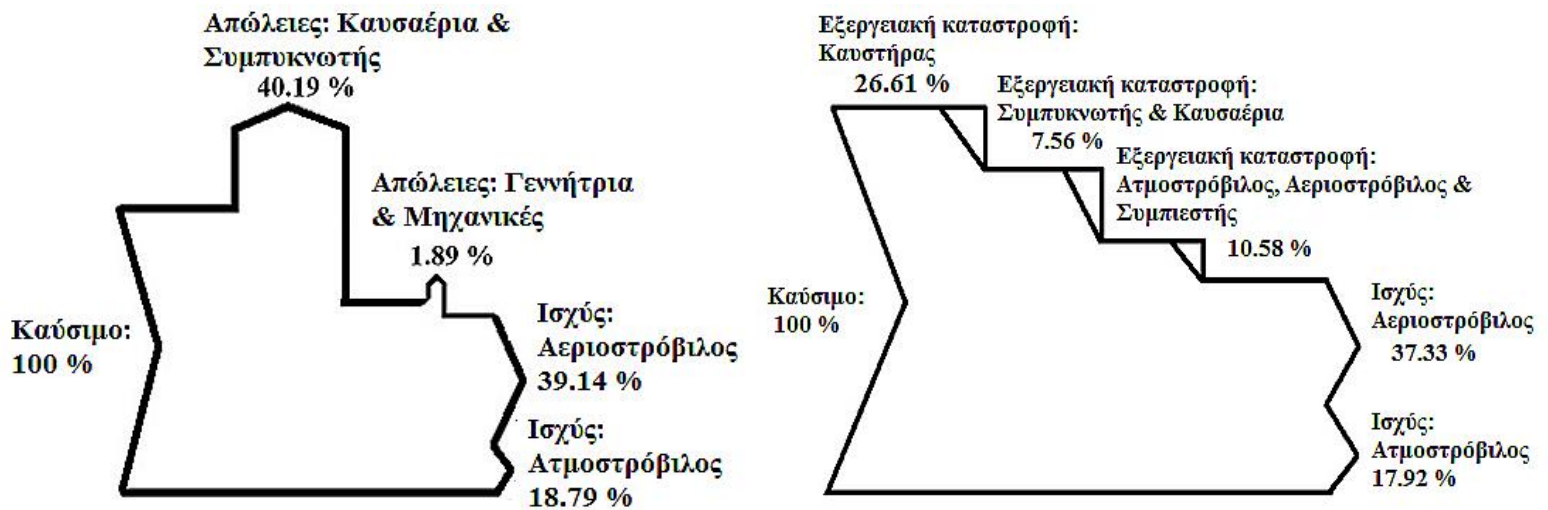
6.3.1 Παρούσα Κατάσταση Σταθμού

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα Q-T, Sankey και Grassman της υπάρχουσας κατάστασης του σταθμού στη Θίβση. Το διάγραμμα Q-T παρουσιάζει την ενέργεια των καυσαερίων στα διάφορα επίπεδα των θερμοκρασιών και ταυτόχρονα μας δίνει μια αρχική εκτίμηση για το βαθμό της αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας από το κύκλωμα νερού το οποίο εκπροσωπείται από τους εναλλάκτες.



Σχήμα 6.7. Διάγραμμα Q-T της υπάρχουσας κατάστασης

Ακολουθούν τα διαγράμματα Sankey και Grassmann. Το πρώτο παρουσιάζει τη ροή της ενέργειας και τις απώλειες του σταθμού, ενώ το δεύτερο δείχνει τα σημεία της εξεργειακής καταστροφής. Εξέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος είναι το μέγιστο θεωρητικά ωφέλιμο έργο που λαμβάνεται όταν το σύστημα έρχεται σε πλήρη θερμοδυναμική ισορροπία με το θερμοδυναμικό περιβάλλον, ενώ το σύστημα αλληλεπιδρά με μόνο αυτό το περιβάλλον.



Σχήμα 6.8. (α) Διάγραμμα Sankey, (β) Διάγραμμα Grassmann

6.3.2 Σενάριο υποκατάστασης Εναλλακτών

Η μελέτη υβριδοποίησης αφορά τη δυνατότητα υποκατάστασης ορισμένων εναλλακτών του κυκλώματος και ενσωμάτωση του συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη σε διαφορετικά σημεία του κυκλώματος. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις υποκατάστασης εναλλακτών οι οποίες είναι:

1. ΥΘ-ΥΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ
2. ΥΘ-ΜΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ
3. ΥΘ-ΥΠ-1 και ΥΘ-ΜΠ-1

Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας επιλέχθηκε το τηγμένο άλας (60% NaNO_3 -40% KNO_3) με εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας 250-450°C, το οποίο εξασφαλίζει ότι το άλας θα βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση και δεν υπάρχει κίνδυνος αποσύνθεσης του ή χημικής προσβολής των δικτύων μεταφοράς.

Σκοπός είναι η έξοδος των καυσαερίων να γίνεται στην ελαχίστη δυνατή θερμοκρασία (κάτω από 110°C), καθώς έτσι μεγιστοποιείται η αξιοποίηση της θερμότητας που περιέχουν και εξοικονομούμε ενέργεια. Ωστόσο, με το σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με έμμεσο τρόπο (με χρήση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας) και δεδομένου ότι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων πρέπει να κινείται σε συγκεκριμένα επίπεδα, παρατηρείται πτώση της ισχύος του αεροστροβίλου. Με τον ατμοστρόβιλο να μην μπορεί να παράγει μεγαλύτερη ισχύ από την ονομαστική του, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η παραγόμενη ισχύς μετά την υβριδοποίηση δεν θα φτάνει στα επίπεδα της υπάρχουσας διαμόρφωσης. Τα προσδοκώμενα οφέλη από την υβριδοποίηση επικεντρώνονται στην εξοικονόμηση καυσίμου και στη μείωση των εκπομπών CO_2 .

Έτσι υπολογίστηκε η «Πράσινη» MWh η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό της ενέργειας του ηλιακού σταθμού η οποία εισάγεται στο σταθμό του Συνδυασμένου Κύκλου,

αν εκτονωνόταν κατευθείαν στο ατμοστρόβιλο, λαμβάνοντας υπόψη τους βαθμούς απόδοσης του ατμοστρόβιλου και της γεννήτριας.

6.3.2.1 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας

Για το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας θα γίνει και πάλι χρήση του τηγμένου άλατος, ενώ η διαστασιολόγηση του συστήματος θα γίνει με βάση το σημείο σχεδιασμού για το καλοκαίρι, αφού εκείνη την περίοδο θα έχουμε και τα μεγαλύτερα οφέλη από άποψη DNI και ωρών ηλιοφάνειας. Ακόμα έγινε η θεώρηση ότι το σύστημα αποθήκευσης θα φορτίζεται και θα εκφορτίζεται με βάση το ονομαστικό φορτίο του ηλιακού σταθμού, δηλαδή αν διαθέτουμε φορτίο για κάλυψη θερμικού φορτίου 3hr, αυτό το φορτίο θα είναι το ονομαστικό φορτίο του σταθμού για τις 3hr αδιάλειπτης λειτουργίας. Όμως υπάρχουν μήνες που η μέση τιμή των ωρών ηλιοφάνειας κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (3-4 hr), για αυτό το λόγο υπολογίστηκε και ο αριθμός των ωρών συνεχόμενης λειτουργίας που το σύστημα μας θα μπορούσε να καλύψει σε ονομαστικό φορτίο.

Στο συγκεκριμένο σενάριο εφαρμόστηκαν οι εξής περιπτώσεις αποθήκευσης:

1. Χωρίς αποθήκευση
2. 3 hr αποθήκευση
3. 6 hr αποθήκευση
4. 9 hr αποθήκευση
5. 12 hr αποθήκευση

6.3.2.2 Αποτελέσματα Οικονομοτεχνικής μελέτης

Η θερμική ισχύς των συστημάτων φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Ενώ τα πεδία τα οποία επιλέχθηκαν για την κάλυψη του φορτίου είναι εκείνα τα οποία έχουν θερμική ισχύ ίση ή μεγαλύτερη του συστήματος, επιλέγοντας πάντα εκείνο του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι πλησιέστερα στο σύστημα έχοντας παράλληλα και το μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

Συνολική Ισχύς (MWth)					
Παρέμβαση	Χωρίς Αποθήκευση	3hr	6hr	9hr	12hr
ΥΠ-ΧΠ	46,35	58,99	71,63	84,28	96,92
ΜΠ-ΧΠ	29,66	37,75	45,83	53,92	62,01
ΥΠ-ΜΠ	61,07	77,72	94,37	111,02	127,68

Πίνακας 6.6. Απαιτούμενη θερμική ισχύς για την κάλυψη του συστήματος αποθήκευσης

Τα ηλιοστατικά πεδία τα οποία ανταποκρίνονται στις ανάγκες μας , όσον αφορά τα σενάρια χωρίς εφαρμογή αποθήκευσης είναι τα παρακάτω:

- Πύργος 145m, κλίση ηλιακού δέκτη 40°, διαστάσεις ηλιοστάτη 11x11, παραγωγή 46,420 MW (ΥΘ-ΥΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ)
- Πύργος 165m, κλίση ηλιακού δέκτη 60°, διαστάσεις ηλιοστάτη 9x13, παραγωγή 31,063 MW (ΥΘ-ΜΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ)
- Πύργος 145m, κλίση ηλιακού δέκτη 20°, διαστάσεις ηλιοστάτη 9x13, παραγωγή 63,393 MW (ΥΘ-ΥΠ-1 και ΥΘ-ΜΠ-1)

Η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του σταθμού ISCC σε κάθε περίπτωση, συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες :

Διαμόρφωση	Ενεργειακή Απόδοση
Υπάρχουσα	57,93%
ΥΠ-ΧΠ καλοκαιρινή περίοδος	56,40%
ΥΠ-ΧΠ χειμερινή περίοδος	57,56%
ΜΠ-ΧΠ καλοκαιρινή περίοδος	57,03%
ΜΠ-ΧΠ χειμερινή περίοδος	57,71%
ΥΠ-ΜΠ καλοκαιρινή περίοδος	55,68%
ΥΠ-ΜΠ χειμερινή περίοδος	57,26%

Πίνακας 6.7(α). Ενεργειακή απόδοση σταθμού Θίσβης

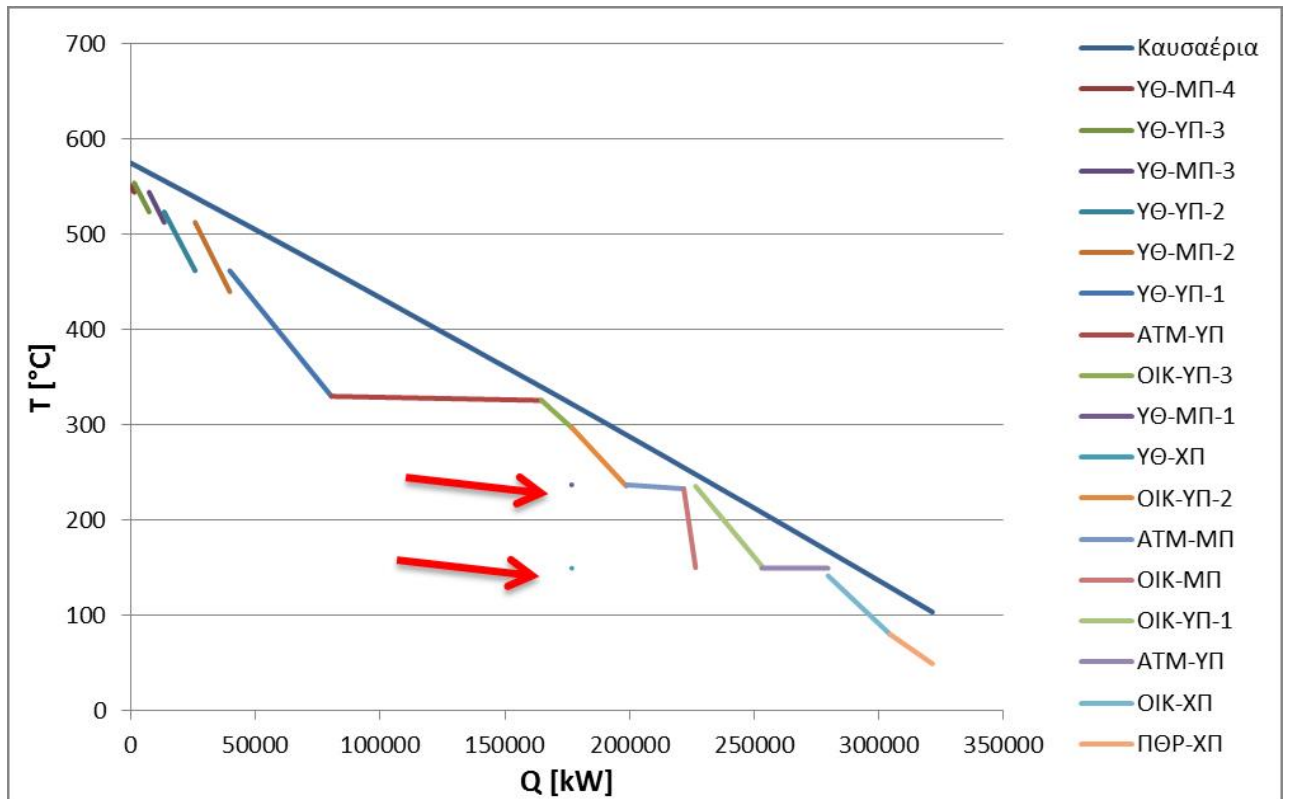
Διαμόρφωση	Εξεργειακή Απόδοση
Υπάρχουσα	55,25%
ΥΠ-ΧΠ καλοκαιρινή περίοδος	56,72%
ΥΠ-ΧΠ χειμερινή περίοδος	55,39%
ΜΠ-ΧΠ καλοκαιρινή περίοδος	56,20%
ΜΠ-ΧΠ χειμερινή περίοδος	55,46%
ΥΠ-ΜΠ καλοκαιρινή περίοδος	56,86%
ΥΠ-ΜΠ χειμερινή περίοδος	55,32%

Πίνακας 6.7(β). Εξεργειακή απόδοση σταθμού Θίσβης

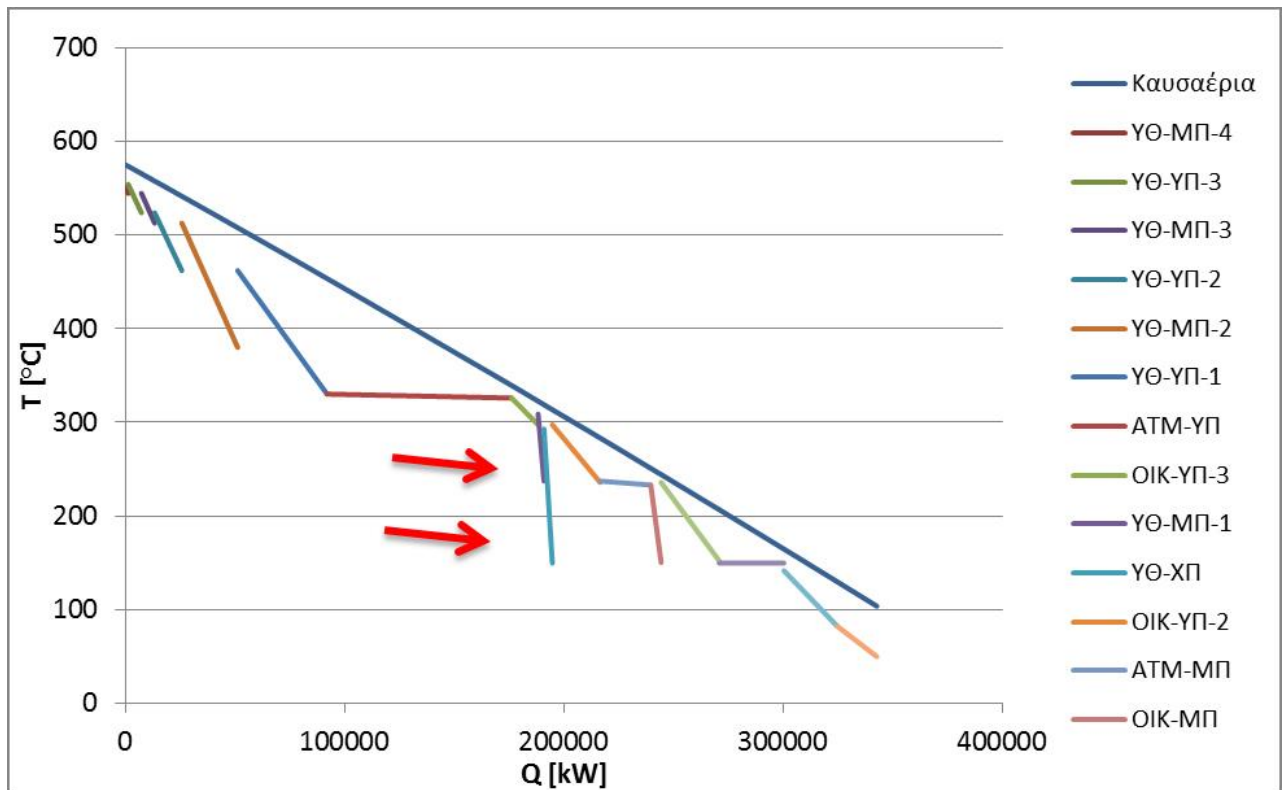
Στον Πίνακα 6.7(α) παρατηρούμε ότι η υπάρχουσα διαμόρφωση έχει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, οι τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις προσεγγίζουν αυτό το αποτέλεσμα, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού υπάρχει μια μικρή μείωση. Αυτά τα αποτελέσματα είναι αρκετά αναμενόμενα, διότι κατά την περίοδο του καλοκαιριού υπάρχει μεγαλύτερη παροχή ρεύματος από το σύστημα ηλιακού πύργου, λιγότερη κατανάλωση καυσίμων από ότι το χειμώνα και η καθαρή ισχύς από τον αεροστροβίλο είναι η ίδια και στις δύο περιόδους. Σημειώνεται, ότι υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ισχύος του αεροστροβίλου και της κατανάλωσης καυσίμου. Αντίθετα, ο πίνακας 6.7(β) δείχνει ότι η διαμόρφωση της ΥΠ-ΜΠ είναι αυτή που διαθέτει την υψηλότερη και την χαμηλότερη αποδοτικότητα εξέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του χειμώνα αντίστοιχα. Προφανώς κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η

απόδοση είναι σταθερά υψηλότερη από το χειμώνα, σε κάθε περίπτωση, έτσι για χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου η εξεργειακή καταστροφή είναι επίσης χαμηλότερη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η υποκατάσταση εναλλακτών της δεύτερης περίπτωσης (ΥΘ-ΜΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ), η οποία παρουσιάστηκε και στο συνέδριο. Τα σχήματα 6.8(α) και 6.8(β) απεικονίζουν τα νέα διαγράμματα Q-T τόσο για την καλοκαιρινή όσο και για τη χειμερινή περίοδο.



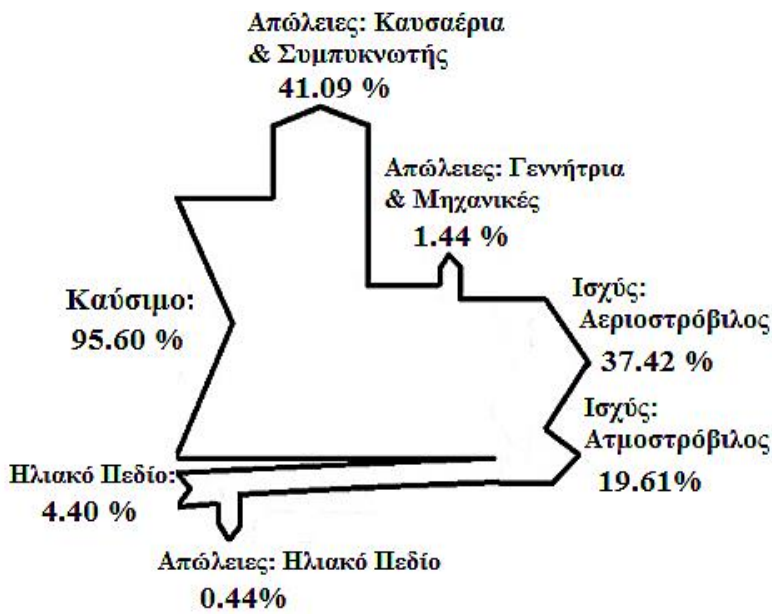
Σχήμα 6.8(α). Διάγραμμα Q-T καλοκαιρινής περιόδου (υποκατάσταση των εναλλακτών ΥΘ-ΜΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ)



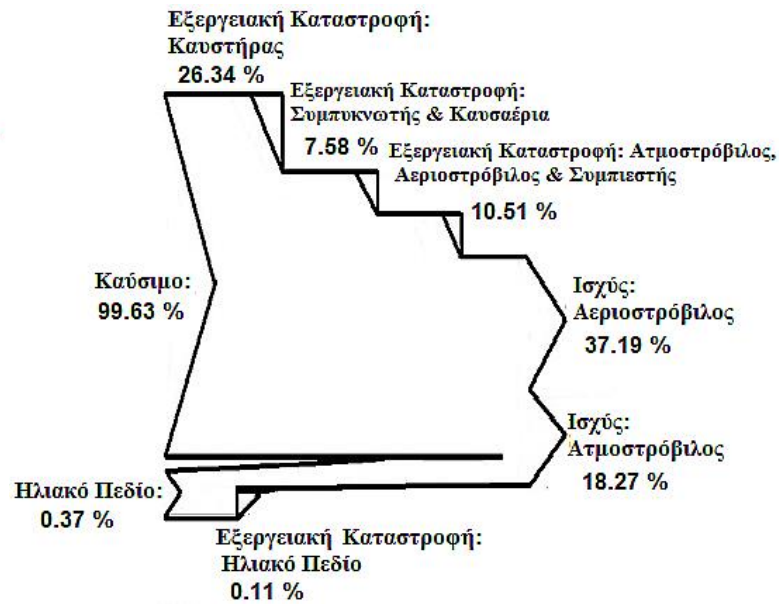
Σχήμα 6.8(β). Διάγραμμα Q-T χειμερινής περιόδου

Στα παραπάνω Q-T διαγράμματα σημειώνονται οι εναλλάκτες οι οποίοι υποκαταστάθηκαν. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη των καυσαερίων είναι πιο απότομη σε σχέση με την υπάρχουσα περίπτωση. Στα σχήματα 6.8(α) και 6.8(β) εύκολα παρατηρεί κανείς ότι οι δύο εναλλάκτες θερμότητας που έχουν υποκατασταθεί πλήρως ή μερικώς, σε αυτές τις δύο περιόδους, είναι ο ΥΘ-ΜΠ-1 και ο ΥΘ-ΧΠ. Είναι επίσης προφανές ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η συνεισφορά του ηλιακού πεδίου είναι αμελητέα και ως εκ τούτου ο εναλλάκτης θερμότητας ΥΘ-ΜΠ-1 λειτουργεί όπως πριν από την ηλιακή υβριδοποίηση. Επιπρόσθετα και οι δύο καμπύλες θερμότητας καυσαερίων είναι πιο απότομες από την υπάρχουσα (σχήμα 6.7) λόγω της μείωσης του καταναλισκόμενου καυσίμου και της ηλιακής θερμικής απολαβής. Το διάγραμμα Q-T απεικονίζει επίσης την αξιοποίηση της ενέργειας και εξέργειας των καυσαερίων από τον ΛΑΘ και τον σταθμό.

Ακολουθούν τα διαγράμματα Sankey και Grassmann για την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο. Τα σχήματα αυτά δείχνουν ότι υπάρχει μια διαφορά 3% στην ενίσχυση του συντελεστή ισχύος από το ηλιακό πεδίο μεταξύ αυτών των δύο περιόδων, ενώ τα ποσοστά παραγωγής ισχύς παραμένουν σχεδόν ίσα. Παρατηρούμε ότι η εξεργειακή καταστροφή του πεδίου το χειμώνα μικραίνει σημαντικά σε σχέση με του καλοκαιριού.



Σχήμα 6.9. Διάγραμμα Sankey : (α) για θερινή περίοδο, (β) για χειμερινή περίοδο

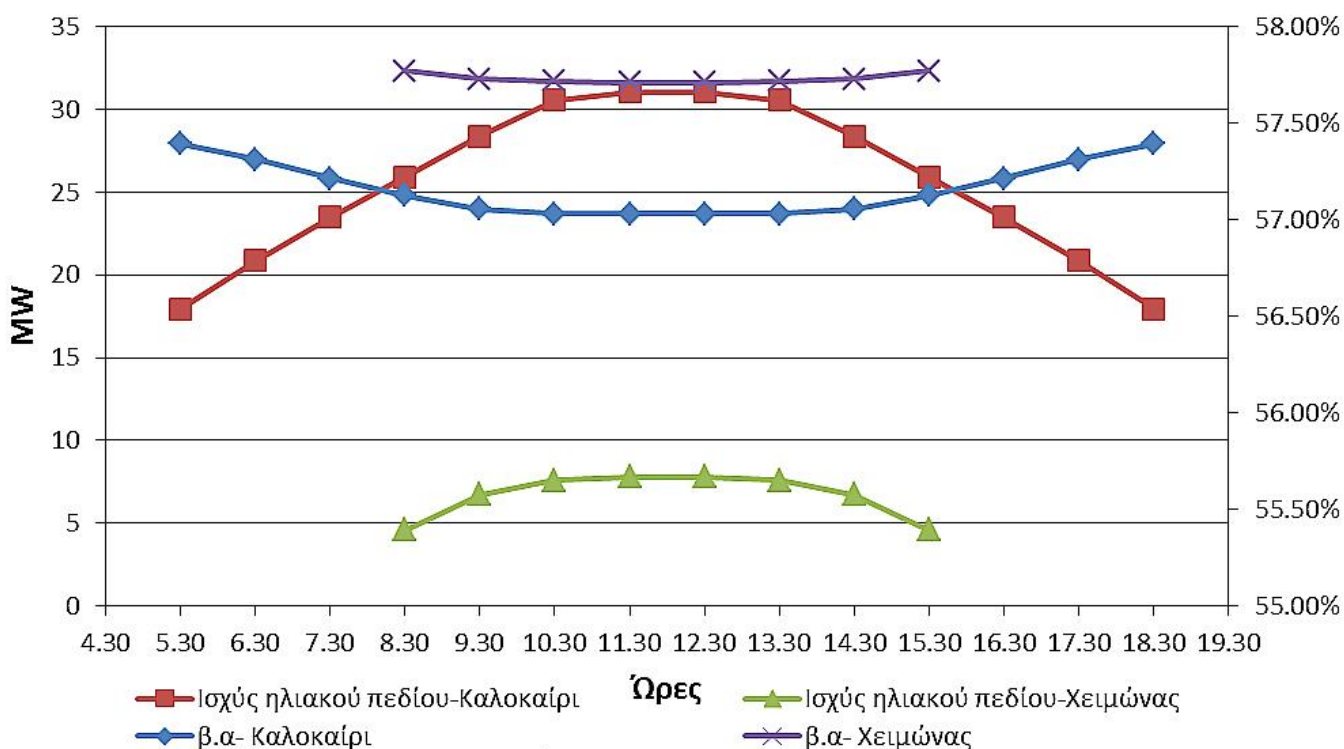


Σχήμα 6.10. Διάγραμμα Grassmann : (α) για θερινή περίοδο, (β) για χειμερινή περίοδο

Υποσύστημα	Εξεργειακή καταστροφή- Καλοκαιρινή περίοδος	Εξεργειακή καταστροφή- Χειμερινή περίοδος
Αεριοστρόβιλος	6,34%	6,32%
Συμπιεστής	2,97%	2,96%
Ατμοστρόβιλος	1,32%	1,25%
Συμπυκνωτής	2,42%	2,30%
Καυσαέρια	4,20%	5,37%

Πίνακας 6.8. Εξεργειακή ανάλυση για τα υποσυστήματα του σταθμού

Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η ημερήσια συνεισφορά ισχύος του συστήματος ηλιακού πύργου στον σταθμό για τις δύο ημέρες που έχουμε επιλέξει ως σημεία σχεδιασμού και ο βαθμός απόδοσης του σταθμού για τις αντίστοιχες ώρες.



Σχήμα 6.11. Συνεισφορά του ηλιακού πεδίου και βαθμός απόδοσης του συστήματος τις αντίστοιχες ώρες

Όσον αφορά την περίπτωση που παρουσιάζεται, στον πίνακα 6.8 παρατηρείται η ύπαρξη σημαντικής διαφοράς στην καταστροφή εξέργειας λόγω των καυσαερίων (4,20% κατά την περίοδο του καλοκαιριού, ενώ 5,37% κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου). Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο καυστήρας του αεριοστρόβιλου αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών εξέργειας με 26.34% και 26.22% για την καλοκαιρινή και τη χειμερινή περίοδο αντίστοιχα, γεγονός που εκτιμήθηκε επίσης σε άλλες παρόμοιες μελέτες [1] [2]. Από την

άλλη πλευρά, η παραγωγή εξέργειας από το ηλιακό πεδίο είναι 1,22% το καλοκαίρι (για τη συνολική εξέργεια), αλλά μειώνεται σε 0,37% το χειμώνα. Αυτό το κενό πληρούται με την κατανάλωση φυσικού αερίου. Τέλος, υπάρχει μια ενδιαφέρουσα εναλλαγή στο ποσοστό της παραγωγής ισχύος του αεροστροβίλου και του ατμοστροβίλου. Πιο συγκεκριμένα, το καλοκαίρι το ποσοστό παραγωγής ισχύος του ατμοστροβίλου είναι μεγαλύτερο από το χειμώνα, ενώ το αντίθετο παρατηρείται για την παραγωγής ισχύος του αεροστροβίλου .

Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζεται η αξιολόγηση της επενδύσεων και για τα τρία πιθανά σενάρια υβριδοποίησης. Για αυτό το λόγο υπολογιστήκαν οι ακόλουθοι οικονομικοί δείκτες: Καθαρή Ταμειακή Ροή (KTP-Present Value), Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ-Net Present Value), Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (EBA-Internal Rate of Return), Έντοκη περίοδος αποπληρωμής (Discounted Payback Period), Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΚΗΕ-Levelised Electricity Cost- L.E.C) [3] και το ύψος πώλησης της MWh για την έντοκη αποπληρωμή της επένδυσης στα ακριβώς 5 έτη.

Για την υφιστάμενη διαμόρφωση θεωρήσαμε 4000 ώρες λειτουργίας ανά έτος, ενώ οι τρεις νέες διαμορφώσεις που λειτουργούν κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας και TES ως ένα υβριδικό σύστημα και το υπόλοιπο του έτους, ως ένας συμβατικός σταθμός Συνδυασμένου Κύκλου. Παρ 'όλα αυτά, υπήρξαν περιπτώσεις, όπου ο χρόνος λειτουργίας ξεπέρασε τις 4000 ώρες λειτουργίας ανά έτος, λόγω του συστήματος αποθήκευσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο συνολικός χρόνο λειτουργίας, για κάθε παρέμβαση, ήταν αυτός που συγκεντρώθηκε από τις ώρες ηλιοφάνειας και το σύστημα αποθήκευσης.

Επίσης έγινε η παραδοχή ότι η χρηματοδότηση ήταν 100% ιδίων κεφαλαίων και το επιτόκιο αναγωγής 9%. Η τιμή πώλησης για τη συμβατική ισχύ λήφθηκε 60€/MWh [4], ενώ η τιμή πώλησης της «πράσινης» MWh ελήφθη ως σταθερή 284,85€/MWh για την ενέργεια που παράγεται από το ηλιακό θερμικό σύστημα αν υπάρχει σύστημα αποθήκευσης με ισχύ που να καλύπτει 2 ώρες φορτίου και 264,85€/MWh χωρίς σύστημα αποθήκευσης [5]. Τέλος, το κόστος του φυσικού αερίου θεωρήθηκε 0,04€ /kWh [6] και το κόστος του CO₂ 7,5€ /tn [7]. Το κόστος των συνιστωσών της επένδυσης παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα :

Συνιστώσα επένδυσης	Κόστος
Ηλιοστάτες	110€/m ²
Χρήση Γης	5€/m ²
Ηλιακό άλας	1€/kg
Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας	36€/kWh
Κόστη λειτουργίας και συντήρησης	1.5 % Αρχικού κόστους εγκατάστασης

Πίνακας 6.9. Κοστολόγηση επιμέρους συνιστωσών του ηλιακού πεδίου [8],[9],[10],[11]

Για τον υπολογισμό του κόστους του ηλιακού πύργου και του δέκτη χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις [12] :

$$I_{Tow} = I_{Tow}^0 \times \left(\frac{H_{Tow}}{H_{Tow}^0}\right)^{S_{Tow}} \times (pr_{Tow})^{\log_2 \frac{V_{Tow}}{V_{Tow}^0}} \times pi_{Tow} \quad (6.1)$$

$$I_{Rec} = I_{Rec}^0 \times \left(\frac{A_{Rec}}{A_{Rec}^0}\right)^{S_{Rec}} \times (pr_{Rec})^{\log_2 \frac{V_{Rec}}{V_{Rec}^0}} \times pi_{Rec} \quad (6.2)$$

Όπου :

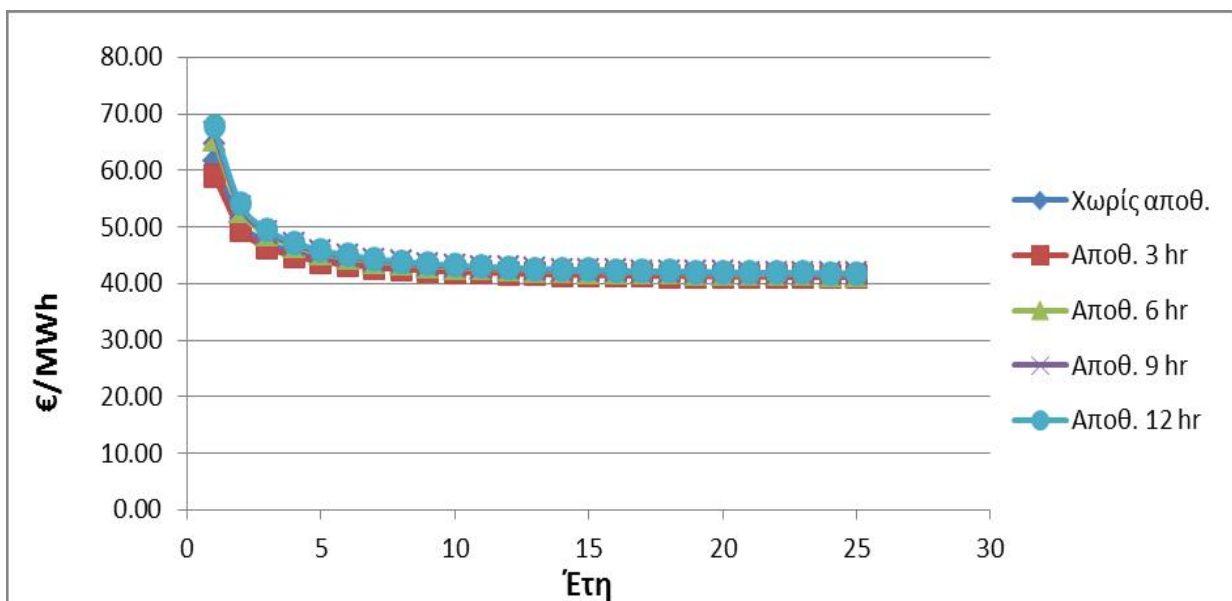
$$\begin{aligned} I_{Tow}^0 &= 1,6 \text{ [M\$]} & V_{Tow} &= \text{[unit]} \\ H_{Tow} &[\text{m}] & V_{Tow}^0 &= 1 \text{ [unit]} \\ H_{Tow}^0 &= 75 \text{ [m]} & pr_{Tow} &= 0,9526 \\ S_{Tow} &= 1,7971 I_{Tow}^0 & pi_{Tow} &= 1,030501 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{Rec}^0 &= 9,1 \text{ [M\$]} & V_{Rec} &= \text{[unit]} \\ A_{Rec} &[\text{m}^2] & V_{Rec}^0 &= 1 \text{ [unit]} \\ A_{Rec}^0 &= 100[\text{m}^2] & pr_{Rec} &= 0,9526 \\ S_{Rec} &= 0,5283 & pi_{Rec} &= 1.030501 \end{aligned}$$

Σημείωση : Τα παραπάνω κόστη αναφέρονται στο έτος 2010 γι αυτό έγινε προσαρμογή των μεγεθών για το έτος 2014 κάνοντας χρήση του Chemical Engineering Cost Plant Index του επιστημονικού περιοδικού Chemical Engineering [8], [14].

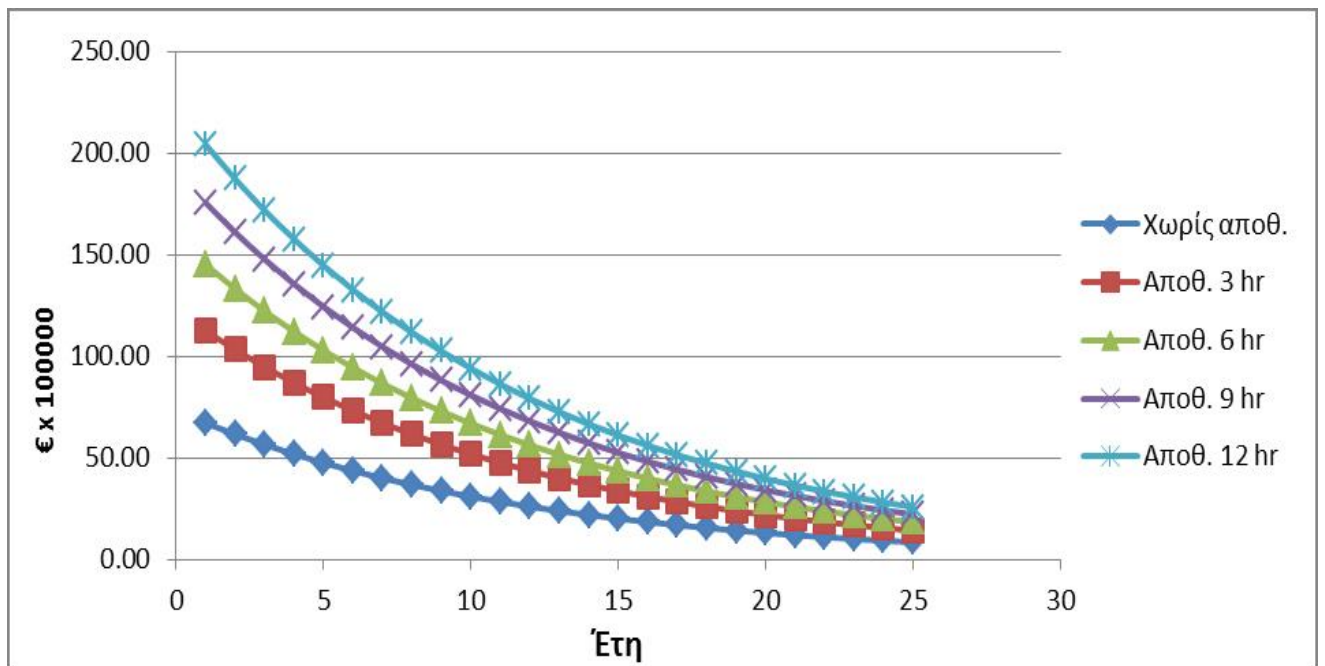
Τέλος, όλοι οι οικονομικοί δείκτες απεικονίζονται στα ακόλουθα σχήματα :

- Επιπλέον Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας



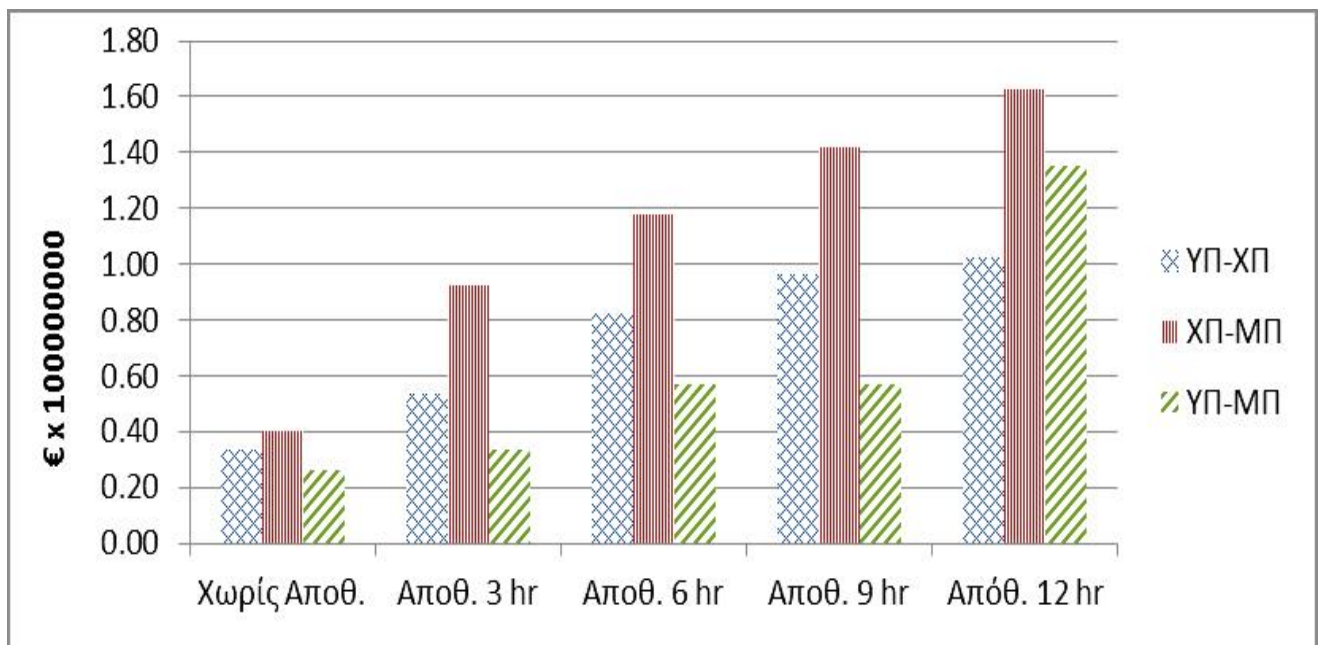
Σχήμα 6.12. Το Επιπλέον Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας σεναρίου υποκατάστασης των εναλλακτών ΥΘ-ΜΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ για τη Θίσβη

- Καθαρή ταμειακή ροή



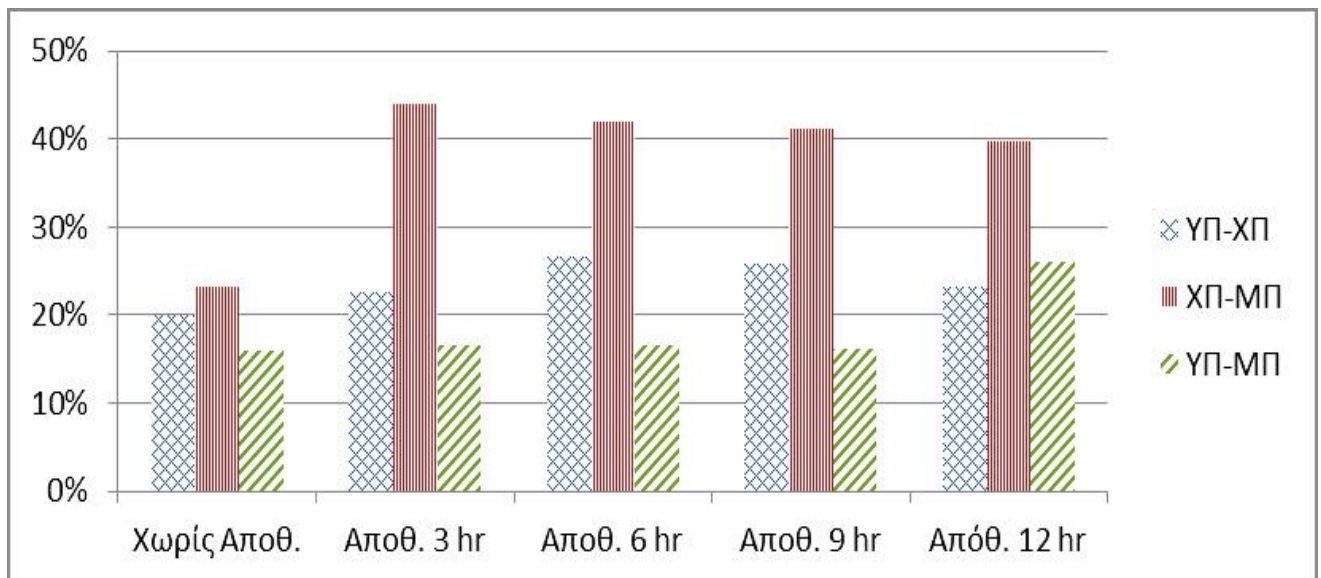
Σχήμα 6.13. Καθαρή Ταμειακή Ροή σεναρίου υποκατάστασης των εναλλακτών ΥΘ-ΜΠ-1 και ΥΘ-ΧΠ για τη Θίσβη

- Καθαρή Παρούσα Αξία



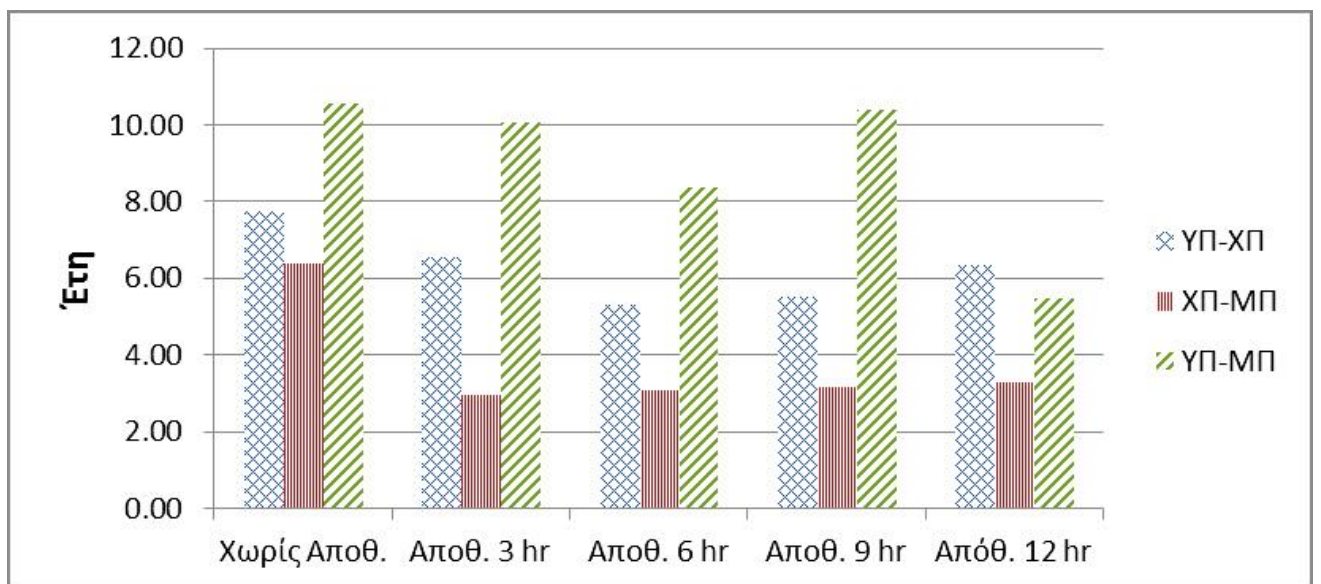
Σχήμα 6.14: Καθαρή Παρούσα Αξία των σεναρίων υποκατάστασης εναλλακτών

- Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης



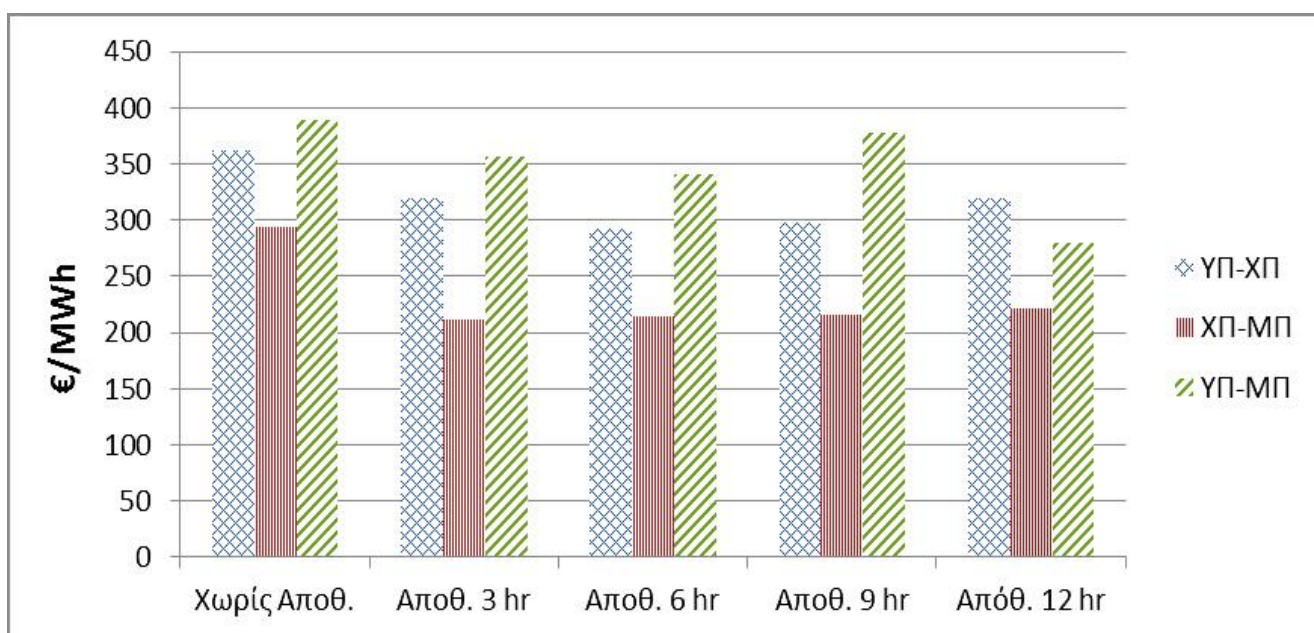
Σχήμα 6.15: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης των σεναρίων υποκατάστασης εναλλακτών

- Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής



Σχήμα 6.16 : Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής των σεναρίων υποκατάστασης των εναλλακτών

- Τιμή πώλησης MWh για αποπληρωμή επένδυσης σε 5 έτη



Σχήμα 6.17: Τιμή πώλησης της MWh για αποπληρωμή της επένδυσης ακριβώς στα 5 έτη

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι η πιο συμφέρουσα επένδυση είναι αυτή της παρέμβασης στη ΜΠ και ΧΠ, που παρουσιάστηκε και αναλυτικότερα. Η συγκεκριμένη παρέμβαση διαθέτει το μικρότερο ηλιακό πεδίο και είναι εκείνη με το μικρότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης.

Αν επίσης ήμασταν υποχρεωμένοι να πωλούμε την ηλεκτρική ενέργεια σύμφωνα με το (επιπλέον) ΣΚΗΕ τότε είναι εμφανές ότι το κόστος πώλησης θα ήταν υψηλότερο τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του υβριδικού συστήματος και με τα χρόνια θα μειωνόταν μέχρι να ισοροπήσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο το οποίο είναι τα 40€/MWh σε κάθε διαφορετικό σενάριο. Ενώ είναι λογικό να ναι υψηλότερο στο σενάριο της παρέμβασης στην ΥΠ-ΜΠ το οποίο απαιτεί το υψηλότερο κόστος επένδυσης και η συνολική ηλεκτροπαραγωγή είναι η ελάχιστη. Ακόμη, με βάση τα διαγράμματα φαίνεται ότι η παρουσία συστήματος θερμικής αποθήκευσης έχει θετικά αποτελέσματα για την επένδυση, αυξάνοντας το χρόνο λειτουργίας της μονάδας με τιμή πώλησης της MWh υψηλότερη από αυτή της συμβατικής.

6.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Baghernejad A, Yaghoubi M. Exergy analysis of an integrated solar Combined Cycles system . *Renew Energy* 35 (2010) . 2157–2164.
- [2] Siva Reddy V, Kaushik SC, Tyagi SK. Exergetic analysis of solar concentrator aided natural gas fired combined cycle power plant. *Renewable Energy* 39 (2012), 114–125.
- [3] H. Nezammahalleh, F. Farhadi , M. Tanhaemami. Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. *Solar Energy* 84 (2010), 1696–1705
- [4] <http://www.lagie.gr/agora/analysis-agoras/miniaia-delta-iep/> (Ηλεκτρονικό)
- [5] ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 3851, Αρ. Φύλλου 85, 2010
- [6] G.C. Bakos, D. Parsa. Technoeconomic assessment of an integrated solar combined cycle power plant in Greece using line-focus parabolic trough collectors. *Renewable Energy* 60 (2013), 598–603
- [7] <http://e-ntelligence.gr/> (Ηλεκτρονικό)
- [8] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana La´zaro, Pablo Dolado, Bel´n Zalba ,Luisa F. Cabeza. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), 31–55
- [9] D. Kearney , B. Kelly , U. Herrmann , R. Cable , J. Pacheco , R. Mahoney , H. Price , D. Blake , P. Nava , N. Potrovitza . Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field. *Energy* 29 (2004) 861–870
- [10] <http://opensourceecology.org/wiki/Heliostat>
- [11] International Renewable Energy Agency. RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES. Concentrating Solar Power. June 2012
- [12] C. Ballif, D. Favrat, V. Aga, M. Romero, A. Steinfeld, Germain Augsburgberger. Thermo-economic optimisation of large solar tower power plants. Suisse 2013
- [13] www.chemengonline.com (Ηλεκτρονικό)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας για χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή είναι μία πολλά υποσχόμενη και εξελίξιμη τεχνολογία. Ωστόσο, η διείσδυση της ηλιακής ενέργειας ως αξιόπιστης και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Κυριότερη αιτία γι' αυτό είναι η ίδια η φύση της ηλιακής ενέργειας, ως διαλείπουσας μορφής ενέργειας που εμπεριέχει σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας όσον αφορά στην ποσότητα και διαθεσιμότητά της. Σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά και υγρά καύσιμα η ποσότητα και διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας δε μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα. Ένας αξιόπιστος τρόπος για να αυξηθεί η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί, με την αποθήκευσή της σε κάποια κατάλληλη μορφή και την αξιοποίησή της όταν κριθεί απαραίτητο. Σαν δεύτερη αιτία θα μπορούσαμε να καταγράψουμε ότι τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιοχές του κόσμου. Απαραίτητες προϋποθέσεις είναι το υψηλό ηλιακό δυναμικό της τοποθεσίας και διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την επένδυση, όπως τα ανεμικά φορτία.

Η Ελλάδα λόγω του υψηλού ηλιακού δυναμικού που παρουσιάζει, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους υποψήφιους στην Ευρώπη για τέτοιες επενδύσεις. Ήδη λειτουργεί ένας σταθμός ηλιακού πύργου ισχύος 38MW στην περιοχή του Αθερινόλακκου, στην Κρήτη, ενώ σε φάση σχεδιασμού και αδειοδότησης βρίσκεται άλλος ένας στο ίδιο νησί με την ονομασία "Ηλιοθερμικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΗΛΘΣΠΗΕ)" στην περιοχή Φουρνιά με ισχύ 70MW. Η Κρήτη βρισκόμενη στο νοτιότερο άκρο της Ευρώπης διαθέτει ιδιαίτερα υψηλό δυναμικό, αλλά όπως φάνηκε και στη μελέτη που έγινε στη Θίσβη δεν θα πρέπει να αποκλείουμε και άλλες περιοχές με χαμηλότερο ηλιακό δυναμικό ειδικά αν υπάρχει εκεί ήδη εγκατεστημένος θερμοηλεκτρικός σταθμός. Η υβριδοποίηση υπάρχοντων θερμοηλεκτρικών σταθμών παρέχει οφέλη τόσο στην εξοικονόμηση καυσίμων, όσο και στην μείωση των ρύπων. Για την έρευνα του ηλιακού δυναμικού μιας τοποθεσίας παρουσιάστηκε αναλυτικά η μεθοδολογία επεξεργασίας των μετρήσεων της ΕΜΥ στο κεφάλαιο 2, ώστε να αποφεύγεται η χρήση τιμών από το διαδίκτυο, που μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος αποτελέσματα.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια εμβάθυνσης στην τεχνολογία του κεντρικού ηλιακού δέκτη, μιας και εκείνη τέθηκε προς μελέτη για το σταθμό της Θίσβης. Παρουσιάστηκαν αναλυτικά όλα τα υποσυστήματα που την αποτελούν και την επίδραση που ασκούν στην απόδοση του σταθμού. Έμφαση δόθηκε επίσης και στις απώλειες του ηλιακού πεδίου, ενώ έγιναν προσπάθειες να περιοριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο. Ίσως το σημαντικότερο κομμάτι της διπλωματικής ήταν η δημιουργία ενός λογισμικού διάταξης ηλιακών πεδίων, το οποίο σχεδιάστηκε για να λειτουργεί συμβατά με το λογισμικό Tonatiuh. Με τη χρήση αυτών των δυο προγραμμάτων είμαστε σε θέση, όχι μόνο να σχεδιάσουμε ένα πεδίο ηλιοστατών, αλλά και να μελετήσουμε τους βαθμούς απόδοσης προκειμένου να καταλήξουμε στην βέλτιστη διάταξη. Ακόμα μας δίνεται η ευκαιρία να πειραματιστούμε με τις διαστάσεις των ηλιοστατών, το ύψος του πύργου και τα γεωμετρικά όρια του πεδίου.

Τα αποτελέσματα από τις διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση των δυο λογισμικών κρίνονται ικανοποιητικά. Παρ'όλα αυτά, δεν αποκλείεται η ύπαρξη μικρών ή μεγαλύτερων σφαλμάτων. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, ένα σφάλμα που μπορεί να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς, έχει να κάνει με το βαθμό απόδοσης των πεδίων. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6, ο βαθμός απόδοσης έχει νόημα να υπολογιστεί μόνο σε ετήσια βάση που σημαίνει ότι απαιτείται η διεξαγωγή χιλιάδων υπολογισμών για κάθε πεδίο. Αν διεξήγαμε υπολογισμούς για την έρευνα του βαθμού απόδοσης για ένα πεδίο όμως, δεν θα είχαμε τη δυνατότητα να μελετήσουμε διαφορετικές διατάξεις πεδίων. Έτσι οι βαθμοί απόδοσης των πεδίων υπολογίστηκαν για τα δύο σημεία σχεδιασμού και επιλέξαμε μια ενδιάμεση τιμή για τη διεξαγωγή υπολογισμών. Ακόμη, αντικείμενο ενδεδειγμένης ενασχόλησης αποτελεί η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του δέκτη του πύργου. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε δέκτης κοιλότητας λόγω των χαμηλότερων απωλειών που παρουσιάζει, αλλά δεν έγινε σύγκριση με εξωτερικό δέκτη.

Τέλος, για τον θερμοηλεκτρικό σταθμό στη Θισβη η υβριδοποίηση με τεχνολογία ηλιακού πύργου κρίνεται ασφαλής σαν επένδυση, καθώς παρουσιάζει υψηλή απόδοση και σύντομο χρόνο αποπληρωμής. Απαραίτητη κρίνεται η εφαρμογή συστήματος αποθήκευσης θερμικού φορτίου, παρότι αυξάνει σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης, διότι προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας του σταθμού σε υβριδική διαμόρφωση για περισσότερο χρόνο. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη συντομότερη αποπληρωμή της. Εκμεταλλευόμενοι βέβαια πάντα και τη θεώρηση της πώλησης της «πράσινης» ενέργειας σε καθορισμένη τιμή η οποία είναι αρκετά υψηλότερη τόσο από την Οριακή Τιμή Συστήματος (Ο.Τ.Σ.) όσο και από το επιπλέον σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

		ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ						
n	# ημέρας	γωνία δ (μιοίρες)	γωνία ω _s (μιοίρες)	γωνία ω _s (rad)	Ημερήσια Εξωγήνια Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήνια Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διόρακα Ημέρας N (Ωρες)	
1	1-lav	-23.012	70.43344187	1.229295464	14892140.21	4.136705615	9.391125583	
2	2-lav	-22.931	70.51347891	1.230692374	14946345.97	4.151762768	9.401797188	
3	3-lav	-22.843	70.60006956	1.232203666	15004992.2	4.168053389	9.413342608	
4	4-lav	-22.748	70.69315261	1.233828272	15068065.1	4.185573639	9.425753682	
5	5-lav	-22.647	70.79266278	1.235565052	15135549.56	4.204319322	9.439021704	
6	6-lav	-22.538	70.89853089	1.237412799	15207429.16	4.224285877	9.453137452	
7	7-lav	-22.424	71.01068404	1.239370241	15283686.13	4.245468369	9.468091205	
8	8-lav	-22.302	71.12904576	1.241436042	15364301.34	4.267861483	9.483872767	
9	9-lav	-22.174	71.25353619	1.24360881	15449254.26	4.291459516	9.500471492	
10	10-lav	-22.040	71.38407228	1.245887095	15538522.93	4.31625637	9.517876304	
11	11-lav	-21.898	71.52056795	1.248269394	15632083.95	4.34224554	9.536075726	
12	12-lav	-21.751	71.66293428	1.250754155	15729912.4	4.369420111	9.555057904	
13	13-lav	-21.597	71.81107972	1.25333978	15831981.88	4.397772745	9.574810629	
14	14-lav	-21.436	71.96491026	1.25602463	15938264.44	4.427295677	9.595321368	
15	15-lav	-21.269	72.12432964	1.258807023	16048730.55	4.457980707	9.616577285	
16	16-lav	-21.096	72.28923953	1.261685244	16163349.08	4.48981919	9.638565271	
17	17-lav	-20.917	72.45953973	1.264657543	16282087.31	4.522802031	9.661271964	
18	18-lav	-20.731	72.63512836	1.267722142	16404910.83	4.556919675	9.684683781	
19	19-lav	-20.540	72.81590204	1.270877238	16531783.58	4.592162106	9.708786938	
20	20-lav	-20.342	73.00175608	1.274121003	16662667.81	4.628518836	9.733567477	
21	21-lav	-20.138	73.19258468	1.277451591	16797524.04	4.665978899	9.75901129	
22	22-lav	-19.928	73.38828109	1.280867137	16936311.06	4.704530849	9.785104145	
23	23-lav	-19.713	73.58873779	1.284365767	17078985.92	4.744162755	9.811831705	
24	24-lav	-19.491	73.79384666	1.287945592	17225503.89	4.784862192	9.839179555	
25	25-lav	-19.264	74.00349916	1.291604718	17375818.48	4.826616245	9.867133222	
26	26-lav	-19.031	74.21758648	1.295341247	17529881.4	4.869411499	9.895678197	
27	27-lav	-18.792	74.43599966	1.299153276	17687642.55	4.913234042	9.924799955	
28	28-lav	-18.548	74.65862981	1.303038905	17849050.05	4.95806946	9.954483975	
29	29-lav	-18.298	74.8853682	1.306996237	18014050.22	5.003902839	9.98471576	
30	30-lav	-18.043	75.1161064	1.311023378	18182587.55	5.050718763	10.01548085	
31	31-lav	-17.782	75.35073642	1.315118444	18354604.74	5.098501317	10.04676486	
		-20.847	72.50405	1.2654343				
			Συνολική	Μηνιαία	506148018.6	140.597	9.66721	
			Εξωγήνια	Ακτινοβολία	ΣΗΟ	ΣΗΟ		
			Μέση	Μηνιαία	16327355.44	4.535376511		
			Εξωγήνια	Ακτινοβολία	F₀ (monthly)	F₀ (monthly)		

										ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ			
n	# ημέρας	γωνία δ (μοίρες)	δ (rad)	γωνία ω (μοίρες)	γωνία ω (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία Η ₀ (daily) [J/m ²]	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία Η ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)					
32	1-0εβ	-17.51649546	-0.305720519	75.58915085	1.31979561	18530042.71	5.147234086	10.0785345					
33	2-0εβ	-17.24552919	-0.300991266	75.83124293	1.323504865	18708840.57	5.196900158	10.11083299					
34	3-0εβ	-16.9694527	-0.296172822	76.07909668	1.327792506	18890935.66	5.247482129	10.14358756					
35	4-0εβ	-16.68834779	-0.291266616	76.32603702	1.332140651	19076263.58	5.298962107	10.17680494					
36	5-0εβ	-16.40229777	-0.286274101	76.57852984	1.336547482	19264758.17	5.351321714	10.21047065					
37	6-0εβ	-16.11138739	-0.281196757	76.83428208	1.341011201	19456351.54	5.404542095	10.24457094					
38	7-0εβ	-15.81570286	-0.276036088	77.09319184	1.345530028	19650974.13	5.458603925	10.27909225					
39	8-0εβ	-15.5153318	-0.270793624	77.35515842	1.350102208	19848554.69	5.513487413	10.31402112					
40	9-0εβ	-15.21036321	-0.265470918	77.6200824	1.354726004	20049020.33	5.569172314	10.34934432					
41	10-0εβ	-14.90088746	-0.260069548	77.88786571	1.359399704	20252296.57	5.625637936	10.38504876					
42	11-0εβ	-14.58699625	-0.254591113	78.15841165	1.364121621	20458307.35	5.682863153	10.42112155					
43	12-0εβ	-14.2687826	-0.249037237	78.43162497	1.368890093	20666975.08	5.74082641	10.45755					
44	13-0εβ	-13.94634081	-0.243409566	78.70741189	1.373703483	20878220.68	5.799505745	10.49432158					
45	14-0εβ	-13.61976641	-0.237709767	78.98568012	1.37856018	21091963.64	5.858878789	10.53142402					
46	15-0εβ	-13.28915619	-0.23193953	79.26633894	1.3834586	21308122.05	5.918922791	10.56884519					
47	16-0εβ	-12.95460809	-0.226100565	79.54929914	1.388397188	21526612.64	5.979614623	10.60657322					
48	17-0εβ	-12.61622127	-0.2201946	79.8344731	1.393374412	21747350.89	6.040930803	10.64459641					
49	18-0εβ	-12.27409599	-0.214223388	80.12177479	1.398388773	21970251.01	6.102847502	10.68290331					
50	19-0εβ	-11.92833363	-0.208188696	80.41111973	1.403438794	22195226.05	6.165340569	10.72148263					
51	20-0εβ	-11.57903665	-0.202092314	80.70242505	1.408523031	2242187.94	6.228385539	10.76032334					
52	21-0εβ	-11.22630855	-0.195936047	80.99560944	1.413640064	22651047.58	6.29195766	10.79941459					
53	22-0εβ	-10.87025385	-0.18972172	81.29059315	1.418788501	22881714.85	6.356031904	10.83874575					
54	23-0εβ	-10.51097806	-0.183451175	81.58729801	1.423966978	23114098.76	6.420582988	10.87830664					
55	24-0εβ	-10.14888765	-0.177126269	81.88564734	1.429174156	23348107.42	6.485585394	10.91808631					
56	25-0εβ	-9.783189981	-0.170748877	82.18556601	1.434408724	23583648.2	6.551013389	10.95807547					
57	26-0εβ	-9.414893347	-0.164320888	82.48698033	1.439669397	23820627.76	6.616841044	10.99826404					
58	27-0εβ	-9.043806876	-0.157844207	82.78981809	1.444954913	24058952.11	6.683042253	11.03864241					
59	28-0εβ	-8.670040531	-0.151320754	83.09400849	1.450264037	24298526.73	6.749590759	11.07920113					
		-13.325256870	-0.232356966	79.20273314	1.382348470			10.56					
				Συνολική Εξωγήινη Μέση Εξωγήινη	Μηνιαία Ακτινοβολία	595749978.7	165.49	ΣΗΟ					
				Μέση Εξωγήινη	Μηνιαία Ακτινοβολία	21276784.95	5.91	R₀ (monthly)					

										ΜΑΡΤΙΟΣ			
n	# ημέρας	γωνία δ (μιορες)	δ (rad)	γωνία ωσ (μιορες)	γωνία ωσ (rad)	Ημερήσια Εξωγήνη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήνη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)					
60	1-Mar	-8.293705065	-0.144752461	83.3994821	1.455595557	24539256.61	6.81646017	11.11993095					
61	2-Mar	-7.914911995	-0.138141274	83.70617085	1.460948286	24781046.35	6.883623986	11.16082278					
62	3-Mar	-7.533773567	-0.131489154	84.01400794	1.466321056	25023800.21	6.951055613	11.20186773					
63	4-Mar	-7.150402718	-0.12479807	84.32292784	1.471712726	25267422.22	7.018728395	11.24305705					
64	5-Mar	-6.764913051	-0.118070006	84.63286622	1.477122171	25511816.25	7.086615626	11.28438216					
65	6-Mar	-6.377418794	-0.111306956	84.9437599	1.482548289	25756886.09	7.154690582	11.32583465					
66	7-Mar	-5.98803477	-0.104510922	85.25554678	1.487989997	26002535.52	7.222926534	11.36740624					
67	8-Mar	-5.596876363	-0.09768392	85.56816584	1.493446229	26248668.4	7.291296778	11.40908878					
68	9-Mar	-5.20405948	-0.090827972	85.88155702	1.498915937	26495188.76	7.359774654	11.45087427					
69	10-Mar	-4.809700522	-0.08394511	86.1956612	1.504398089	26742000.84	7.428333567	11.49275483					
70	11-Mar	-4.413916346	-0.077037373	86.51042013	1.509891669	26989009.24	7.496947011	11.53472268					
71	12-Mar	-4.016824231	-0.070106808	86.82577635	1.515395673	27236118.93	7.565588592	11.57677018					
72	13-Mar	-3.618541845	-0.063155469	87.14167317	1.520909112	27483235.37	7.634232046	11.61888976					
73	14-Mar	-3.219187206	-0.056185416	87.45805456	1.526431009	27730264.55	7.702851265	11.66107394					
74	15-Mar	-2.818878653	-0.049198714	87.77486512	1.531960397	27977113.13	7.771420314	11.70331535					
75	16-Mar	-2.417734805	-0.042197433	88.09204999	1.537496317	28223688.44	7.839913455	11.74560667					
76	17-Mar	-2.01587453	-0.035183648	88.4095548	1.543037821	28469898.6	7.908305167	11.78794064					
77	18-Mar	-1.613416909	-0.028159437	88.72732559	1.548583968	28717652.59	7.976570164	11.83031008					
78	19-Mar	-1.210481196	-0.021126882	89.04530874	1.554133821	28960860.29	8.044683415	11.87270783					
79	20-Mar	-0.807186793	-0.014088067	89.36345092	1.559686449	29205432.6	8.112620166	11.91512679					
80	21-Mar	-0.403653202	-0.007045077	89.681699	1.565240926	29449281.44	8.180355956	11.95755987					
81	22-Mar	1.50818E-14	2.63228E-16	90	1.570796327	29692319.88	8.247866634	12					
82	23-Mar	0.403653202	0.007045077	90.318301	1.576351727	29934462.17	8.315128379	12.04244013					
83	24-Mar	0.807186793	0.014088067	90.63654908	1.581906204	30175623.78	8.382117716	12.08487321					
84	25-Mar	1.210481196	0.021126882	90.95469126	1.587458833	30415721.51	8.44881153	12.12729217					
85	26-Mar	1.613416909	0.028159437	91.27267441	1.593008686	30654673.5	8.515187084	12.16968992					
86	27-Mar	2.01587453	0.035183648	91.5904452	1.598554832	30892399.31	8.581222031	12.21205936					
87	28-Mar	2.417734805	0.042197433	91.90795001	1.604096336	31128819.95	8.646894431	12.25439333					
88	29-Mar	2.818878653	0.049198714	92.22513488	1.609632257	31363857.94	8.712182761	12.29668465					
89	30-Mar	3.219187206	0.056185416	92.54194544	1.615161644	31597437.34	8.777065929	12.33892606					
90	31-Mar	3.618541845	0.063155469	92.85832683	1.620683541	31829483.83	8.841523286	12.38111024					
		-2.389178610	-0.0416990332	88.11	1.5377231			11.747					
				Συνολική Εξωγήνη	Μηνιαία Ακτινοβολία	874493975.6	ΣΗΘ	242.915					
				Μέση Εξωγήνη	Ακτινοβολία	28209483.09	F₀ (monthly)	7.835967524					

ΑΠΡΙΛΙΟΣ									
n	# ημέρες	γωνία δ (μιορες)	δ (rad)	γωνία ω (μιορες)	γωνία ω (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διόρθωση Ημέρας N (Ωρες)	
91	1-Απρ	4.016824231	0.070106808	93.17422365	1.626196981	32059924.68	8.905534634	12.42322982	
92	2-Απρ	4.413916346	0.077037373	93.48957987	1.631700985	32288688.86	8.969080239	12.46527732	
93	3-Απρ	4.809700522	0.083945111	93.80433388	1.637194565	32515707.01	9.032140837	12.50724517	
94	4-Απρ	5.20405948	0.090827972	94.11844298	1.642676717	32740911.52	9.094697645	12.54912573	
95	5-Απρ	5.596876363	0.09768392	94.43183416	1.648146425	32964236.51	9.156732365	12.59091122	
96	6-Απρ	5.98803477	0.104510922	94.74445322	1.653602657	33185617.89	9.218227193	12.63259376	
97	7-Απρ	6.377418794	0.111306956	95.0562401	1.659044364	33404993.36	9.279164822	12.67416535	
98	8-Απρ	6.764913051	0.118070006	95.36713378	1.664470483	33622302.42	9.339528451	12.71561784	
99	9-Απρ	7.150402718	0.12479807	95.67707216	1.669879928	33837486.41	9.399301781	12.75694295	
100	10-Απρ	7.533773567	0.131489154	95.98599206	1.675271597	34050488.49	9.458469026	12.79813227	
101	11-Απρ	7.914911995	0.138141274	96.29382915	1.680644368	34261253.67	9.517014908	12.83917722	
102	12-Απρ	8.293705065	0.144752461	96.6005179	1.685997096	34469728.79	9.574924664	12.88006905	
103	13-Απρ	8.670040531	0.151320754	96.90599151	1.691328617	34675862.55	9.632184041	12.92079887	
104	14-Απρ	9.043806876	0.157844207	97.21018191	1.696637741	34879605.48	9.6887793	12.96135759	
105	15-Απρ	9.414893347	0.164320888	97.51301967	1.701923257	35080909.95	9.744697209	13.00173596	
106	16-Απρ	9.783189981	0.170748877	97.81443399	1.707183929	35279730.17	9.79925047	13.04192453	
107	17-Απρ	10.14858765	0.177126269	98.1143266	1.712418497	35476022.14	9.854450595	13.08191369	
108	18-Απρ	10.51097806	0.183451175	98.41270199	1.717625676	35669743.69	9.908262136	13.1216936	
109	19-Απρ	10.87025385	0.18972172	98.70940685	1.722804152	35860854.42	9.96134845	13.16125425	
110	20-Απρ	11.22630855	0.195996047	99.00439056	1.727952589	36049315.7	10.01369881	13.20058541	
111	21-Απρ	11.57903665	0.202092314	99.29757495	1.733069622	36235090.66	10.06530296	13.23967666	
112	22-Απρ	11.92833363	0.208188696	99.58888027	1.738153859	36418144.12	10.11615115	13.27851737	
113	23-Απρ	12.27409599	0.214223388	99.87822521	1.743203881	36598442.63	10.16623406	13.31709669	
114	24-Απρ	12.61622127	0.2201946	100.1655269	1.748218241	36775954.39	10.21554289	13.35540359	
115	25-Απρ	12.95460809	0.226100565	100.4507009	1.753195466	36950649.23	10.26406923	13.39342678	
116	26-Απρ	13.28915619	0.23193953	100.7336611	1.758134053	37122498.59	10.31180516	13.43115481	
117	27-Απρ	13.61976641	0.237709767	101.0143199	1.763032474	37291475.48	10.35874319	13.46857598	
118	28-Απρ	13.94634081	0.243409566	101.2925881	1.76788917	37457554.44	10.40487623	13.50567842	
119	29-Απρ	14.2687826	0.249037237	101.5683750	1.77270256	37620711.52	10.45019764	13.54245	
120	30-Απρ	14.58699625	0.254591113	101.8415884	1.777471032	37780924.2	10.49470117	13.57887845	
		9.4931978	0.165687558	97.608653	1.703952366			13.014	
		Συνολική		Μηνιαία		1052624829	292.40		
		Εξωγήινη		Ακτινοβολία		ΣΗΘ	ΣΗΘ		
		Μέση		Μηνιαία		35087494.3	9.746526194		
		Εξωγήινη		Ακτινοβολία		F ₀ (monthly)	F ₀ (monthly)		

		ΜΑΙΟΣ											
n	# ημέρας	γωνία δ (μοίρες)	δ (rad)	γωνία ωσ (μοίρες)	γωνία ωσ (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)					
121	1-Mai	14.90088746	0.260069548	102.1121343	1.78219295	37938171.39	10.53838094	13.61495124					
122	2-Mai	15.21036321	0.265470918	102.3799176	1.78686665	38092433.39	10.5812315	13.65065568					
123	3-Mai	15.5153318	0.270793624	102.6448416	1.791490446	38243691.8	10.62324772	13.68597888					
124	4-Mai	15.81570286	0.276036088	102.9068082	1.796062625	38391929.54	10.66442487	13.72090775					
125	5-Mai	16.11138739	0.281196757	103.1657179	1.800581453	38537130.76	10.70475855	13.75542906					
126	6-Mai	16.40229777	0.286274101	103.4214702	1.805045172	38679280.81	10.74424467	13.78952935					
127	7-Mai	16.68834779	0.291266616	103.673963	1.809452003	38818366.19	10.7828795	13.82319506					
128	8-Mai	16.9694527	0.296172822	103.9303093	1.813800147	38954374.54	10.82065959	13.85641244					
129	9-Mai	17.24552919	0.300991266	104.1687571	1.818087789	39087294.52	10.85758181	13.88916761					
130	10-Mai	17.51649546	0.305720519	104.4108491	1.822313092	39217115.84	10.89364329	13.92144655					
131	11-Mai	17.78227121	0.310359181	104.6492636	1.826474209	39343829.18	10.92884144	13.95323514					
132	12-Mai	18.04277769	0.314905877	104.8838936	1.830569276	39467426.15	10.96317393	13.98451915					
133	13-Mai	18.29793771	0.319359259	105.1146318	1.834596417	39587899.22	10.99663867	14.01528424					
134	14-Mai	18.54767565	0.323718009	105.3413702	1.838553748	39705241.73	11.02923381	14.04551603					
135	15-Mai	18.79191752	0.327980833	105.5640003	1.842439378	39819447.79	11.06095772	14.07520005					
136	16-Mai	19.03059093	0.33214647	105.7824135	1.846251407	39930512.28	11.09180897	14.1043218					
137	17-Mai	19.26362517	0.336213685	105.9965008	1.849987935	40038430.77	11.12178633	14.13286678					
138	18-Mai	19.49095119	0.340181273	106.2061533	1.853647062	40143199.52	11.15088876	14.16082045					
139	19-Mai	19.71250161	0.344048057	106.4112622	1.857226887	40244815.39	11.17911539	14.1881683					
140	20-Mai	19.9282108	0.347812892	106.6117189	1.860725516	40343275.84	11.20646551	14.21489586					
141	21-Mai	20.13801482	0.351474663	106.8074153	1.864141063	40438578.88	11.23293858	14.24098871					
142	22-Mai	20.34185152	0.355032285	106.9982439	1.86747165	40530723.01	11.25853417	14.26643252					
143	23-Mai	20.53966049	0.358484703	107.184098	1.870715415	40619707.21	11.283252	14.29121306					
144	24-Mai	20.73138311	0.361830894	107.3648716	1.873870511	40705530.92	11.30709192	14.31531622					
145	25-Mai	20.91696257	0.365069866	107.5404603	1.876935111	40788193.95	11.33005388	14.33872804					
146	26-Mai	21.09634389	0.368200661	107.7107605	1.87990741	40867696.49	11.35213792	14.36143473					
147	27-Mai	21.26947391	0.37122235	107.8756704	1.882785631	40944039.08	11.37334419	14.38342271					
148	28-Mai	21.43630132	0.374134038	108.0350897	1.885568024	41017222.54	11.39367293	14.40467863					
149	29-Mai	21.5967767	0.376934861	108.1882203	1.888252873	41087248	11.41312445	14.42518937					
150	30-Mai	21.75085248	0.379623991	108.3370657	1.890838499	41154116.83	11.43169912	14.4449421					
151	31-Mai	21.89848302	0.38220063	108.4794321	1.893332360	41217830.6	11.44939739	14.46392427					
		18.80581803	0.3222344	105.6095803	1.843231407			14.081					
				Συνολική	Μηνιαία	1233954754	342.77						
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀						
				Μέση	Μηνιαία	39804992.07	11.06						
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	R₀ (monthly)	R₀ (monthly)						

										ΙΟΥΝΙΟΣ				
n	# ημέρας	γωνία δ (μοίρες)	δ (rad)	γωνία ωσ (μοίρες)	γωνία ωσ (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)						
152	1-Ιουν	22.03962456	0.384664014	108.6159277	1.895705559	4178391.12	11.46621976	14.4821237						
153	2-Ιουν	22.17423529	0.387013415	108.7464638	1.897983843	41335800.35	11.48216676	14.49952851						
154	3-Ιουν	22.30227531	0.389248135	108.8709542	1.900156611	41390060.42	11.49723901	14.51612723						
155	4-Ιουν	22.42370668	0.391367512	108.989316	1.902222413	41444173.58	11.51143711	14.53190879						
156	5-Ιουν	22.53849343	0.393370919	109.1014691	1.904179855	41489142.21	11.52476173	14.54686255						
157	6-Ιουν	22.64660154	0.395257761	109.2073372	1.906027602	41533968.77	11.53721355	14.5609783						
158	7-Ιουν	22.74799897	0.39702748	109.3068474	1.907764382	41575655.81	11.54879328	14.57424632						
159	8-Ιουν	22.84265567	0.398679551	109.3999304	1.909388988	41614205.94	11.55950165	14.58665739						
160	9-Ιουν	22.93054361	0.400213485	109.4865211	1.91090028	41649621.81	11.56939939	14.59820281						
161	10-Ιουν	23.01163673	0.401628827	109.5665581	1.91297189	41681906.13	11.57830726	14.60887442						
162	11-Ιουν	23.085911	0.402925158	109.6399845	1.913578722	41711061.6	11.586406	14.6186646						
163	12-Ιουν	23.15334442	0.404102093	109.7067476	1.914743957	41737090.95	11.59363637	14.62756635						
164	13-Ιουν	23.21391701	0.405159284	109.7667992	1.915792055	41759996.9	11.59999914	14.63557322						
165	14-Ιουν	23.26761081	0.406096418	109.8200956	1.916722253	41779782.18	11.60549505	14.64267941						
166	15-Ιουν	23.31440992	0.406913216	109.866598	1.917533873	41796449.49	11.61012486	14.64887973						
167	16-Ιουν	23.35430046	0.407609438	109.9062723	1.91822632	41810001.5	11.6138893	14.65416963						
168	17-Ιουν	23.38727062	0.408184875	109.9390892	1.918799083	41820440.85	11.61678912	14.65854522						
169	18-Ιουν	23.41331063	0.408639359	109.9650245	1.91925174	41827770.14	11.61882504	14.66200327						
170	19-Ιουν	23.43241276	0.408972754	109.9840591	1.919583956	41831991.94	11.61999776	14.66454121						
171	20-Ιουν	23.44457137	0.409184962	109.9961788	1.919795484	41833108.76	11.62030799	14.66615717						
172	21-Ιουν	23.44978285	0.40927592	110.0013745	1.919886167	41831123.06	11.61975641	14.66684994						
173	22-Ιουν	23.44804565	0.4092456	109.9996425	1.919855938	41826037.24	11.61834368	14.666619						
174	23-Ιουν	23.43936028	0.409094011	109.990984	1.919704818	41817853.67	11.61607046	14.66546453						
175	24-Ιουν	23.42372933	0.4088212	109.9754054	1.919432921	41806574.62	11.61293739	14.66338739						
176	25-Ιουν	23.40115742	0.408427246	109.9529184	1.919040448	41792202.33	11.60894509	14.66038912						
177	26-Ιουν	23.37165125	0.407912266	109.9235395	1.91852769	41774738.98	11.60409416	14.65647194						
178	27-Ιουν	23.33521955	0.407276413	109.8872906	1.917895027	41754186.68	11.59838519	14.65163874						
179	28-Ιουν	23.29187312	0.406519875	109.8441983	1.917142925	41730547.5	11.59181875	14.64589311						
180	29-Ιουν	23.2416248	0.405642876	109.7942943	1.916271936	41703823.44	11.5843954	14.63923924						
181	30-Ιουν	23.18448949	0.404645677	109.7376152	1.915282698	41674016.46	11.57611568	14.63168202						
		23.07705882	0.402770658	109.6329812	1.913456491				14.618					
				Συνολική	Μηνιαία	1250608724	347.3913123							
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀							
				Μέση	Μηνιαία	41686957.48	11.57971041							
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	Ρ₀ (monthly)	Ρ₀ (monthly)							

		ΙΟΥΛΙΟΣ											
n	# ημέρας	γωνία δ (μιοίρες)	δ (rad)	γωνία ως (μιοίρες)	γωνία ως (rad)	Ημερήσια Εξωγήνια Ακτινοβολία $H_{0(daily)}$ (I/m^2)	Ημερήσια Εξωγήνια Ακτινοβολία $H_{0(daily)}$ (kWh/m^2)	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)					
182	1-Ιουλ	23.12048412	0.403528572	109.6742021	1.9144175931	416.41128.47	11.56698013	14.62322695					
183	2-Ιουλ	23.04962764	0.402291894	109.6041011	1.912952437	416.05161.33	11.55698926	14.61388014					
184	3-Ιουλ	22.97194107	0.400936007	109.5273625	1.911613096	415.66116.89	11.54614358	14.60364833					
185	4-Ιουλ	22.88744741	0.399461315	109.4440412	1.910158866	415.23996.95	11.5344436	14.59253883					
186	5-Ιουλ	22.79617171	0.397868253	109.3541965	1.908590779	414.78803.29	11.5218898	14.58055953					
187	6-Ιουλ	22.69814101	0.396157295	109.2578915	1.90690994	414.30537.69	11.50848269	14.56771886					
188	7-Ιουλ	22.59338436	0.394328946	109.1551934	1.905117521	413.79201.92	11.49422276	14.55402579					
189	8-Ιουλ	22.48193281	0.39238375	109.0461735	1.903214764	413.24797.76	11.47911049	14.5394898					
190	9-Ιουλ	22.36381937	0.390322281	108.9309063	1.901202971	412.67327.01	11.46314639	14.52412083					
191	10-Ιουλ	22.23907905	0.388145152	108.80947	1.899083509	412.06791.51	11.44633097	14.50792933					
192	11-Ιουλ	22.10774881	0.385853007	108.6819462	1.896857798	411.43193.14	11.42866476	14.49092615					
193	12-Ιουλ	21.96986757	0.383446525	108.5484193	1.894527315	410.76533.87	11.4101483	14.47312258					
194	13-Ιουλ	21.82547618	0.38092642	108.4089771	1.892093588	410.06815.72	11.39078214	14.45453027					
195	14-Ιουλ	21.67461744	0.378293438	108.2637096	1.889558192	409.34040.83	11.3705669	14.43516128					
196	15-Ιουλ	21.51733603	0.37554836	108.1127097	1.886922747	408.58211.47	11.34950319	14.41502796					
197	16-Ιουλ	21.35367858	0.372691999	107.9560726	1.884188914	407.79330.02	11.32759167	14.39414301					
198	17-Ιουλ	21.18369356	0.3697252	107.7938955	1.88135839	406.97399.06	11.30483307	14.3725194					
199	18-Ιουλ	21.00743137	0.366648845	107.6262778	1.87843291	406.12421.35	11.28122815	14.35017038					
200	19-Ιουλ	20.82494422	0.363463843	107.4533206	1.875414236	405.24399.84	11.25677773	14.32710941					
201	20-Ιουλ	20.63628618	0.360171139	107.2751264	1.872304162	404.33337.75	11.23148271	14.30335019					
202	21-Ιουλ	20.44151317	0.356771709	107.0917994	1.869104501	403.39238.55	11.20534404	14.27890659					
203	22-Ιουλ	20.2406829	0.35326656	106.9034448	1.865817093	402.42106.03	11.17836279	14.25379264					
204	23-Ιουλ	20.03385488	0.34965673	106.7101689	1.862443793	401.41944.3	11.15054008	14.22802252					
205	24-Ιουλ	19.82109039	0.345943289	106.5120789	1.858986469	400.38757.81	11.12187717	14.20161051					
206	25-Ιουλ	19.60245249	0.342127337	106.3092825	1.85447005	399.32551.45	11.0923754	14.174571					
207	26-Ιουλ	19.37800596	0.338210006	106.1018882	1.851827292	398.23330.49	11.06203625	14.14691843					
208	27-Ιουλ	19.14781731	0.334192457	105.8900047	1.848129227	397.11100.71	11.03086131	14.1186673					
209	28-Ιουλ	18.91195474	0.330075878	105.6737409	1.844354711	395.95868.37	10.99885232	14.08983211					
210	29-Ιουλ	18.67048816	0.325861491	105.4532056	1.840505644	394.77640.26	10.96601118	14.06042741					
211	30-Ιουλ	18.4234891	0.321550545	105.2285077	1.836583927	393.56423.78	10.93233994	14.0304677					
212	31-Ιουλ	18.17103077	0.317144315	104.9997559	1.832591455	392.32226.93	10.89784081	13.99996746					
		21.10146737	0.368290083	107.7354152	1.880337716			14.365					
				Συνολική	Μηνιαία	1260380735	350.11						
				Εξωγήνια	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀						
				Μείση	Μηνιαία	40657443.05	11.29373418						
				Εξωγήνια	Ακτινοβολία	F₀ (monthly)	F₀ (monthly)						

		ΑΥΓΟΥΣΙΟΣ						
n	# ημέρας	γωνία δ (μιοίρες)	δ (rad)	γωνία ω (μιοίρες)	γωνία ω (rad)	Ημερήσια Εξωγήνια Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήνια Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (όρες)
213	1-Aug	17.91318797	0.31264411	104.76705827	1.828530116	39105058.38	10.86251622	13.96894111
214	2-Aug	17.65003711	0.308051261	104.5305227	1.82440179	38974927.49	10.82636875	13.93740303
215	3-Aug	17.38165615	0.303367129	104.2902562	1.820208348	38841844.38	10.78940122	13.90536749
216	4-Aug	17.10812464	0.298593104	104.0463651	1.815951645	38705819.94	10.75161665	13.87284868
217	5-Aug	16.82952363	0.293730599	103.7989549	1.811633524	38566865.92	10.71301831	13.83986066
218	6-Aug	16.54593566	0.288781055	103.5481304	1.80725581	38424994.91	10.6736097	13.80641739
219	7-Aug	16.25744477	0.283745939	103.2939951	1.802820312	38280220.44	10.63339457	13.77253268
220	8-Aug	15.96413645	0.278626743	103.0366514	1.798328817	38132356.99	10.59237694	13.73822019
221	9-Aug	15.66609762	0.273424984	102.7762007	1.793783095	37982020.05	10.55056113	13.70349343
222	10-Aug	15.36341658	0.268142204	102.5127431	1.789184892	37828626.17	10.50795171	13.66836575
223	11-Aug	15.05618303	0.262779967	102.2463773	1.784535932	37672392.98	10.46455536	13.6328503
224	12-Aug	14.744488	0.257339862	101.972007	1.779837914	37513339.24	10.42037201	13.59696009
225	13-Aug	14.42842387	0.251823502	101.7053092	1.775092513	37351484.9	10.37541247	13.5607079
226	14-Aug	14.10808428	0.246232522	101.4307975	1.770301379	37186851.12	10.32968087	13.52410633
227	15-Aug	13.78356417	0.240568577	101.1537585	1.765466136	37019460.34	10.28318343	13.48716779
228	16-Aug	13.45495968	0.234833347	100.8742837	1.760588381	36849336.27	10.23592674	13.44990449
229	17-Aug	13.1223682	0.229028531	100.5924631	1.755669684	36676503.99	10.18791778	13.41232842
230	18-Aug	12.78588828	0.223155848	100.3083852	1.750711589	36500989.94	10.13916387	13.37445136
231	19-Aug	12.44561963	0.21721704	100.0221367	1.745711561	36322821.96	10.08967277	13.33628489
232	20-Aug	12.10166307	0.211213866	99.73380293	1.740683237	36142029.38	10.0394526	13.29784039
233	21-Aug	11.75412053	0.205148104	99.44346754	1.735615928	35958642.96	9.988511933	13.25912901
234	22-Aug	11.40309498	0.199021552	99.15121262	1.730515118	35772695.02	9.936859727	13.22016168
235	23-Aug	11.04869045	0.192836026	98.85711187	1.72538221	35584219.38	9.884505384	13.18094916
236	24-Aug	10.69101196	0.186593359	98.56126474	1.720218585	35393251.48	9.831458743	13.14150196
237	25-Aug	10.33016549	0.1802954	98.26372815	1.715025592	35199828.3	9.777730083	13.10183042
238	26-Aug	9.966257972	0.173944016	97.96458485	1.709804556	35003988.48	9.723330134	13.06194465
239	27-Aug	9.599397234	0.167541088	97.66390924	1.704556777	34805772.29	9.668270081	13.02185457
240	28-Aug	9.229691988	0.161088514	97.36177426	1.699283527	34605221.66	9.612561572	12.98156999
241	29-Aug	8.857251784	0.154588206	97.05825142	1.693986054	34402380.19	9.55621672	12.94110019
242	30-Aug	8.482186986	0.148042091	96.75341082	1.688665581	34197293.18	9.499248105	12.90045478
243	31-Aug	8.104608732	0.141452107	96.44732121	1.68332331	33990007.62	9.441668783	12.85964283
		13.296041319	0.232059699	100.77972375	1.75893800			13.437
				Συνολική	Μηνιαία	1138991445	316.39	
				Εξωγήνια	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀	
				Μέση	Μηνιαία	36741659.53	10.20601654	
				Εξωγήνια	Ακτινοβολία	R₀ (monthly)	R₀ (monthly)	

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ									
n	# ημέρας	γωνία δ (μιοίρες)	δ (rad)	γωνία ω (μιοίρες)	γωνία ω (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία Η ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία Η ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (ώρες)	
244	1-Σεπ	7.724628908	0.134820208	96.14005002	1.677960416	33780572.22	9.383492283	12.81867334	
245	2-Σεπ	7.34236011	0.128148359	95.83166341	1.672578054	33569037.4	9.324732612	12.77755512	
246	3-Σεπ	6.957915612	0.121438537	95.5222263	1.667177358	33355455.31	9.265404253	12.73629684	
247	4-Σεπ	6.571409333	0.114692729	95.21180245	1.661759439	33139879.81	9.205522169	12.69490699	
248	5-Σεπ	6.182955804	0.107912936	94.90045447	1.656325392	32922366.46	9.145101796	12.65339393	
249	6-Σεπ	5.792670132	0.101101166	94.58824393	1.65087629	32702972.57	9.0844159048	12.61176586	
250	7-Σεπ	5.400667967	0.094259438	94.27523136	1.64541319	32481757.12	9.022710312	12.57003085	
251	8-Σεπ	5.007065467	0.087389778	93.96147635	1.639937132	32258780.79	8.960772442	12.52819685	
252	9-Σεπ	4.611979266	0.080494223	93.64703757	1.63444914	32034105.94	8.898362761	12.48627168	
253	10-Σεπ	4.215526435	0.073574816	93.33197286	1.628950224	31807796.57	8.835499048	12.44426305	
254	11-Σεπ	3.817824453	0.066633607	93.0163393	1.623441379	31579918.35	8.772199542	12.40217857	
255	12-Σεπ	3.418991168	0.059672653	92.70019323	1.617923589	31350538.53	8.708482925	12.36002576	
256	13-Σεπ	3.019144761	0.052694017	92.38359036	1.612397827	31119725.97	8.644368325	12.31781205	
257	14-Σεπ	2.618403717	0.045699766	92.06658582	1.606865054	30887551.07	8.579875297	12.27554478	
258	15-Σεπ	2.216886783	0.038691974	91.74923421	1.601326223	30654085.77	8.515023824	12.23323123	
259	16-Σεπ	1.814712938	0.031672716	91.4315897	1.595782281	30419403.48	8.449834301	12.19087863	
260	17-Σεπ	1.412001354	0.024644073	91.11370604	1.590234164	30183579.09	8.384327524	12.14849414	
261	18-Σεπ	1.008871364	0.017608127	90.79563673	1.584682807	29946688.87	8.318524685	12.1060849	
262	19-Σεπ	0.605442423	0.010566964	90.47743497	1.579129139	29708810.47	8.252447351	12.063658	
263	20-Σεπ	0.201834077	0.003522669	90.15915381	1.573574085	29470022.85	8.186117459	12.02122051	
264	21-Σεπ	-0.201834077	-0.003522669	89.84084619	1.568018569	29230406.26	8.119557296	11.97877949	
265	22-Σεπ	-0.605442423	-0.010566964	89.52256503	1.562463515	28990042.16	8.052789489	11.936342	
266	23-Σεπ	-1.008871364	-0.017608127	89.20436327	1.556909846	28749013.16	7.985836988	11.8939151	
267	24-Σεπ	-1.412001354	-0.024644073	88.88629396	1.551358489	28507402.99	7.918723054	11.85150586	
268	25-Σεπ	-1.814712938	-0.031672716	88.5684103	1.545810373	28265296.45	7.851471235	11.80912137	
269	26-Σεπ	-2.216886783	-0.038691974	88.25076579	1.54026643	28022779.29	7.784105358	11.76676877	
270	27-Σεπ	-2.618403717	-0.045699766	87.93341418	1.5347276	27779938.22	7.716649506	11.72445522	
271	28-Σεπ	-3.019144761	-0.052694017	87.61640964	1.529194827	27536860.8	7.649128001	11.68218795	
272	29-Σεπ	-3.418991168	-0.059672653	87.29980677	1.523669064	27293635.4	7.58156539	11.63997424	
273	30-Σεπ	-3.817824453	-0.066633607	86.98366607	1.518151275	27050351.11	7.51398642	11.59782143	
		1.993572635	0.034794406	91.5803386	1.598378439			12.211	
				Συνολική	Μηνιαία	914798774.5	254.11		
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀		
				Συνολική	Μηνιαία	30493292.48	8.470359023		
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	R₀ (monthly)	R₀ (monthly)		

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ										
n	# ημέρας	γωνία δ (μιοίρες)	δ (rad)	γωνία ω (μιοίρες)	γωνία ω (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)		
274	1-Οκτ	-4.215526435	-0.073574816	86.66802714	1.51264243	26807004.96	7.446390266	11.55573695		
275	2-Οκτ	-4.611979266	-0.080494223	86.35296243	1.507143513	26563872.76	7.378853544	11.51372832		
276	3-Οκτ	-5.007065467	-0.087389778	86.03852365	1.501655521	26320952.63	7.311375731	11.47180315		
277	4-Οκτ	-5.400667967	-0.094259438	85.72476864	1.496179463	26078335.89	7.243982193	11.42996915		
278	5-Οκτ	-5.792670132	-0.101101166	85.41175607	1.490716363	25836114.23	7.176698396	11.38823414		
279	6-Οκτ	-6.182955804	-0.107912936	85.09954553	1.485267261	25594379.62	7.109549894	11.34660607		
280	7-Οκτ	-6.571409333	-0.114692729	84.78819755	1.479833214	25353224.27	7.042562298	11.30509301		
281	8-Οκτ	-6.957915612	-0.121438537	84.4777737	1.474415296	25112740.56	6.975761266	11.26370316		
282	9-Οκτ	-7.34236011	-0.128148359	84.16833659	1.469014599	24873020.9	6.909172472	11.22244488		
283	10-Οκτ	-7.724628908	-0.134820208	83.85949498	1.463632238	24634157.74	6.842821594	11.18132666		
284	11-Οκτ	-8.104608732	-0.141452107	83.55267879	1.458269344	24396243.43	6.776734285	11.14035717		
285	12-Οκτ	-8.482186986	-0.148042091	83.24658918	1.452927072	24159370.17	6.710936159	11.09954522		
286	13-Οκτ	-8.857251784	-0.154588206	82.94174858	1.4476066	23923629.95	6.645452765	11.05889981		
287	14-Οκτ	-9.229691988	-0.161088514	82.63822574	1.442309127	23689114.45	6.58030957	11.0184301		
288	15-Οκτ	-9.599397234	-0.167541088	82.33609076	1.437035877	23455914.96	6.515531934	10.97814543		
289	16-Οκτ	-9.966257972	-0.173944016	82.03541515	1.431788098	23224122.35	6.451145097	10.93805535		
290	17-Οκτ	-10.33016549	-0.1802954	81.73627185	1.426567062	22993826.94	6.387174151	10.89816958		
291	18-Οκτ	-10.69101196	-0.186593359	81.43873526	1.421374069	22765118.49	6.323644024	10.85849804		
292	19-Οκτ	-11.04869045	-0.192836026	81.1428813	1.416210443	22538086.07	6.260579464	10.81905084		
293	20-Οκτ	-11.40309498	-0.199021552	80.84878738	1.411077536	22312818.04	6.198005012	10.77983832		
294	21-Οκτ	-11.75412053	-0.205148104	80.55653246	1.405976725	22089401.96	6.13594499	10.74087099		
295	22-Οκτ	-12.10166307	-0.211213866	80.26619707	1.400909417	21867924.54	6.074423482	10.70215961		
296	23-Οκτ	-12.44561963	-0.21721704	79.9778633	1.395877043	21648471.53	6.013464313	10.66371511		
297	24-Οκτ	-12.78588828	-0.223155848	79.69161482	1.390881065	21431127.73	5.953091036	10.62554864		
298	25-Οκτ	-13.1223682	-0.229028531	79.40753688	1.385922969	21215976.88	5.893326912	10.58767158		
299	26-Οκτ	-13.45495968	-0.234833347	79.12571632	1.381004273	21003101.63	5.834194897	10.55009551		
300	27-Οκτ	-13.78356417	-0.240568577	78.84624155	1.376126518	20792583.45	5.775717624	10.51283221		
301	28-Οκτ	-14.10808428	-0.246232522	78.56920253	1.371291275	20584502.61	5.717917391	10.47589367		
302	29-Οκτ	-14.42842387	-0.251823502	78.29469078	1.366500141	20378938.12	5.660816144	10.4392921		
303	30-Οκτ	-14.744488	-0.257339862	78.02279934	1.36175474	20175967.68	5.604435466	10.40303991		
304	31-Οκτ	-15.05618303	-0.262779967	77.75362272	1.357056722	19975667.63	5.548796565	10.3671497		
		-9.84854514	-0.171889539	82.09739623	1.432869871			10.946		
				Συνολική	Μηνιαία	721795712.2	200.50			
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	ΣΗ ₀	ΣΗ ₀			
				Μέση	Μηνιαία	23283732.65	6.467703514			
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	Ρ ₀ (monthly)	Ρ ₀ (monthly)			

n	# ημέρας	γωνία δ (μιοίρες)	δ (rad)	γωνία ωσ (μιοίρες)	γωνία ωσ (rad)	NOΕΜΒΡΙΟΣ		Διάρκεια Ημέρας N (Ωρες)
						Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H ₀ (daily) (kWh/m ²)	
305	1-Νοε	-15.36341658	-0.268142204	77.4872569	1.352407761	19778202.07	5.493945018	10.33163425
306	2-Νοε	-15.66609762	-0.273424984	77.2237927	1.347809558	19583466.03	5.439851676	10.29650657
307	3-Νοε	-15.96413645	-0.278626743	76.96334859	1.343263836	19391620.88	5.386561357	10.26177981
308	4-Νοε	-16.25744477	-0.283745939	76.70600493	1.338772342	19202737.15	5.334093652	10.22746732
309	5-Νοε	-16.54593566	-0.288781055	76.45186959	1.334336844	19016883.81	5.282467724	10.19358261
310	6-Νοε	-16.822952363	-0.293730599	76.20104506	1.32995913	18834128.28	5.231702299	10.16013934
311	7-Νοε	-17.10812464	-0.298593104	75.95363493	1.325641008	18654536.38	5.181815662	10.12715132
312	8-Νοε	-17.38165615	-0.303367129	75.70974383	1.321384306	18478172.33	5.132825647	10.09463251
313	9-Νοε	-17.65003711	-0.308051261	75.46947728	1.317190863	18305098.68	5.084749633	10.06259697
314	10-Νοε	-17.91318797	-0.31264411	75.23294166	1.313062538	18135376.34	5.03760454	10.03105889
315	11-Νοε	-18.17103077	-0.317144315	75.00024408	1.309001199	17969064.57	4.991406825	10.00003254
316	12-Νοε	-18.4234891	-0.321550545	74.77149226	1.305008727	17806220.92	4.946172477	9.969532301
317	13-Νοε	-18.67048816	-0.325861491	74.54679442	1.301087009	17646901.26	4.901917018	9.939572589
318	14-Νοε	-18.91195474	-0.330075878	74.32625914	1.297237943	17491159.79	4.858655497	9.910167886
319	15-Νοε	-19.14781731	-0.334192457	74.10999528	1.293463426	17339048.97	4.816402493	9.881332703
320	16-Νοε	-19.37800596	-0.338210006	73.89811176	1.289765361	17190619.61	4.775172114	9.853081567
321	17-Νοε	-19.60245249	-0.342127337	73.69071748	1.286145648	17045920.78	4.734977996	9.825428997
322	18-Νοε	-19.82109039	-0.345943289	73.48792114	1.282606184	16904999.9	4.695833306	9.798389486
323	19-Νοε	-20.03385488	-0.34965673	73.28983111	1.279148861	16767902.68	4.657750745	9.771977481
324	20-Νοε	-20.2406829	-0.35326656	73.09655521	1.27575556	16634673.17	4.620742547	9.746207361
325	21-Νοε	-20.44151317	-0.356771709	72.9082006	1.272488152	16505353.75	4.584820485	9.721093413
326	22-Νοε	-20.63628618	-0.360171139	72.72487358	1.269288492	16379985.15	4.549995874	9.696649811
327	23-Νοε	-20.82494422	-0.363463843	72.54667942	1.266178417	16258606.48	4.516279577	9.67289059
328	24-Νοε	-21.00743137	-0.366648845	72.37372218	1.263159744	16141255.22	4.483682006	9.649829623
329	25-Νοε	-21.18369356	-0.3697252	72.20610449	1.260234263	16027967.27	4.452213131	9.627480599
330	26-Νοε	-21.35367858	-0.372691999	72.04392744	1.25740374	15918776.94	4.421882484	9.605856993
331	27-Νοε	-21.515733603	-0.37554836	71.88729032	1.254669906	15813716.99	4.392699165	9.584972042
332	28-Νοε	-21.67461744	-0.378293438	71.73629043	1.252034461	15712818.65	4.364671848	9.564838724
333	29-Νοε	-21.82547618	-0.38092642	71.59102294	1.249499065	15616111.64	4.337808789	9.545469726
334	30-Νοε	-21.96986757	-0.383446525	71.45158066	1.247065338	15523624.19	4.312117831	9.526877421
		-19.05050905	-0.332494107	74.16955787	1.294502989			9.889
				Συνολική	Μηνιαία	522074949.9	145.02	
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀	
				Μέση	Μηνιαία	17402498.33	4.834027314	
				Εξωγήινη	Ακτινοβολία	F₀ (monthly)	F₀ (monthly)	

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ									
# ημέρας	γωνία δ (μοίρες)	δ (rad)	γωνία ω (μοίρες)	γωνία ωs (rad)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H_0 (daily) (J/m ²)	Ημερήσια Εξωγήινη Ακτινοβολία H_0 (daily) (kWh/m ²)	Διάρκεια Ημέρας N (όρες)		
1-Δεκ	-22.10774881	-0.385853007	71.31805384	1.244734856	15435383.09	4.287606413	9.509073845		
2-Δεκ	-22.23907905	-0.388145152	71.19053	1.242509145	15351413.68	4.264281577	9.492070667		
3-Δεκ	-22.36381937	-0.390322281	71.06909374	1.240389682	15271739.89	4.242149971	9.475879165		
4-Δεκ	-22.48193281	-0.39238375	70.95382653	1.23837789	15196384.3	4.221217861	9.460510204		
5-Δεκ	-22.59338436	-0.394328946	70.84480656	1.236475132	15125368.1	4.201491139	9.445974208		
6-Δεκ	-22.69814101	-0.396157295	70.74210854	1.23468714	15058711.17	4.182975324	9.432281139		
7-Δεκ	-22.79617171	-0.397868253	70.64580353	1.233001874	14996432.07	4.165675575	9.41944047		
8-Δεκ	-22.88744741	-0.399461315	70.55595876	1.231433787	14938548.1	4.149596695	9.407461168		
9-Δεκ	-22.97194107	-0.400936007	70.47263752	1.229979557	14885075.29	4.134743136	9.39635167		
10-Δεκ	-23.04962764	-0.402291894	70.39589895	1.228640216	14836028.43	4.121119009	9.386119859		
11-Δεκ	-23.12048412	-0.403528572	70.3257979	1.227416722	14791421.12	4.10872809	9.376773053		
12-Δεκ	-23.18448949	-0.404645677	70.26238483	1.226309956	14751265.75	4.097573819	9.368317978		
13-Δεκ	-23.2416248	-0.405642876	70.20570568	1.225320718	14715573.53	4.087659314	9.360760757		
14-Δεκ	-23.29187312	-0.406519875	70.1558017	1.224449729	14684354.53	4.07898737	9.354106893		
15-Δεκ	-23.33521955	-0.407276413	70.11270941	1.223697627	14657617.67	4.071560465	9.348361255		
16-Δεκ	-23.37165125	-0.407912266	70.07646048	1.223064963	14635370.75	4.065380764	9.343528063		
17-Δεκ	-23.40115742	-0.408427246	70.04708162	1.222522206	14617620.44	4.060450121	9.339610883		
18-Δεκ	-23.42372933	-0.4088212	70.02459458	1.222159733	14604372.31	4.056770086	9.33661261		
19-Δεκ	-23.43936028	-0.409094011	70.00901602	1.221887836	14595630.84	4.054341899	9.334535469		
20-Δεκ	-23.44804565	-0.4092456	70.0003575	1.221736716	14591399.4	4.053166501	9.3333381		
21-Δεκ	-23.44978285	-0.40927592	69.99862548	1.221706486	14591680.29	4.053244526	9.333150064		
22-Δεκ	-23.44457137	-0.409184962	70.00382123	1.221797169	14596474.71	4.054576309	9.333842831		
23-Δεκ	-23.43241276	-0.408972754	70.01594089	1.222008697	14605782.77	4.057161882	9.335458786		
24-Δεκ	-23.41331063	-0.408639359	70.03497546	1.222340913	14619603.49	4.06100097	9.337996728		
25-Δεκ	-23.38727062	-0.408184875	70.06091081	1.222795571	14637934.79	4.066092997	9.341454775		
26-Δεκ	-23.35430046	-0.407609438	70.09372774	1.223366334	14660773.48	4.072437078	9.345830365		
27-Δεκ	-23.31440992	-0.406913216	70.133402	1.224058781	14688115.26	4.080032018	9.351120267		
28-Δεκ	-23.26761081	-0.406096418	70.1799044	1.2248704	14719954.71	4.088876309	9.357320586		
29-Δεκ	-23.21391701	-0.405159284	70.23320083	1.225800599	14756285.25	4.098968124	9.364426777		
30-Δεκ	-23.15334442	-0.404102093	70.29325239	1.226848696	14797099.15	4.110305319	9.372433652		
31-Δεκ	-23.085911	-0.402925158	70.36001547	1.228013932	14842387.5	4.122885417	9.381335396		
	-23.0956055	-0.40309436	70.34891627	1.227820214			9.380		
			Συνολική	Μηνιαία	459255801.9	127.57			
			Εξωγήινη	Ακτινοβολία	ΣΗ₀	ΣΗ₀			
			Μέση	Μηνιαία	14814703.29	4.115195357			
			Εξωγήινη	Ακτινοβολία	Π₀ (monthly)	Π₀ (monthly)			

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)										DNI		
			δ = -0.3638518										I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z	
			H	H _d	r _t	r _{t+}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d+}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)				
04:00-05:00	-112.5	-1.963	1.822	0.908	-0.047	0.000	0.000	-0.156	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.501
05:00-06:00	-97.5	-1.702	1.822	0.908	-0.044	0.000	0.000	-0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.316
06:00-07:00	-82.5	-1.440	1.822	0.908	-0.023	0.000	0.000	-0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.125
07:00-08:00	-67.5	-1.178	1.822	0.908	0.014	0.014	0.025	0.019	0.019	0.017	0.008	0.131	0.060		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	1.822	0.908	0.060	0.060	0.110	0.070	0.070	0.064	0.046	0.203	0.226		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	1.822	0.908	0.108	0.108	0.197	0.112	0.112	0.102	0.095	0.262	0.362		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	1.822	0.908	0.147	0.147	0.268	0.142	0.142	0.129	0.139	0.303	0.458		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	1.822	0.908	0.169	0.169	0.308	0.158	0.158	0.143	0.164	0.324	0.507		
12:00-13:00	7.5	0.131	1.822	0.908	0.169	0.169	0.308	0.158	0.158	0.143	0.164	0.324	0.507		
13:00-14:00	22.5	0.393	1.822	0.908	0.147	0.147	0.268	0.142	0.142	0.129	0.139	0.303	0.458		
14:00-15:00	37.5	0.654	1.822	0.908	0.108	0.108	0.197	0.112	0.112	0.102	0.095	0.262	0.362		
15:00-16:00	52.5	0.916	1.822	0.908	0.060	0.060	0.110	0.070	0.070	0.064	0.046	0.203	0.226		
16:00-17:00	67.5	1.178	1.822	0.908	0.014	0.014	0.025	0.019	0.019	0.017	0.008	0.131	0.060		
17:00-18:00	82.5	1.440	1.822	0.908	-0.023	0.000	0.000	-0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.125	
18:00-19:00	97.5	1.702	1.822	0.908	-0.044	0.000	0.000	-0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.316	
19:00-20:00	112.5	1.963	1.822	0.908	-0.047	0.000	0.000	-0.156	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.501	
		ω ₃ = 1.265													
		συν/στης α = 0.518													
		συν/στης β = 0.558													

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ (διάμεσος 14η ημέρα)										DNI		
			δ = -0.232569606										I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z	
			H	H _d	r _t	r _{t+}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d+}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)				
04:00-05:00	-112.5	-1.963	2.409	1.183	-0.039	0.000	0.000	-0.103	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.435
05:00-06:00	-97.5	-1.702	2.409	1.183	-0.029	0.000	0.000	-0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.242
06:00-07:00	-82.5	-1.440	2.409	1.183	-0.007	0.000	0.000	-0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.043
07:00-08:00	-67.5	-1.178	2.409	1.183	0.027	0.027	0.065	0.035	0.035	0.042	0.023	0.157	0.150		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	2.409	1.183	0.067	0.067	0.162	0.076	0.076	0.090	0.072	0.222	0.322		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	2.409	1.183	0.107	0.107	0.257	0.110	0.110	0.130	0.128	0.275	0.463		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	2.409	1.183	0.139	0.139	0.334	0.133	0.133	0.158	0.176	0.313	0.563		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	2.409	1.183	0.156	0.156	0.376	0.146	0.146	0.172	0.204	0.332	0.615		
12:00-13:00	7.5	0.131	2.409	1.183	0.156	0.156	0.376	0.146	0.146	0.172	0.204	0.332	0.615		
13:00-14:00	22.5	0.393	2.409	1.183	0.139	0.139	0.334	0.133	0.133	0.158	0.176	0.313	0.563		
14:00-15:00	37.5	0.654	2.409	1.183	0.107	0.107	0.257	0.110	0.110	0.130	0.128	0.275	0.463		
15:00-16:00	52.5	0.916	2.409	1.183	0.067	0.067	0.162	0.076	0.076	0.090	0.072	0.222	0.322		
16:00-17:00	67.5	1.178	2.409	1.183	0.027	0.027	0.065	0.035	0.035	0.042	0.023	0.157	0.150		
17:00-18:00	82.5	1.440	2.409	1.183	-0.007	0.000	0.000	-0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.043	
18:00-19:00	97.5	1.702	2.409	1.183	-0.029	0.000	0.000	-0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.242	
19:00-20:00	112.5	1.963	2.409	1.183	-0.039	0.000	0.000	-0.103	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.435	
		ω ₃ = 1.38234847													
		συν/στης α = 0.574075681													
		συν/στης β = 0.504018865													

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΑΡΤΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)										DNI		
			δ = -0.041699033										I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z	
			H	H _d	r _t	r _{t+}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d+}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)				
04:00-05:00	-112.5	-1.963	3.780	1.687	-0.027	0.000	0.000	-0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.326
05:00-06:00	-97.5	-1.702	3.780	1.687	-0.013	0.000	0.000	-0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.128
06:00-07:00	-82.5	-1.440	3.780	1.687	0.009	0.009	0.036	0.013	0.013	0.023	0.013	0.170	0.077		
07:00-08:00	-67.5	-1.178	3.780	1.687	0.039	0.039	0.148	0.048	0.048	0.081	0.067	0.243	0.274		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	3.780	1.687	0.072	0.072	0.274	0.079	0.079	0.134	0.140	0.309	0.452		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	3.780	1.687	0.104	0.104	0.393	0.105	0.105	0.177	0.216	0.362	0.597		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	3.780	1.687	0.129	0.129	0.487	0.123	0.123	0.207	0.280	0.400	0.699		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	3.780	1.687	0.143	0.143	0.539	0.132	0.132	0.223	0.316	0.420	0.752		
12:00-13:00	7.5	0.131	3.780	1.687	0.143	0.143	0.539	0.132	0.132	0.223	0.316	0.420	0.752		
13:00-14:00	22.5	0.393	3.780	1.687	0.129	0.129	0.487	0.123	0.123	0.207	0.280	0.400	0.699		
14:00-15:00	37.5	0.654	3.780	1.687	0.104	0.104	0.393	0.105	0.105	0.177	0.216	0.362	0.597		
15:00-16:00	52.5	0.916	3.780	1.687	0.072	0.072	0.274	0.079	0.079	0.134	0.140	0.309	0.452		
16:00-17:00	67.5	1.178	3.780	1.687	0.039	0.039	0.148	0.048	0.048	0.081	0.067	0.243	0.274		
17:00-18:00	82.5	1.440	3.780	1.687	0.009	0.009	0.036	0.013	0.013	0.023	0.013	0.170	0.077		
18:00-19:00	97.5	1.702	3.780	1.687	-0.013	0.000	0.000	-0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.128	
19:00-20:00	112.5	1.963	3.780	1.687	-0.027	0.000	0.000	-0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.326	
		ω ₃ = 1.537723093													
		συν/στης α = 0.645385909													
		συν/στης β = 0.436248559													

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΑΠΡΙΛΙΟΣ (διάμεσος 15η ημέρα)												
			δ = 0.165687558											DNI	
			H	H _d	r _t	r _{t+}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d+}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z		
04:00-05:00	-112.5	-1.963	5.499	2.034	-0.015	0.000	0.000	0.000	-0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.194
05:00-06:00	-97.5	-1.702	5.499	2.034	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.320	0.001
06:00-07:00	-82.5	-1.440	5.499	2.034	0.022	0.022	0.119	0.028	0.028	0.028	0.058	0.061	0.301	0.203	
07:00-08:00	-67.5	-1.178	5.499	2.034	0.047	0.047	0.261	0.055	0.055	0.113	0.148	0.372	0.399		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	5.499	2.034	0.075	0.075	0.412	0.080	0.080	0.162	0.250	0.436	0.574		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	5.499	2.034	0.100	0.100	0.552	0.100	0.100	0.203	0.350	0.488	0.717		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	5.499	2.034	0.120	0.120	0.660	0.114	0.114	0.231	0.429	0.525	0.818		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	5.499	2.034	0.131	0.131	0.719	0.121	0.121	0.246	0.473	0.544	0.870		
12:00-13:00	7.5	0.131	5.499	2.034	0.131	0.131	0.719	0.121	0.121	0.246	0.473	0.544	0.870		
13:00-14:00	22.5	0.393	5.499	2.034	0.120	0.120	0.660	0.114	0.114	0.231	0.429	0.525	0.818		
14:00-15:00	37.5	0.654	5.499	2.034	0.100	0.100	0.552	0.100	0.100	0.203	0.350	0.488	0.717		
15:00-16:00	52.5	0.916	5.499	2.034	0.075	0.075	0.412	0.080	0.080	0.162	0.250	0.436	0.574		
16:00-17:00	67.5	1.178	5.499	2.034	0.047	0.047	0.261	0.055	0.055	0.113	0.148	0.372	0.399		
17:00-18:00	82.5	1.440	5.499	2.034	0.022	0.022	0.119	0.028	0.028	0.058	0.061	0.301	0.203		
18:00-19:00	97.5	1.702	5.499	2.034	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.320	0.001	
19:00-20:00	112.5	1.963	5.499	2.034	-0.015	0.000	0.000	-0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.194	
ω _s = 1.703592366 συν/στίσης α = 0.715187321 συν/στίσης β = 0.36991217															

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΜΑΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)												
			δ = 0.328223443											DNI	
			H	H _d	r _t	r _{t+}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d+}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z		
04:00-05:00	-112.5	-1.963	6.675	2.236	-0.007	0.000	0.000	-0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.085	
05:00-06:00	-97.5	-1.702	6.675	2.236	0.009	0.009	0.060	0.012	0.012	0.028	0.032	0.316	0.103		
06:00-07:00	-82.5	-1.440	6.675	2.236	0.029	0.029	0.194	0.036	0.036	0.080	0.114	0.383	0.297		
07:00-08:00	-67.5	-1.178	6.675	2.236	0.052	0.052	0.347	0.058	0.058	0.131	0.217	0.448	0.484		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	6.675	2.236	0.076	0.076	0.506	0.079	0.079	0.176	0.330	0.506	0.652		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	6.675	2.236	0.097	0.097	0.650	0.095	0.095	0.213	0.437	0.553	0.789		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	6.675	2.236	0.114	0.114	0.760	0.107	0.107	0.239	0.520	0.587	0.886		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	6.675	2.236	0.123	0.123	0.819	0.113	0.113	0.253	0.566	0.605	0.937		
12:00-13:00	7.5	0.131	6.675	2.236	0.123	0.123	0.819	0.113	0.113	0.253	0.566	0.605	0.937		
13:00-14:00	22.5	0.393	6.675	2.236	0.114	0.114	0.760	0.107	0.107	0.239	0.520	0.587	0.886		
14:00-15:00	37.5	0.654	6.675	2.236	0.097	0.097	0.650	0.095	0.095	0.213	0.437	0.553	0.789		
15:00-16:00	52.5	0.916	6.675	2.236	0.076	0.076	0.506	0.079	0.079	0.176	0.330	0.506	0.652		
16:00-17:00	67.5	1.178	6.675	2.236	0.052	0.052	0.347	0.058	0.058	0.131	0.217	0.448	0.484		
17:00-18:00	82.5	1.440	6.675	2.236	0.029	0.029	0.194	0.036	0.036	0.080	0.114	0.383	0.297		
18:00-19:00	97.5	1.702	6.675	2.236	0.009	0.009	0.060	0.012	0.012	0.028	0.032	0.316	0.103		
19:00-20:00	112.5	1.963	6.675	2.236	-0.007	0.000	0.000	-0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.085		
ω _s = 1.843231407 συν/στίσης α = 0.76750626 συν/στίσης β = 0.320190402															

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΙΟΥΝΙΟΣ (διάμεσος 15η ημέρα)												
			δ = 0.402770658											DNI	
			H	H _d	r _t	r _{t+}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d+}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z		
04:00-05:00	-112.5	-1.963	7.360	2.260	-0.003	0.000	0.000	-0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.034	
05:00-06:00	-97.5	-1.702	7.360	2.260	0.013	0.013	0.094	0.017	0.017	0.038	0.056	0.375	0.148		
06:00-07:00	-82.5	-1.440	7.360	2.260	0.032	0.032	0.235	0.039	0.039	0.087	0.148	0.440	0.337		
07:00-08:00	-67.5	-1.178	7.360	2.260	0.054	0.054	0.395	0.059	0.059	0.134	0.261	0.503	0.519		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	7.360	2.260	0.076	0.076	0.558	0.078	0.078	0.176	0.382	0.560	0.682		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	7.360	2.260	0.096	0.096	0.705	0.093	0.093	0.211	0.494	0.606	0.816		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	7.360	2.260	0.111	0.111	0.817	0.104	0.104	0.235	0.581	0.639	0.910		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	7.360	2.260	0.119	0.119	0.877	0.110	0.110	0.248	0.629	0.656	0.959		
12:00-13:00	7.5	0.131	7.360	2.260	0.119	0.119	0.877	0.110	0.110	0.248	0.629	0.656	0.959		
13:00-14:00	22.5	0.393	7.360	2.260	0.111	0.111	0.817	0.104	0.104	0.235	0.581	0.639	0.910		
14:00-15:00	37.5	0.654	7.360	2.260	0.096	0.096	0.705	0.093	0.093	0.211	0.494	0.606	0.816		
15:00-16:00	52.5	0.916	7.360	2.260	0.076	0.076	0.558	0.078	0.078	0.176	0.382	0.560	0.682		
16:00-17:00	67.5	1.178	7.360	2.260	0.054	0.054	0.395	0.059	0.059	0.134	0.261	0.503	0.519		
17:00-18:00	82.5	1.440	7.360	2.260	0.032	0.032	0.235	0.039	0.039	0.087	0.148	0.440	0.337		
18:00-19:00	97.5	1.702	7.360	2.260	0.013	0.013	0.094	0.017	0.017	0.038	0.056	0.375	0.148		
19:00-20:00	112.5	1.963	7.360	2.260	-0.003	0.000	0.000	-0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.034		
ω _s = 1.913 συν/στίσης α = 0.791 συν/στίσης β = 0.298															

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΙΟΥΛΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)												
			δ = 0.368290083											DNI	
			H	H _d	r _t	r _{t*}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d*}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z		
04:00-05:00	-112.5	-1.963	7.187	2.202	-0.004	0.000	0.000	-0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.057
05:00-06:00	-97.5	-1.702	7.187	2.202	0.011	0.011	0.079	0.015	0.015	0.033	0.047	0.366	0.127	0.366	0.127
06:00-07:00	-82.5	-1.440	7.187	2.202	0.031	0.031	0.220	0.037	0.037	0.082	0.138	0.433	0.319	0.433	0.319
07:00-08:00	-67.5	-1.178	7.187	2.202	0.053	0.053	0.381	0.059	0.059	0.130	0.251	0.498	0.503	0.498	0.503
08:00-09:00	-52.5	-0.916	7.187	2.202	0.076	0.076	0.545	0.078	0.078	0.173	0.373	0.557	0.669	0.557	0.669
09:00-10:00	-37.5	-0.654	7.187	2.202	0.097	0.097	0.694	0.094	0.094	0.208	0.486	0.605	0.804	0.605	0.804
10:00-11:00	-22.5	-0.393	7.187	2.202	0.112	0.112	0.807	0.105	0.105	0.232	0.575	0.639	0.900	0.639	0.900
11:00-12:00	-7.5	-0.131	7.187	2.202	0.121	0.121	0.868	0.111	0.111	0.245	0.623	0.656	0.949	0.656	0.949
12:00-13:00	7.5	0.131	7.187	2.202	0.121	0.121	0.868	0.111	0.111	0.245	0.623	0.656	0.949	0.656	0.949
13:00-14:00	22.5	0.393	7.187	2.202	0.112	0.112	0.807	0.105	0.105	0.232	0.575	0.639	0.900	0.639	0.900
14:00-15:00	37.5	0.654	7.187	2.202	0.097	0.097	0.694	0.094	0.094	0.208	0.486	0.605	0.804	0.605	0.804
15:00-16:00	52.5	0.916	7.187	2.202	0.076	0.076	0.545	0.078	0.078	0.173	0.373	0.557	0.669	0.557	0.669
16:00-17:00	67.5	1.178	7.187	2.202	0.053	0.053	0.381	0.059	0.059	0.130	0.251	0.498	0.503	0.498	0.503
17:00-18:00	82.5	1.440	7.187	2.202	0.031	0.031	0.220	0.037	0.037	0.082	0.138	0.433	0.319	0.433	0.319
18:00-19:00	97.5	1.702	7.187	2.202	0.011	0.011	0.079	0.015	0.015	0.033	0.047	0.366	0.127	0.366	0.127
19:00-20:00	112.5	1.963	7.187	2.202	-0.004	0.000	0.000	-0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.057
ω _s = 1.880 συν/στης α= 0.780 συν/στης β= 0.308															

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)												
			δ = 0.232059699											DNI	
			H	H _d	r _t	r _{t*}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d*}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z		
04:00-05:00	-112.5	-1.963	6.468	1.997	-0.012	0.000	0.000	-0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.150
05:00-06:00	-97.5	-1.702	6.468	1.997	0.004	0.004	0.025	0.006	0.006	0.011	0.014	0.327	0.043	0.327	0.043
06:00-07:00	-82.5	-1.440	6.468	1.997	0.025	0.025	0.160	0.032	0.032	0.063	0.097	0.401	0.242	0.401	0.242
07:00-08:00	-67.5	-1.178	6.468	1.997	0.050	0.050	0.320	0.057	0.057	0.114	0.207	0.475	0.435	0.475	0.435
08:00-09:00	-52.5	-0.916	6.468	1.997	0.075	0.075	0.488	0.079	0.079	0.159	0.329	0.542	0.608	0.542	0.608
09:00-10:00	-37.5	-0.654	6.468	1.997	0.099	0.099	0.642	0.098	0.098	0.195	0.446	0.596	0.749	0.596	0.749
10:00-11:00	-22.5	-0.393	6.468	1.997	0.117	0.117	0.760	0.111	0.111	0.221	0.539	0.635	0.848	0.635	0.848
11:00-12:00	-7.5	-0.131	6.468	1.997	0.127	0.127	0.824	0.118	0.118	0.235	0.589	0.655	0.900	0.655	0.900
12:00-13:00	7.5	0.131	6.468	1.997	0.127	0.127	0.824	0.118	0.118	0.235	0.589	0.655	0.900	0.655	0.900
13:00-14:00	22.5	0.393	6.468	1.997	0.117	0.117	0.760	0.111	0.111	0.221	0.539	0.635	0.848	0.635	0.848
14:00-15:00	37.5	0.654	6.468	1.997	0.099	0.099	0.642	0.098	0.098	0.195	0.446	0.596	0.749	0.596	0.749
15:00-16:00	52.5	0.916	6.468	1.997	0.075	0.075	0.488	0.079	0.079	0.159	0.329	0.542	0.608	0.542	0.608
16:00-17:00	67.5	1.178	6.468	1.997	0.050	0.050	0.320	0.057	0.057	0.114	0.207	0.475	0.435	0.475	0.435
17:00-18:00	82.5	1.440	6.468	1.997	0.025	0.025	0.160	0.032	0.032	0.063	0.097	0.401	0.242	0.401	0.242
18:00-19:00	97.5	1.702	6.468	1.997	0.004	0.004	0.025	0.006	0.006	0.011	0.014	0.327	0.043	0.327	0.043
19:00-20:00	112.5	1.963	6.468	1.997	-0.012	0.000	0.000	-0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.150
ω _s = 1.759 συν/στης α= 0.737 συν/στης β= 0.349															

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ (διάμεσος 15η ημέρα)												
			δ = 0.034794406											DNI	
			H	H _d	r _t	r _{t*}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d*}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	cosθ _z		
04:00-05:00	-112.5	-1.963	5.055	1.724	-0.023	0.000	0.000	-0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.279
05:00-06:00	-97.5	-1.702	5.055	1.724	-0.008	0.000	0.000	-0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.081
06:00-07:00	-82.5	-1.440	5.055	1.724	0.014	0.014	0.073	0.020	0.020	0.034	0.039	0.311	0.124	0.311	0.124
07:00-08:00	-67.5	-1.178	5.055	1.724	0.043	0.043	0.216	0.051	0.051	0.089	0.127	0.394	0.322	0.394	0.322
08:00-09:00	-52.5	-0.916	5.055	1.724	0.074	0.074	0.372	0.080	0.080	0.138	0.234	0.469	0.499	0.469	0.499
09:00-10:00	-37.5	-0.654	5.055	1.724	0.103	0.103	0.519	0.103	0.103	0.177	0.342	0.531	0.644	0.531	0.644
10:00-11:00	-22.5	-0.393	5.055	1.724	0.125	0.125	0.634	0.119	0.119	0.206	0.429	0.574	0.747	0.574	0.747
11:00-12:00	-7.5	-0.131	5.055	1.724	0.138	0.138	0.697	0.128	0.128	0.220	0.477	0.597	0.800	0.597	0.800
12:00-13:00	7.5	0.131	5.055	1.724	0.138	0.138	0.697	0.128	0.128	0.220	0.477	0.597	0.800	0.597	0.800
13:00-14:00	22.5	0.393	5.055	1.724	0.125	0.125	0.634	0.119	0.119	0.206	0.429	0.574	0.747	0.574	0.747
14:00-15:00	37.5	0.654	5.055	1.724	0.103	0.103	0.519	0.103	0.103	0.177	0.342	0.531	0.644	0.531	0.644
15:00-16:00	52.5	0.916	5.055	1.724	0.074	0.074	0.372	0.080	0.080	0.138	0.234	0.469	0.499	0.469	0.499
16:00-17:00	67.5	1.178	5.055	1.724	0.043	0.043	0.216	0.051	0.051	0.089	0.127	0.394	0.322	0.394	0.322
17:00-18:00	82.5	1.440	5.055	1.724	0.014	0.014	0.073	0.020	0.020	0.034	0.039	0.311	0.124	0.311	0.124
18:00-19:00	97.5	1.702	5.055	1.724	-0.008	0.000	0.000	-0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.081
19:00-20:00	112.5	1.963	5.055	1.724	-0.023	0.000	0.000	-0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.279
ω _s = 1.598 συν/στης α= 0.672 συν/στης β= 0.411															

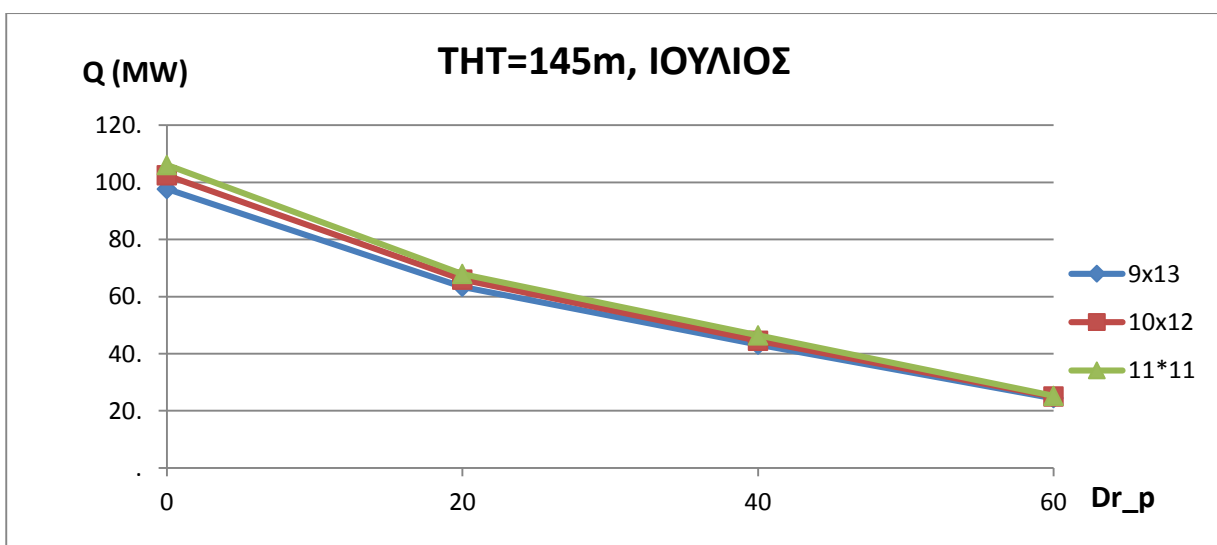
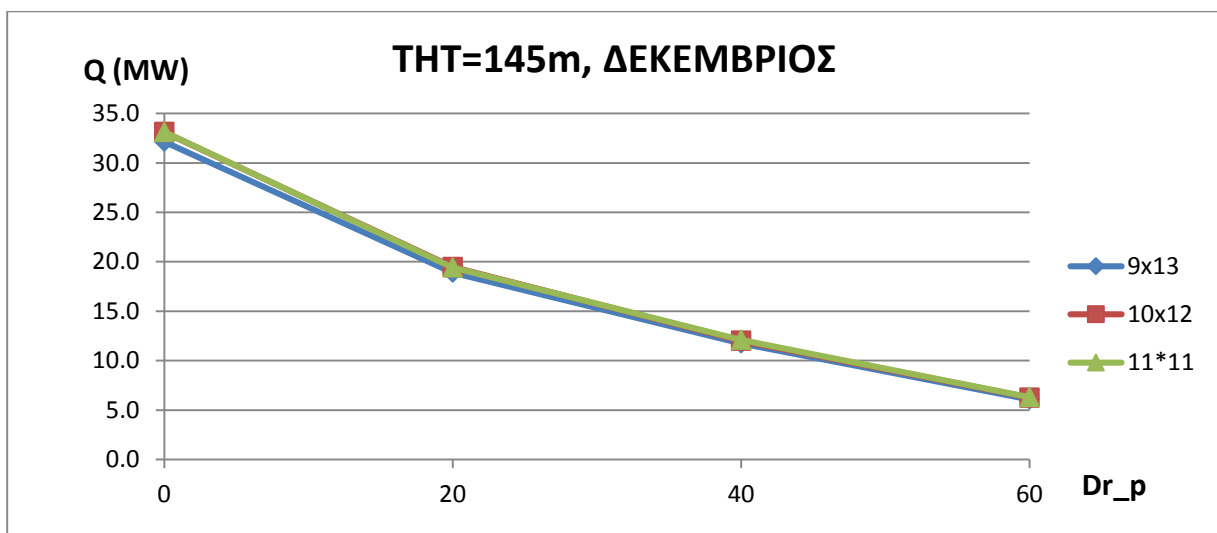
ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)												
			δ = -0.171889539												
			H̄	H̄ _d	r _t	r _{t±}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d±}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	DNI	cosθ _z	
04:00-05:00	-112.5	-1.963	3.347	1.381	-0.035	0.000	0.000	-0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.402
05:00-06:00	-97.5	-1.702	3.347	1.381	-0.024	0.000	0.000	-0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.207
06:00-07:00	-82.5	-1.440	3.347	1.381	-0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.005
07:00-08:00	-67.5	-1.178	3.347	1.381	0.032	0.032	0.106	0.040	0.040	0.056	0.050	0.263	0.190		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	3.347	1.381	0.069	0.069	0.232	0.078	0.078	0.107	0.124	0.341	0.365		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	3.347	1.381	0.106	0.106	0.355	0.108	0.108	0.149	0.205	0.405	0.508		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	3.347	1.381	0.135	0.135	0.453	0.130	0.130	0.179	0.274	0.449	0.609		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	3.347	1.381	0.151	0.151	0.507	0.141	0.141	0.195	0.312	0.473	0.661		
12:00-13:00	7.5	0.131	3.347	1.381	0.151	0.151	0.507	0.141	0.141	0.195	0.312	0.473	0.661		
13:00-14:00	22.5	0.393	3.347	1.381	0.135	0.135	0.453	0.130	0.130	0.179	0.274	0.449	0.609		
14:00-15:00	37.5	0.654	3.347	1.381	0.106	0.106	0.355	0.108	0.108	0.149	0.205	0.405	0.508		
15:00-16:00	52.5	0.916	3.347	1.381	0.069	0.069	0.232	0.078	0.078	0.107	0.124	0.341	0.365		
16:00-17:00	67.5	1.178	3.347	1.381	0.032	0.032	0.106	0.040	0.040	0.056	0.050	0.263	0.190		
17:00-18:00	82.5	1.440	3.347	1.381	-0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.005		
18:00-19:00	97.5	1.702	3.347	1.381	-0.024	0.000	0.000	-0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.207		
19:00-20:00	112.5	1.963	3.347	1.381	-0.035	0.000	0.000	-0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.402		
ω _s =		1.433													
συν/στης α=		0.598													
συν/στης β=		0.481													

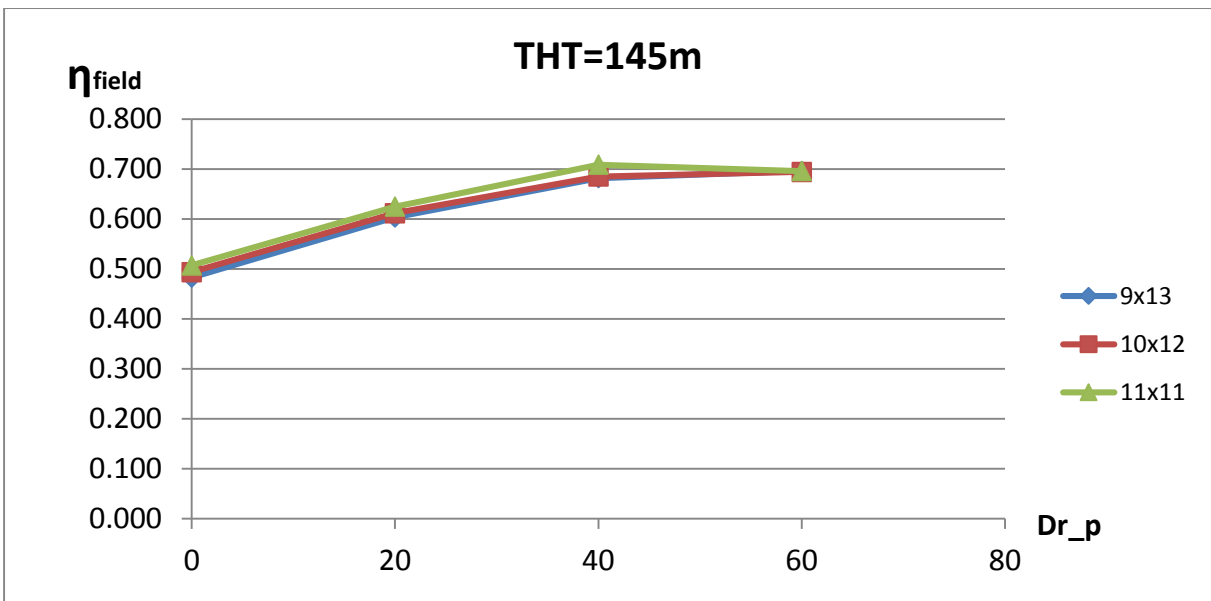
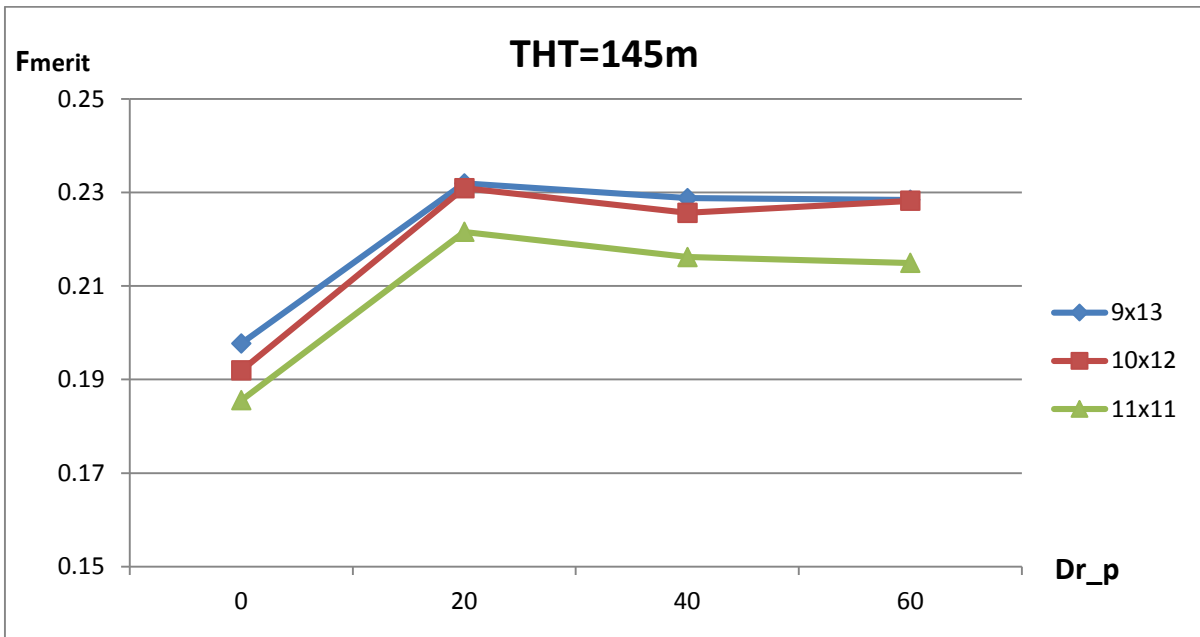
ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ (διάμεσος 15η ημέρα)												
			δ = -0.332494107												
			H̄	H̄ _d	r _t	r _{t±}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d±}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	DNI	cosθ _z	
04:00-05:00	-112.5	-1.963	1.961	0.968	-0.046	0.000	0.000	-0.141	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.486
05:00-06:00	-97.5	-1.702	1.961	0.968	-0.040	0.000	0.000	-0.087	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.299
06:00-07:00	-82.5	-1.440	1.961	0.968	-0.018	0.000	0.000	-0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.105
07:00-08:00	-67.5	-1.178	1.961	0.968	0.017	0.017	0.034	0.024	0.024	0.023	0.011	0.139	0.082		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	1.961	0.968	0.062	0.062	0.122	0.072	0.072	0.070	0.052	0.210	0.250		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	1.961	0.968	0.108	0.108	0.211	0.112	0.112	0.108	0.103	0.267	0.387		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	1.961	0.968	0.145	0.145	0.284	0.140	0.140	0.135	0.148	0.307	0.484		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	1.961	0.968	0.166	0.166	0.325	0.154	0.154	0.150	0.175	0.328	0.534		
12:00-13:00	7.5	0.131	1.961	0.968	0.166	0.166	0.325	0.154	0.154	0.150	0.175	0.328	0.534		
13:00-14:00	22.5	0.393	1.961	0.968	0.145	0.145	0.284	0.140	0.140	0.135	0.148	0.307	0.484		
14:00-15:00	37.5	0.654	1.961	0.968	0.108	0.108	0.211	0.112	0.112	0.108	0.103	0.267	0.387		
15:00-16:00	52.5	0.916	1.961	0.968	0.062	0.062	0.122	0.072	0.072	0.070	0.052	0.210	0.250		
16:00-17:00	67.5	1.178	1.961	0.968	0.017	0.017	0.034	0.024	0.024	0.023	0.011	0.139	0.082		
17:00-18:00	82.5	1.440	1.961	0.968	-0.018	0.000	0.000	-0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.105		
18:00-19:00	97.5	1.702	1.961	0.968	-0.040	0.000	0.000	-0.087	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.299		
19:00-20:00	112.5	1.963	1.961	0.968	-0.046	0.000	0.000	-0.141	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.486		
ω _s =		1.295													
συν/στης α=		0.532													
συν/στης β=		0.544													

ΤΟΠΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΩΡΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (degrees)	ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ω (rad)	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ (διάμεσος 16η ημέρα)												
			δ = -0.403094358												
			H̄	H̄ _d	r _t	r _{t±}	I (kwh/m ²)	r _d	r _{d±}	I _d (kwh/m ²)	I _b (kwh/m ²)	I _{b,n} (kwh/m ²)	DNI	cosθ _z	
04:00-05:00	-112.5	-1.963	1.537	0.821	-0.050	0.000	0.000	-0.178	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.519
05:00-06:00	-97.5	-1.702	1.537	0.821	-0.049	0.000	0.000	-0.116	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.337
06:00-07:00	-82.5	-1.440	1.537	0.821	-0.029	0.000	0.000	-0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.149
07:00-08:00	-67.5	-1.178	1.537	0.821	0.008	0.008	0.013	0.011	0.011	0.009	0.003	0.097	0.034		
08:00-09:00	-52.5	-0.916	1.537	0.821	0.057	0.057	0.088	0.067	0.067	0.055	0.033	0.166	0.197		
09:00-10:00	-37.5	-0.654	1.537	0.821	0.108	0.108	0.166	0.113	0.113	0.093	0.073	0.222	0.330		
10:00-11:00	-22.5	-0.393	1.537	0.821	0.150	0.150	0.230	0.145	0.145	0.119	0.111	0.261	0.424		
11:00-12:00	-7.5	-0.131	1.537	0.821	0.173	0.173	0.266	0.162	0.162	0.133	0.133	0.282	0.473		
12:00-13:00	7.5	0.131	1.537	0.821	0.173	0.173	0.266	0.162	0.162	0.133	0.133	0.282	0.473		
13:00-14:00	22.5	0.393	1.537	0.821	0.150	0.150	0.230	0.145	0.145	0.119	0.111	0.261	0.424		
14:00-15:00	37.5	0.654	1.537	0.821	0.108	0.108	0.166	0.113	0.113	0.093	0.073	0.222	0.330		
15:00-16:00	52.5	0.916	1.537	0.821	0.057	0.057	0.088	0.067	0.067	0.055	0.033	0.166	0.197		
16:00-17:00	67.5	1.178	1.537	0.821	0.008	0.008	0.013	0.011	0.011	0.009	0.003	0.097	0.034		
17:00-18:00	82.5	1.440	1.537	0.821	-0.029	0.000	0.000	-0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.149		
18:00-19:00	97.5	1.702	1.537	0.821	-0.049	0.000	0.000	-0.116	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.337		
19:00-20:00	112.5	1.963	1.537	0.821	-0.050	0.000	0.000	-0.178	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.519		
ω _s =		1.228													
συν/στης α=		0.499													
συν/στης β=		0.575													

					ΤΗΤ= 145						
Διαστάσεις Ηλιοστατών	Γωνία Dr_p	Αριθμός Ηλιοστατών	Εμβαδόν ανακλαστικής Επιφάνειας (m ²)	f _{merit}	Q _{max} Available Δεκεμβρης	Ισχύς (MW) Δεκεμβρης	β.α. πεδίου χειμώνας	Q _{max} Available Ιούλιος	Ισχύς (MW) Ιούλιος	β.α. πεδίου καλοκαίρι	
9x13	0	2635	308295	0.198	86.9	32.1	0.370	202.2	97.6	0.483	
9x13	20	1369	160173	0.232	45.2	18.9	0.418	105.1	63.4	0.603	
9x13	40	825	96525	0.229	27.2	11.8	0.432	63.3	43.2	0.682	
9x13	60	457	53469	0.228	15.1	6.1	0.403	35.1	24.4	0.696	
10x12	0	2635	316200	0.192	89.2	33.1	0.371	207.4	102.4	0.494	
10x12	20	1369	164280	0.231	46.3	19.5	0.420	107.8	65.9	0.612	
10x12	40	825	99000	0.226	27.9	12.0	0.430	64.9	44.5	0.685	
10x12	60	457	54840	0.228	15.5	6.3	0.405	36.0	25.0	0.694	
11x11	0	2635	318835	0.186	89.9	33.1	0.369	209.2	106.1	0.507	
11x11	20	1369	165649	0.222	46.7	19.4	0.416	108.7	67.9	0.625	
11x11	40	825	99825	0.216	28.2	12.1	0.430	65.5	46.4	0.709	
11x11	60	457	55297	0.215	15.6	6.3	0.405	36.3	25.3	0.696	

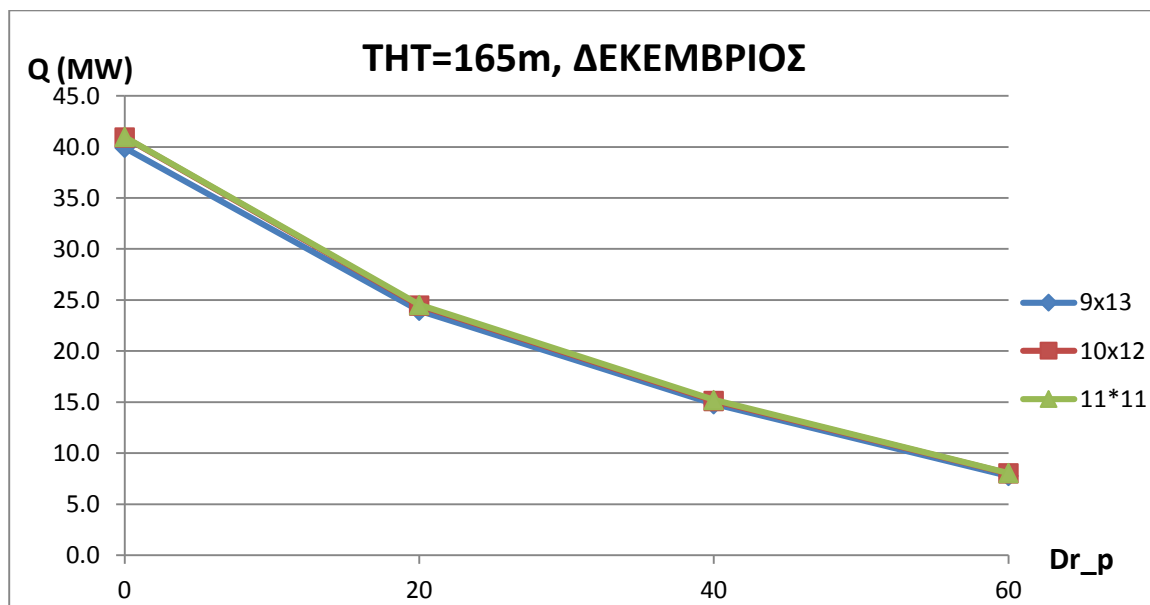
Χαρακτηριστικά πεδίων για ύψος πύργου 145m

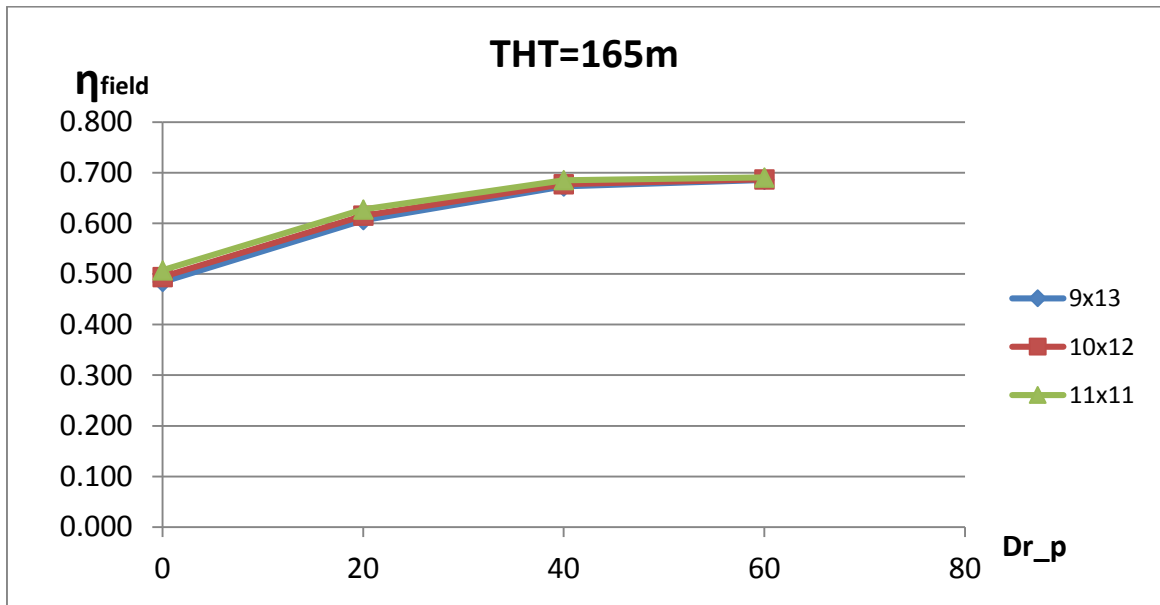
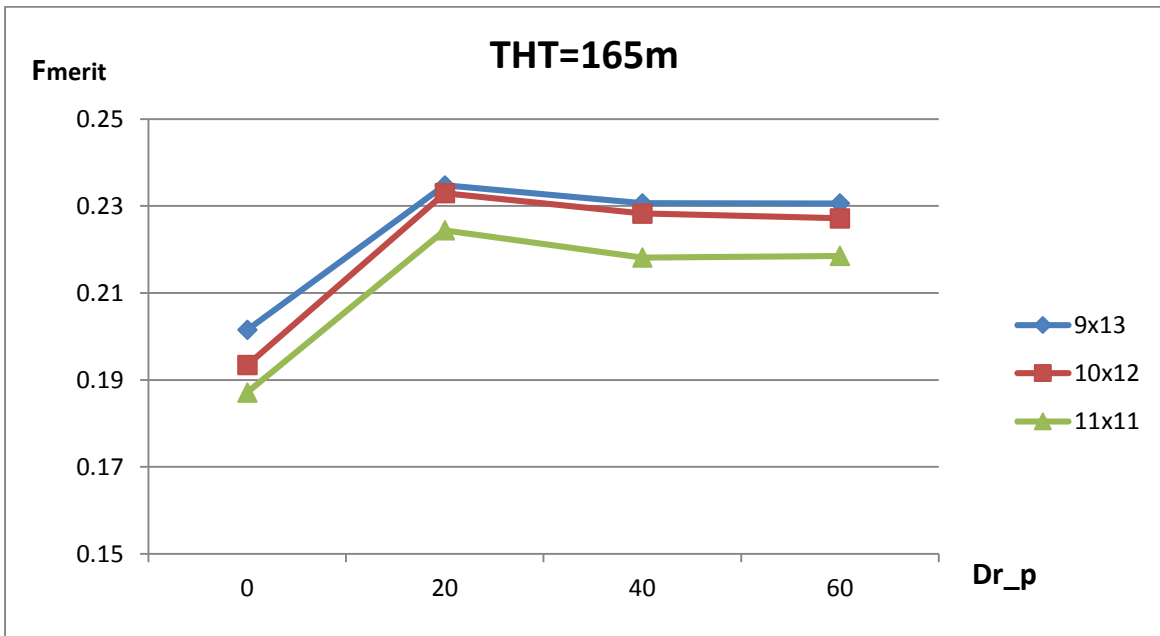
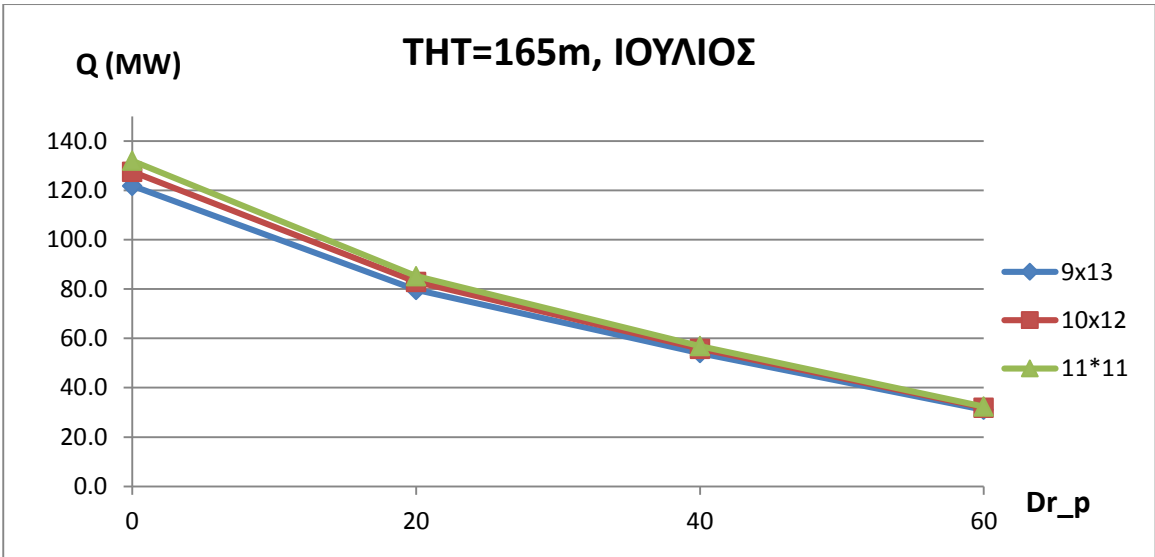




					ΤΗΤ= 165					
Διαστάσεις Ηλιοστατών	Γωνία Dr_p	Αριθμός Ηλιοστατών	Εμβαδόν ανακλαστικής Επιφάνειας (m ²)	f _{merit}	Q _{max Available} Δεκέμβρης	Ισχύς (MW) Δεκέμβρης	β.α. πεδίου χειμώνας	Q _{max Available} Ιούλιος	Ισχύς (MW) Ιούλιος	β.α. πεδίου καλοκαίρι
9x13	0	3280	383760	0.202	108.2	39.9	0.3689	251.7	121.9	0.484
9x13	20	1712	200304	0.235	56.5	24.0	0.4240	131.4	79.6	0.606
9x13	40	1046	122382	0.231	34.5	14.8	0.4291	80.3	54.0	0.673
9x13	60	590	69030	0.231	19.5	7.8	0.3997	45.3	31.1	0.686
10x12	0	3280	393600	0.193	111.0	40.9	0.3688	258.2	127.5	0.494
10x12	20	1712	205440	0.233	57.9	24.5	0.4222	134.8	82.9	0.615
10x12	40	1046	125520	0.228	35.4	15.1	0.4274	82.3	55.78	0.677
10x12	60	590	70800	0.227	20.0	8.0	0.4017	46.4	31.9	0.687
11x11	0	3280	396880	0.187	111.9	41.0	0.3662	260.4	132.0	0.507
11x11	20	1712	207152	0.224	58.4	24.5	0.4201	135.9	85.3	0.627
11x11	40	1046	126566	0.218	35.7	15.2	0.4264	83.0	56.9	0.685
11x11	60	590	71390	0.219	20.1	8.1	0.3999	46.8	32.3	0.691

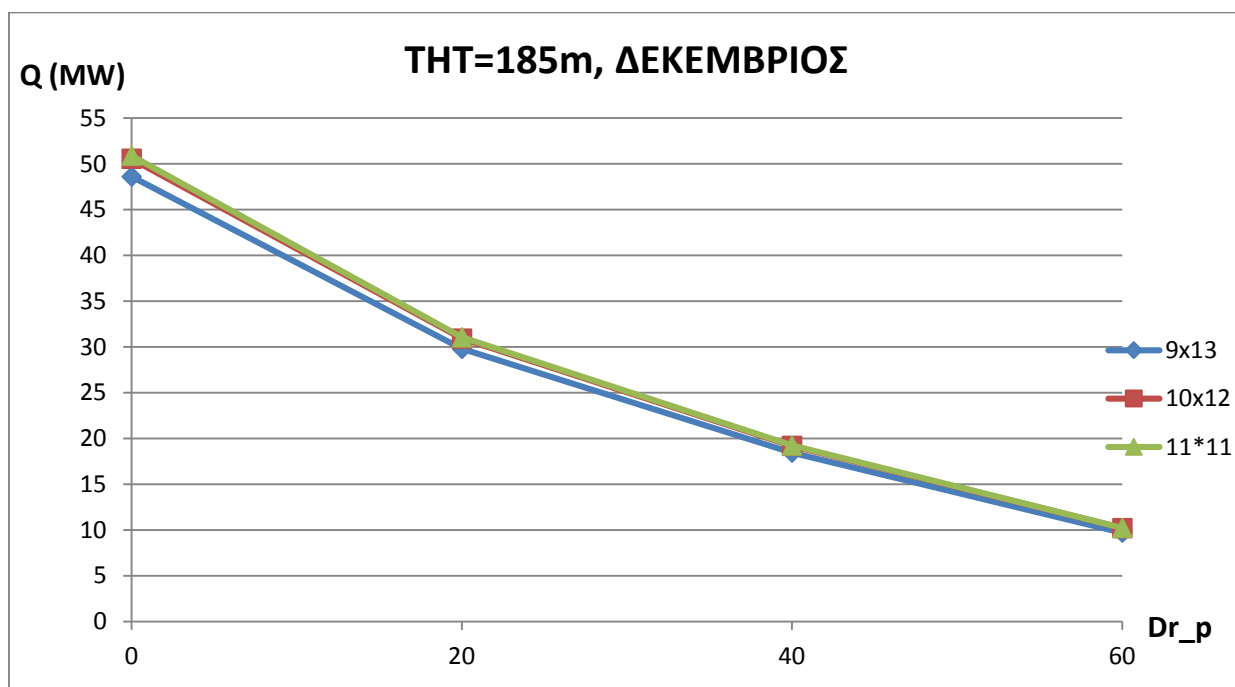
Χαρακτηριστικά πεδίων για ύψος πύργου 165m

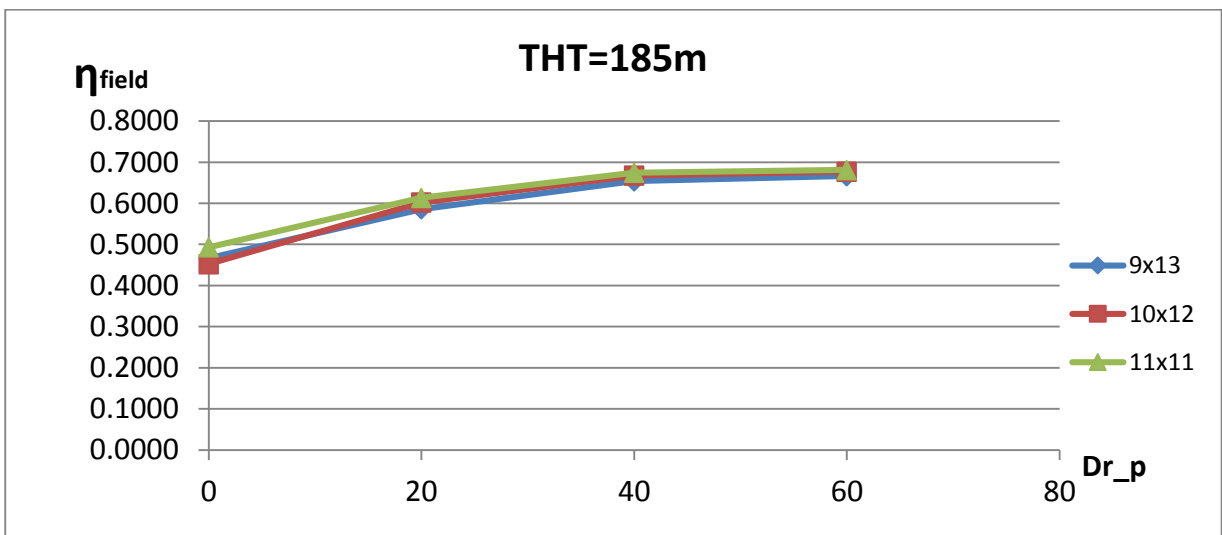
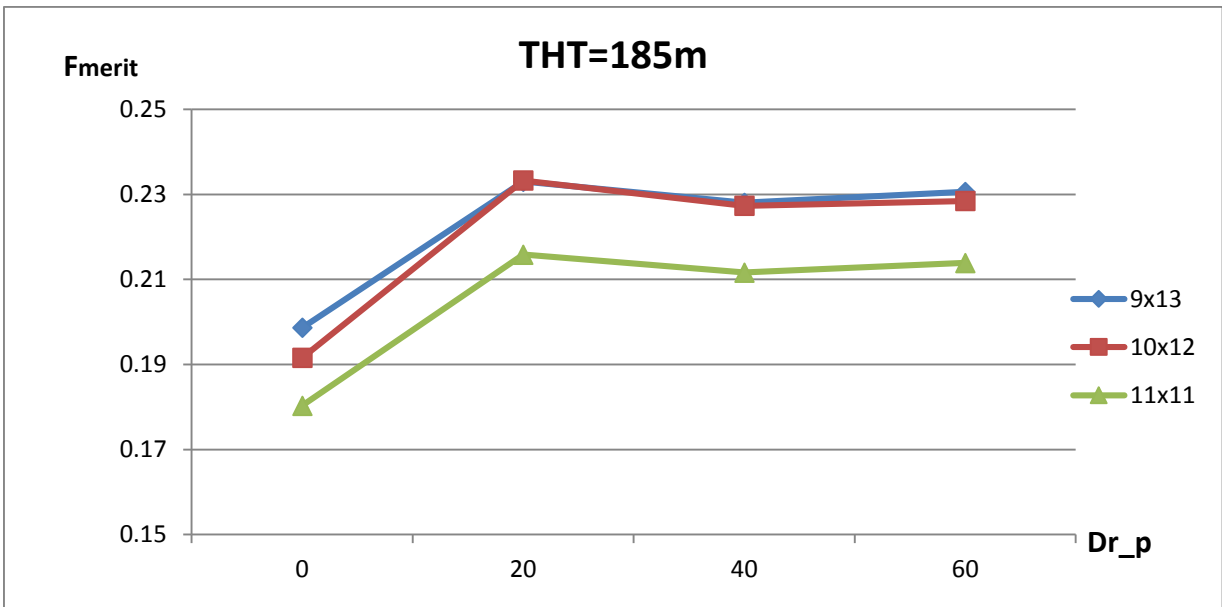
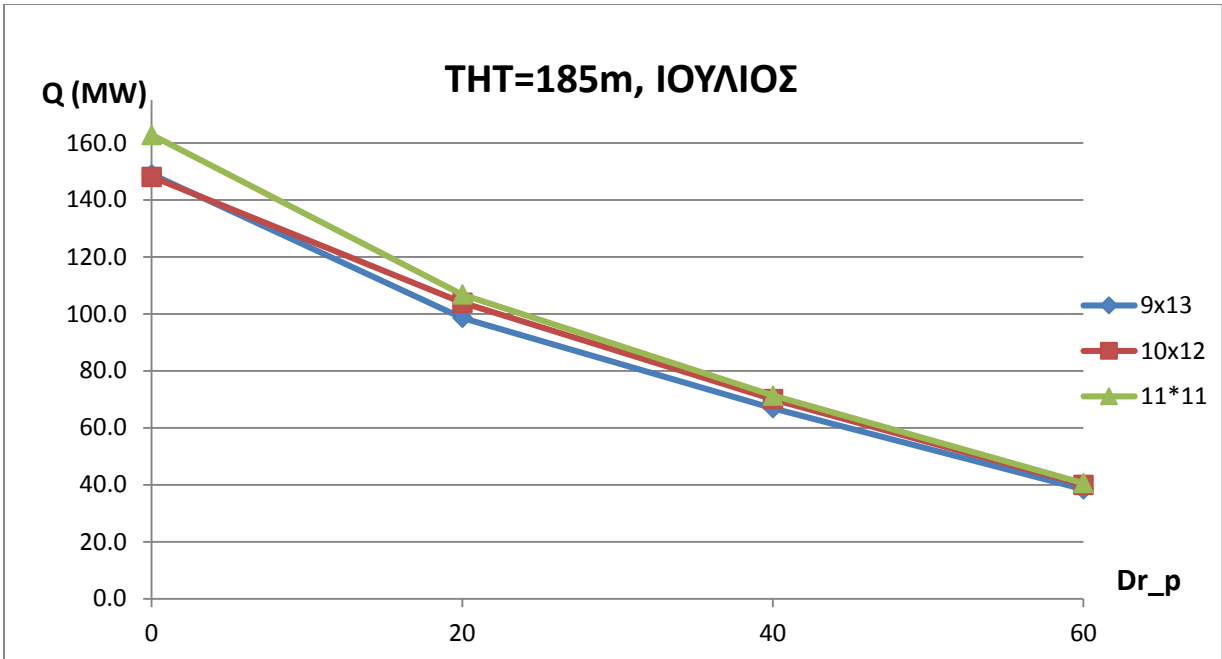




					ΤΗΤ= 185					
Διαστάσεις Ηλιοστατών	Γωνία Dr_p	Αριθμός Ηλιοστατών	Εμβαδόν ανακλαστικής Επιφάνειας (m ²)	f _{merit}	Q _{max} Available Δεκέμβρης	Ισχύς (MW) Δεκέμβρης	β.α. πεδίου χειμώνας	Q _{max} Available Ιούλιος	Ισχύς (MW) Ιούλιος	β.α. πεδίου καλοκαίρι
9x13	0	4161	486837	0.199	137.3	48.62	0.354	319.4	149.0	0.4665
9x13	20	2193	256581	0.233	72.4	29.8	0.412	168.3	98.6	0.5859
9x13	40	1333	155961	0.228	44.0	18.45	0.419	102.3	66.9	0.6540
9x13	60	751	87867	0.231	24.8	9.7	0.391	57.6	38.4	0.6665
10x12	0	4161	499320	0.192	140.8	50.57	0.359	327.6	148.1	0.4522
10x12	20	2193	263160	0.233	74.2	30.92	0.417	172.6	103.9	0.6021
10x12	40	1333	159960	0.227	45.1	19.18	0.425	104.9	70.0	0.6675
10x12	60	751	90120	0.228	25.4	10.22	0.402	59.1	40.0	0.6773
11x11	0	4161	503481	0.180	142.0	50.92	0.359	330.3	162.8	0.4930
11x11	20	2193	265353	0.216	74.8	31.07	0.415	174.1	106.8	0.6135
11x11	40	1333	161293	0.212	45.5	19.23	0.423	105.8	71.4	0.6745
11x11	60	751	90871	0.214	25.6	10.23	0.399	59.6	40.6	0.6812

Χαρακτηριστικά πεδίων για ύψος πύργου 185m

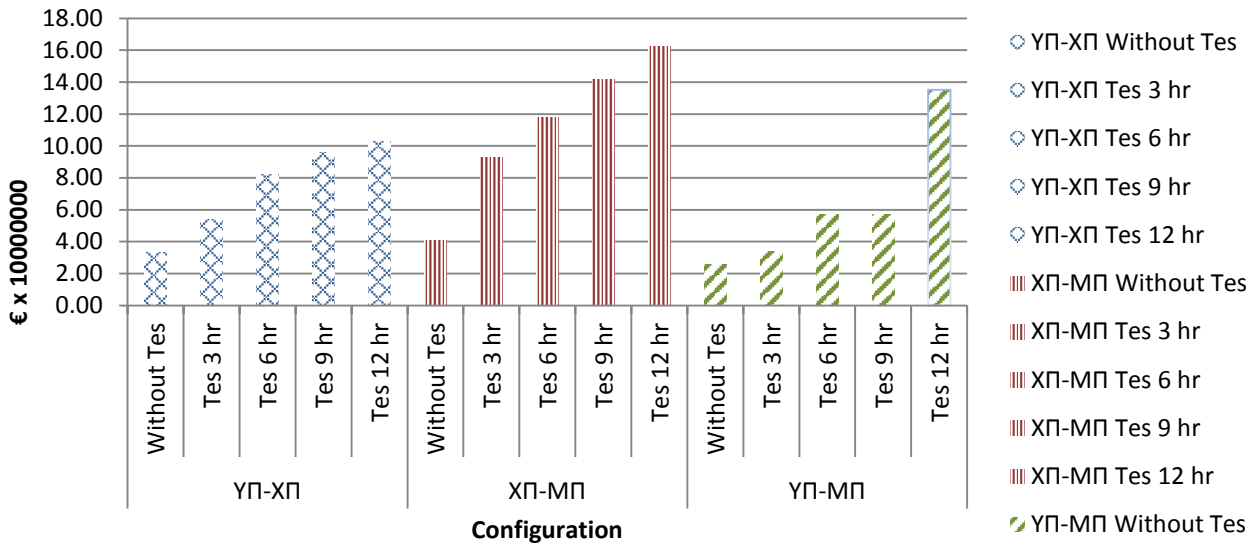




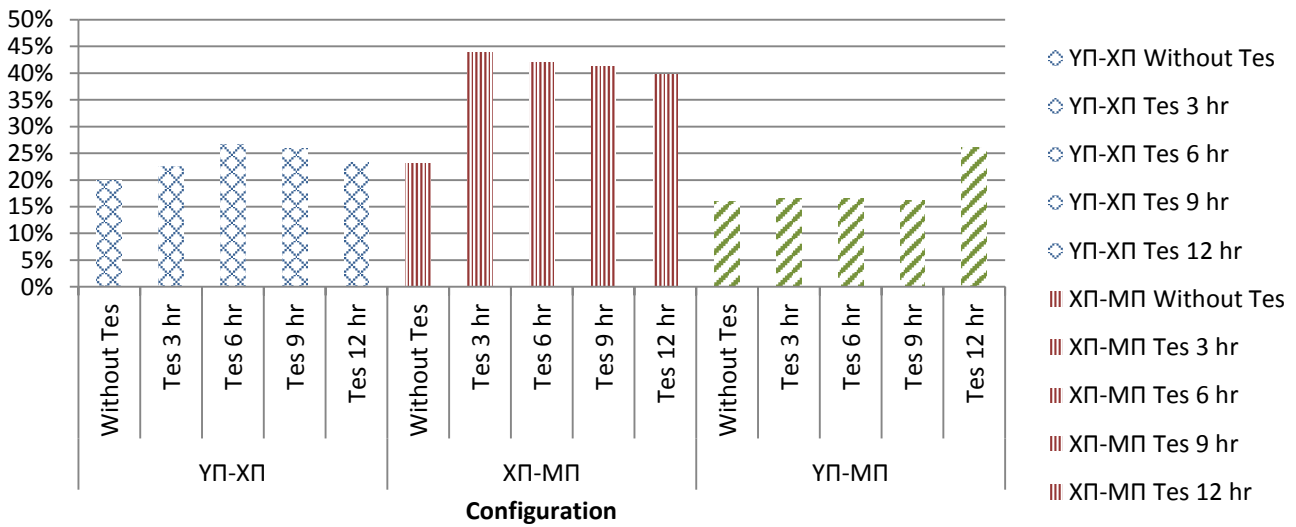
ΚΑΛΟΚΑΡΙ							
Τοπική Φαινομενική ώρα	DNI	Ισχύς Qfield	Μεταβολή καυσίμου	A/Σ	Ατμ	Καυστηρας	β.α- Καλοκαίρι
5:30	366	17.96	14.572		132.09		57.71%
6:30	433	20.86	14.429		132.09		57.88%
7:30	498	23.5	14.219		132.09		58.01%
8:30	557	25.93	14.219		132.09		58.15%
9:30	605	28.4	14.119		132.09		58.30%
10:30	638	30.58	14.014	252.07	132.09	644.026	57.03%
11:30	656	32.25	14.014	252.07	132.09	644.026	57.03%
12:30	656	32.25	14.014	252.07	132.09	644.026	57.03%
13:30	656	32.25	14.014	252.07	132.09	644.026	57.03%
14:30	656	32.25	14.014	253.18	132.09	646.861	58.30%
15:30	638	30.58	14.014	254.9	132.09	651.47	58.15%
16:30	605	28.4	14.119	256.94	132.09	656.456	58.01%
17:30	557	25.93	14.219	258.75	132.09	661.085	57.88%
18:30	498	23.5	14.219	261.19	132.09	667.251	57.71%
19:30	433	20.86	14.429				
20:30	366	17.96	14.572				

ΧΕΙΜΩΝΑΣ							
Τοπική Φαινομενική ώρα	DNI	Ισχύς Qfield	Μεταβολή καυσίμου	A/Σ	Ατμ	Καυστηρας	β.α- Καλοκαίρι
8:30	166	4.58	15.09388889		132.09		57.77%
9:30	222	6.7	15.00805556		132.09		57.73%
10:30	261	7.6	14.96305556		132.09		57.72%
11:30	282	7.801	14.94861111	268.89	132.09	683.896	57.71%
12:30	282	7.801	14.94861111	268.89	132.09	683.896	57.71%
13:30	261	7.6	14.96305556	269.14	132.09	687.643	57.72%
14:30	222	6.7	15.00805556	270.22	132.09	690.384	57.73%
15:30	166	4.58	15.09388889	271.94	132.09	694.794	57.77%

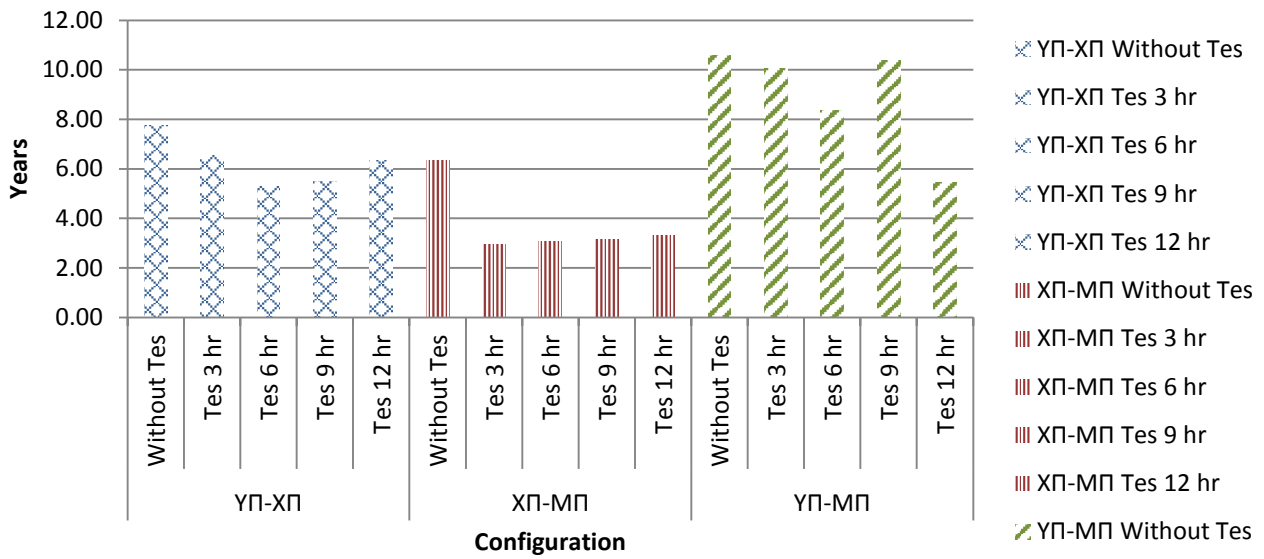
NPV



IRR



Έντοκη περίοδος αποπληρωμής



Cost of MWh for exact 5 years payback

