



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Πολιτικές Λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών - Τεχνολογίας  
Παραβολικών Κατόπτρων - και Βέλτιστη Διαστασιολόγησή τους με  
χρήση Γενετικών Αλγορίθμων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΤΑΥΡΟΣ Χ. ΚΑΛΛΙΝΩΣΗΣ**

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Πολιτικές Λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών - Τεχνολογίας  
Παραβολικών Κατόπτρων - και Βέλτιστη Διαστασιολόγησή τους με  
χρήση Γενετικών Αλγορίθμων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΤΑΥΡΟΣ Χ. ΚΑΛΛΙΝΩΣΗΣ**

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Οκτώβριο του 2011.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Στέφανος Μανιάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....  
ΣΤΑΥΡΟΣ Χ. ΚΑΛΛΙΝΩΣΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών  
Ε.Μ.Π.

Copyright © ΣΤΑΥΡΟΣ ΚΑΛΛΙΝΩΣΗΣ 2011

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.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων, ο οποίος εγκαθίσταται σε μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό σύστημα και λειτουργεί χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Οι περιορισμοί που επιβάλλονται δεσμεύουν την ισχύ εξόδου του σταθμού σε συγκεκριμένες ώρες του 24ώρου όπου μπορεί να υφίσταται δυσχέρεια απορρόφησης της ισχύος αυτής από το σύστημα του νησιού.

Εκτός από τις προσομοιώσεις που αφορούν την πολιτική λειτουργίας του σταθμού και τα προκύπτοντα ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα, χρησιμοποιούνται ακόμη Γενετικοί Αλγόριθμοι για να βελτιστοποιήσουν τη διαστασιολόγηση των κύριων συνιστωσών του σταθμού. Συγκεκριμένα υιοθετούνται δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, θεωρώντας σταθερή την ονομαστική ισχύ του σταθμού, μεταβάλλονται η έκταση της γης και το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης του σταθμού ούτως ώστε να επιτευχθεί μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης (IRR). Στο δεύτερο σενάριο, θεωρώντας σταθερή την έκταση γης που είναι διαθέσιμη για τον σταθμό, μεταβάλλονται η ονομαστική ισχύς του σταθμού και το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης με σκοπό και πάλι να επιτευχθεί μεγιστοποίηση του IRR.

## Λέξεις Κλειδιά

Ηλιοθερμικός σταθμός, παραβολικά κάτοπτρα, συλλέκτης, μέσο μεταφοράς θερμότητας, συνθετικό έλαιο, μέσο αποθήκευσης, υγροποιημένο άλας, εναλλάκτης θερμότητας, αποθήκη δύο δεξαμενών, περιορισμός διείσδυσης ισχύος, βέλτιστη διαστασιολόγηση.



## Abstract

The scope of this diploma thesis is the simulation of a solar thermal power plant, parabolic trough technology, which is installed in non-grid island system and it operates without and with restrictions on the penetration of power. The imposed restrictions tie the output of the plant at specific times of 24 hours where there may be difficulty in absorbing power from the system of the island.

Apart from the simulations concerning the policy function of the plant and the resulting energy and financial results, also genetic algorithms are used in order to optimize the dimensions of the main components of the station. Specifically, two scenarios are adopted. In the first scenario, considering constant the nominal power of the plant, the land and the size of energy storage of plant are changed in order to achieve maximization of the internal rate of return on investment (IRR). In the second scenario, considering constant the land which is available for the plant, the nominal power of plant and the size of energy storage are changed in order to achieve again maximization of IRR.

## Key Words

Solar thermal power plant, parabolic troughs, collector, heat transfer fluid, synthetic oil, liquid storage, liquefied salt, heat exchanger, storage of two tanks, restriction of penetration power, optimal dimensioning.





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την ευκαιρία της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας που ανταποκρίνεται πλήρως στα ερευνητικά μου ενδιαφέροντα. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω τόσο για τη συνεχή και αμέριστη συμπαράστασή του όσο και για τις κατευθυντήριες γραμμές που μου έδωσε κατά τη διαδικασία εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Παπασταμούλο, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι συμβουλές του και οι επισημάνσεις του συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω, να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την ενίσχυση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για τα υπέροχα ακαδημαϊκά χρόνια που μοιράστηκα μαζί τους.

Σταύρος Χ. Καλλίνωσης

Οκτώβριος 2011



# Πίνακας Περιεχομένων

<b>Λίστα Σχημάτων</b> .....	<b>17</b>
<b>Λίστα Γραφημάτων</b> .....	<b>21</b>
<b>Λίστα Πινάκων</b> .....	<b>25</b>
<b>Ηλιοθερμικοί Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής</b> .....	<b>27</b>
1.1 Εισαγωγή.....	27
1.2 Κατάλληλες Τοποθεσίες για ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών Ενέργειας .....	29
1.2.1 Παγκόσμιο Επίπεδο .....	29
1.2.2 Εθνικό Επίπεδο .....	31
1.3 Τρόπος λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών .....	32
1.4 Το μέλλον των Ηλιοθερμικών Σταθμών Ενέργειας.....	32
<b>Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής</b> .....	<b>35</b>
2.1 Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων .....	35
2.1.1 Χρήση Συμβατικού Καυσίμου για βοηθητική λειτουργία του σταθμού.....	37
2.1.2 Χρήση Συμβατικού Καυσίμου για κύρια λειτουργία του σταθμού (μονάδα συνδυασμένου κύκλου ISCCS) .....	37
2.1.3 Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων .....	38
2.1.4 Μειονεκτήματα Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων .....	39
2.2 Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου.....	39
2.2.1 Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας Ηλιακού Πύργου.....	42
2.2.2 Μειονεκτήματα Τεχνολογίας Ηλιακού Πύργου .....	42
2.3 Τεχνολογία Παραβολικών «Πιάτων» με μηχανές Stirling.....	43
2.4 Τεχνολογία Fresnel .....	44
2.5 Τεχνολογία Ηλιακής «Καμινάδας».....	45
2.6 Σύγκριση Ηλιακών Θερμικών Συστημάτων .....	46
<b>Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)</b> .....	<b>49</b>
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Απορροφώμενη Ηλιακή Ακτινοβολία.....	52
3.2.1 Άμεση Κανονική Ηλιακή Ακτινοβολία (DNI) .....	52
3.2.2 Γωνία Πρόσπτωσης ( $\theta$ ).....	54
3.2.2.1 Γωνία Απόκλισης ( $d$ ) .....	54
3.2.2.2 Γωνία της ώρας ( $w$ ) .....	55
3.2.2.3 Γωνία ζενίθ ( $z$ ) .....	55

3.2.3 Μετατροπéας Γωνίας Πρόσπτωσης (IAM) .....	55
3.2.4 Σκίαση παράλληλων σειρών και απώλειες άκρων .....	56
3.2.5 Αποδοτικότητα πεδίου ( $n_{Field}$ ) και αποδοτικότητα στοιχείου συλλογής θερμότητας ( $n_{HCE}$ ) .....	59
3.2.6 Συνολική Απόδοση του Ηλιακού Πεδίου .....	59
3.3 Απώλειες θερμότητας δέκτη .....	60
3.3.1 Αναλυτική προέλευση απωλειών θερμότητας.....	60
3.3.2 Μοντέλο γραμμικής συσχέτισης θερμικών απωλειών .....	61
3.3.3 Απώλειες θερμότητας από τις σωληνώσεις μέσα στο ηλιακό πεδίο .....	62
3.4 Ενεργειακό κέρδος του HTF και θερμοκρασιακή αύξηση .....	62
3.5 Υπολογισμός διάφορων μεγεθών .....	63
<b>Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού .....</b>	<b>65</b>
4.1 Τεχνολογίες Αποθήκευσης θερμότητας για Ηλιοθερμικούς σταθμούς Ενέργειας .....	65
4.1.1 Άμεση Αποθήκευση Ατμού.....	66
4.1.2 Αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας .....	68
4.1.3 Αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας σε στερεά μέσα.....	70
4.1.4 Συνδυασμός λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας σε στερεά μέσα αποθήκευσης.....	72
4.1.5 Σύστημα αποθήκευσης με θερμοκλίνη.....	73
4.1.6 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών .....	75
4.1.6.1 Έμμεση αποθήκευση ενέργειας .....	75
4.1.6.2 Άμεση αποθήκευση ενέργειας .....	78
4.1.7 Αναπαράσταση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού σταθμού με αποθήκη θερμότητας δύο δεξαμενών .....	79
4.2 Ανάλυση κύκλου Ισχύος .....	82
4.2.1 Εισαγωγή .....	82
4.2.2 Κύκλος Rankine .....	83
4.2.3 Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας.....	84
4.2.4 Βασικά Μεγέθη κύκλου Ισχύος.....	85
4.3 Σύστημα Ψύξης .....	86
4.3.1 Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας .....	86
4.3.2 Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας και περαιτέρω ψύξη με τη βοήθεια πύργου ψύξης.....	87

4.3.3 Υγροί πύργοι Ψύξης .....	89
4.3.3.1 Εισαγωγή .....	89
4.3.3.2 Αρχή λειτουργίας .....	91
4.4 Ιδιοκαταναλώσεις σταθμού .....	92
4.4.1 Ιδιοκαταναλώσεις στο Ηλιακό Πεδίο .....	92
4.4.2 Ιδιοκαταναλώσεις στο σύστημα αποθήκευσης .....	92
4.4.3 Ιδιοκαταναλώσεις στον κύκλο ισχύος .....	92
4.4.4 Ιδιοκαταναλώσεις στο σύστημα ψύξης .....	92
4.4.5 Συνολικές Ιδιοκαταναλώσεις σταθμού .....	92
4.5 Καθαρή παραγωγή ενέργειας του σταθμού ( $W_{net}$ ) .....	93
<b>Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής ...</b>	<b>95</b>
5.1 «Πολιτική» λειτουργίας του Ηλιοθερμικού Σταθμού χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	95
5.2 Προσομοίωση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού (χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος) .....	97
5.2.1 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 1 – 7 Αυγούστου .....	97
5.2.2 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 5 -11 Φεβρουαρίου .....	104
5.3 «Πολιτική» λειτουργίας του Σταθμού με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος ...	110
5.4 Προσομοίωση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού (με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος) .....	110
5.4.1 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 1 – 7 Αυγούστου .....	110
5.4.2 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 5 – 11 Φεβρουαρίου .....	116
<b>Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων .....</b>	<b>121</b>
6.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι .....	121
6.1.1 Εισαγωγή .....	121
6.1.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων .....	123
6.1.3 Μειονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων .....	124
6.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά των Γενετικών Αλγορίθμων .....	125
6.1.5 Βασικά στοιχεία των Γενετικών Αλγορίθμων .....	127

6.1.6 Διάγραμμα Ροής του Γενετικού Αλγορίθμου για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος.....	129
6.2 Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού.....	131
6.2.1 Υπολογισμός Καθαρών Ταμειακών Ροών (KTP) .....	131
6.2.2 Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) .....	133
6.2.3 Υπολογισμός Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) .....	134
6.3 Βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού όταν αυτός λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διεύθυνσης ισχύος.....	134
6.3.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την Ονομαστική Ισχύς του Σταθμού.....	135
6.3.1.1 Σταθμός 30 MW.....	135
6.3.1.2 Σταθμός 50 MW.....	136
6.3.1.3 Σταθμός 70 MW.....	137
6.3.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την έκταση της γης που είναι διαθέσιμη για τον Σταθμό .....	138
6.3.2.1 Έκταση 1500 στρέμματα .....	139
6.3.2.2 Έκταση 2000 στρέμματα .....	140
6.3.2.3 Έκταση 2500 στρέμματα .....	141
6.4 Βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού όταν αυτός λειτουργεί με περιορισμούς διεύθυνσης ισχύος .....	142
6.4.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την Ονομαστική Ισχύς του Σταθμού.....	142
6.4.1.1 Σταθμός 30 MW.....	142
6.4.1.2 Σταθμός 50 MW.....	143
6.4.1.3 Σταθμός 70 MW.....	144
6.4.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την έκταση της γης που είναι διαθέσιμη για τον Σταθμό .....	145
6.4.2.1 Έκταση 1500 στρέμματα .....	146
6.4.2.2 Έκταση 2000 στρέμματα .....	147
6.4.2.3 Έκταση 2500 στρέμματα .....	148
6.5 Κόστος Επένδυσης .....	149
6.5.1 Κόστος Συστήματος Αποθήκης.....	149
6.5.2 Κόστος Ηλιακού Πεδίου .....	149
6.5.3 Κόστος Κύκλου Ισχύος .....	149
6.5.4 Κόστος ενοικίασης και ομαλοποίησης του εδάφους.....	150

6.5.5 Κόστος αγοράς καυστήρα .....	150
6.5.6 Κόστος μελέτης και διασύνδεσης του σταθμού .....	150
6.5.7 Κόστος Συστήματος Ψύξης .....	150
6.5.8 Συνολικό κόστος επένδυσης.....	150
<b>Συμπεράσματα – Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....</b>	<b>153</b>
7.1 Σύγκριση μεγεθών ενός Ηλιοθερμικού σταθμού, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος.....	153
7.2 Συμπεράσματα από τις βέλτιστες διαστασιολογήσεις του σταθμού.....	155
7.3 Σύνοψη .....	156
7.4 Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	156
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>157</b>





## Λίστα Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1</b> Πρόβλεψη Ενεργειακής Ζήτησης/Κάλυψης για το έτος 2100 [4].....	28
<b>Σχήμα 1.2</b> Επίπεδα Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας και η κατανομή τους στον πλανήτη [5] .....	29
<b>Σχήμα 1.3</b> Απεικόνιση τοποθεσιών που είναι κατάλληλες για εγκατάσταση Ηλιοθερμικών Σταθμών Ενέργειας.....	30
<b>Σχήμα 1.4</b> Θήβα, Μέγαρα Αττικής, Ανατολική Αττική, περιοχές κατάλληλες για Ηλιοθερμικό σταθμό .....	31
<b>Σχήμα 1.5</b> Ακρωτήρι, περιοχή κατάλληλη για Ηλιοθερμικό σταθμό .....	32
<b>Σχήμα 2.1</b> Ηλιοθερμικός σταθμός με τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων .....	36
<b>Σχήμα 2.2</b> Μηχανισμός οδήγησης κατόπτρου [7] .....	36
<b>Σχήμα 2.3</b> Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού σταθμού με χρήση συμβατικού καυσίμου για βοηθητική λειτουργία .....	37
<b>Σχήμα 2.4</b> Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού σταθμού με χρήση συμβατικού καυσίμου για κύρια λειτουργία.....	38
<b>Σχήμα 2.5</b> Ηλιοθερμικός Σταθμός με Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου .....	39
<b>Σχήμα 2.6</b> Αναπαράσταση Ηλιοστάτη.....	40
<b>Σχήμα 2.7</b> Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου (χρήση υγροποιημένου άλατος ως HTF) [9].....	41
<b>Σχήμα 2.8</b> Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου (απευθείας παραγωγή ατμού).....	42
<b>Σχήμα 2.9</b> Σύστημα Ηλιακού παραβολικού δίσκου .....	43
<b>Σχήμα 2.10</b> Αναπαράσταση πάρκου, τεχνολογίας παραβολικών πιάτων με μηχανές Stirling.....	44
<b>Σχήμα 2.11</b> Ηλιοθερμικός Σταθμός με Τεχνολογία Fresnel .....	44
<b>Σχήμα 2.12</b> Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με τεχνολογία Fresnel.....	45
<b>Σχήμα 2.13</b> Ηλιοθερμικός Σταθμός με Τεχνολογία Ηλιακής «Καμινάδας».....	46
<b>Σχήμα 2.14</b> Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με Ηλιακή «Καμινάδα» .....	46
<b>Σχήμα 3.1</b> Κάτοψη ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού [11].....	49
<b>Σχήμα 3.2</b> Αναπαράσταση ενός τυπικού στοιχείου συλλογής θερμότητας.....	50
<b>Σχήμα 3.3</b> Σχηματική απεικόνιση ενός ηλιακού συλλέκτη (SCA) [Πηγή: Stuetzle, 2002] .....	50
<b>Σχήμα 3.4</b> Διάγραμμα ροής του Ηλιακού Πεδίου [12].....	51

<b>Σχήμα 3.5</b> Αναπαράσταση της γωνίας πρόσπτωσης για ένα παραβολικό κάτοπτρο [12].....	54
<b>Σχήμα 3.6</b> Σκίαση σειρών κατά την διάρκεια του πρωινού.....	57
<b>Σχήμα 3.7</b> Απώλειες άκρων ηλιακού συλλέκτη [12].....	58
<b>Σχήμα 3.8</b> Απώλειες μεταξύ των επιφανειών του συλλέκτη και του περιβάλλοντος [12].....	61
<b>Σχήμα 4.1</b> Σύστημα απευθείας παραγωγής ατμού [15] .....	66
<b>Σχήμα 4.2</b> Συσσωρευτής ατμού [15].....	66
<b>Σχήμα 4.3</b> Έμμεση φόρτιση συσσωρευτή ατμού [15] .....	67
<b>Σχήμα 4.4</b> Δεύτερο σύστημα αποθήκευσης για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού [15] .....	67
<b>Σχήμα 4.5</b> Διάταξη εγκατάστασης Ηλιοθερμικού σταθμού με σύστημα αποθήκης, βασισμένο στη λανθάνουσα θερμότητα [15].....	69
<b>Σχήμα 4.6</b> Συμπεριφορά υλικού αλλαγής φάσης κατά την διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης [15].....	70
<b>Σχήμα 4.7</b> Υβριδικό σύστημα αποθήκευσης [15].....	73
<b>Σχήμα 4.8</b> Έμμεσο σύστημα αποθήκευσης θερμοκλίνης .....	74
<b>Σχήμα 4.9</b> Άμεσο σύστημα αποθήκευσης θερμοκλίνης .....	74
<b>Σχήμα 4.10</b> Αναπαράσταση Ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με σύστημα αποθήκευσης δύο δεξαμενών (Έμμεση Αποθήκευση) [18].....	75
<b>Σχήμα 4.11</b> Δεξαμενές Αποθήκευσης Ενέργειας (πρόσοψη) [19].....	77
<b>Σχήμα 4.12</b> Δεξαμενές Αποθήκευσης Ενέργειας (κάτοψη) [19] .....	78
<b>Σχήμα 4.13</b> Δεξαμενές Αποθήκευσης Ενέργειας (τρισδιάστατα) [20].....	78
<b>Σχήμα 4.14</b> Αναπαράσταση Ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού πύργου με σύστημα αποθήκευσης δύο δεξαμενών (Άμεση Αποθήκευση) .....	79
<b>Σχήμα 4.15</b> Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού κατά τις πρωινές ώρες (δεν έχει «πιάσει» ακόμα την ονομαστική του ισχύ) [21] .....	80
<b>Σχήμα 4.16</b> Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού το μεσημέρι (όταν ο σταθμός έχει «πιάσει» την ονομαστική του ισχύ) [21] .....	80
<b>Σχήμα 4.17</b> Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού νωρίς το απόγευμα ή σε περιόδους συννεφιάς [21] .....	81
<b>Σχήμα 4.18</b> Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού μετά την δύση του Ήλιου [21] .....	81
<b>Σχήμα 4.19</b> Διάγραμμα ροής του ΜΜΘ διαμέσου των εναλλακτών θερμότητας [12] .....	82

<b>Σχήμα 4.20</b> Διάγραμμα ροής του κύκλου ισχύος [12].....	83
<b>Σχήμα 4.21</b> Διάγραμμα ροής του κύκλου ισχύος με αριθμημένα διάφορα στάδιά του [12].....	83
<b>Σχήμα 4.22</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας [12].....	84
<b>Σχήμα 4.23</b> Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας [28].....	87
<b>Σχήμα 4.24</b> Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας και με τη βοήθεια πύργου ψύξης [28].....	88
<b>Σχήμα 4.25</b> Κλειστό σύστημα ψύξης με πύργο ψύξης [28].....	88
<b>Σχήμα 4.26</b> Αναπαράσταση υγρού πύργου Ψύξης [29].....	89
<b>Σχήμα 4.27</b> Λειτουργία υγρού πύργου Ψύξης φυσικού ελκυσμού [30].....	89
<b>Σχήμα 4.28</b> Λειτουργία πύργου Ψύξης μηχανικής ροής αέρα [29].....	90
<b>Σχήμα 6.1</b> Διάγραμμα ροής για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων [35].....	130



## Λίστα Γραφημάτων

<b>Γράφημα 3.1</b> Αναπαράσταση της ετήσιας Ηλιακής ακτινοβολίας.....	53
<b>Γράφημα 3.2</b> Αναπαράσταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας για τις ημέρες του χειμερινού και θερινού Ηλιοστάσιου.....	53
<b>Γράφημα 3.3</b> Αναπαράσταση της γωνίας αποκλίσεως.....	55
<b>Γράφημα 3.4</b> Αναπαράσταση του μετατροπέα της γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.....	56
<b>Γράφημα 3.5</b> Αναπαράσταση του παράγοντα σκίασης για τις 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου.....	57
<b>Γράφημα 3.6</b> Απώλειες άκρων συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.....	58
<b>Γράφημα 3.7</b> Αναπαράσταση της συνολικής απόδοσης του Ηλιακού πεδίου.....	60
<b>Γράφημα 3.8</b> Αναπαράσταση της τελικά συλλεγόμενης ενέργειας από το μέσο μεταφοράς θερμότητας.....	63
<b>Γράφημα 5.1</b> Αναπαράσταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	98
<b>Γράφημα 5.2</b> Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο.....	98
<b>Γράφημα 5.3</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία.....	99
<b>Γράφημα 5.4</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	100
<b>Γράφημα 5.5</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	100
<b>Γράφημα 5.6</b> Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης.....	101
<b>Γράφημα 5.7</b> Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης.....	101
<b>Γράφημα 5.8</b> Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα.....	102
<b>Γράφημα 5.9</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο.....	102
<b>Γράφημα 5.10</b> Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος.....	103
<b>Γράφημα 5.11</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης.....	103
<b>Γράφημα 5.12</b> Αναπαράσταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	104
<b>Γράφημα 5.13</b> Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο.....	105

<b>Γράφημα 5.14</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία .....	105
<b>Γράφημα 5.15</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	106
<b>Γράφημα 5.16</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	106
<b>Γράφημα 5.17</b> Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης .....	107
<b>Γράφημα 5.18</b> Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης.....	107
<b>Γράφημα 5.19</b> Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα.....	108
<b>Γράφημα 5.20</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο .....	108
<b>Γράφημα 5.21</b> Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος .....	109
<b>Γράφημα 5.22</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης .....	109
<b>Γράφημα 5.23</b> Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο .....	111
<b>Γράφημα 5.24</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία .....	111
<b>Γράφημα 5.25</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	112
<b>Γράφημα 5.26</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	112
<b>Γράφημα 5.27</b> Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης .....	113
<b>Γράφημα 5.28</b> Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης.....	113
<b>Γράφημα 5.29</b> Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα.....	114
<b>Γράφημα 5.30</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο .....	114
<b>Γράφημα 5.31</b> Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος .....	115
<b>Γράφημα 5.32</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης .....	115
<b>Γράφημα 5.33</b> Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο .....	116

<b>Γράφημα 5.34</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία .....	116
<b>Γράφημα 5.35</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	117
<b>Γράφημα 5.36</b> Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία.....	117
<b>Γράφημα 5.37</b> Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης .....	118
<b>Γράφημα 5.38</b> Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης.....	118
<b>Γράφημα 5.39</b> Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα.....	119
<b>Γράφημα 5.40</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο .....	119
<b>Γράφημα 5.41</b> Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος .....	120
<b>Γράφημα 5.42</b> Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης .....	120
<b>Γράφημα 6.1</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 30MW, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	136
<b>Γράφημα 6.2</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 50MW, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	137
<b>Γράφημα 6.3</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 70MW, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	138
<b>Γράφημα 6.4</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 1500 στρεμμάτων, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	139
<b>Γράφημα 6.5</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2000 στρεμμάτων, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	140
<b>Γράφημα 6.6</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2500 στρεμμάτων, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	141
<b>Γράφημα 6.7</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 30MW, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	143
<b>Γράφημα 6.8</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 50MW, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	144
<b>Γράφημα 6.9</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 70MW, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	145
<b>Γράφημα 6.10</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 1500 στρεμμάτων, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	146

<b>Γράφημα 6.11</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2000 στρεμμάτων, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	147
<b>Γράφημα 6.12</b> Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2500 στρεμμάτων, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	148
<b>Γράφημα 6.13</b> TotalInvestmentCost = f(hours of storage, number of loops) για Wnet=30MW .....	151
<b>Γράφημα 6.14</b> TotalInvestmentCost = f(hours of storage, number of loops) για Wnet=50MW .....	151
<b>Γράφημα 6.15</b> TotalInvestmentCost = f(hours of storage, number of loops) για Wnet=70MW .....	152
<b>Γράφημα 7.1</b> Παραγωγή Ενέργειας του σταθμού στις 10 Ιουλίου - Χωρίς Περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος.....	154
<b>Γράφημα 7.2</b> Παραγωγή Ενέργειας του σταθμού στις 10 Ιουλίου - Με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος .....	154



## Λίστα Πινάκων

<b>Πίνακας 1.1</b> Βασικά χαρακτηριστικά των SEGS [3].....	28
<b>Πίνακας 1.2</b> Κατανομή επιπέδων άμεσης Ηλιακής ακτινοβολία σε διάφορες περιοχές του κόσμου [5].....	30
<b>Πίνακας 1.3</b> Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ορισμένες περιοχές της Ελλάδας.....	31
<b>Πίνακας 1.4</b> Ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών σε Παγκόσμια κλίμακα μέχρι το έτος 2020.....	33
<b>Πίνακας 1.5</b> Ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών σε Ευρωπαϊκή κλίμακα μέχρι το έτος 2020.....	33
<b>Πίνακας 1.6</b> Ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών στον ελλαδικό χώρο μέχρι το έτος 2020.....	33
<b>Πίνακας 4.1</b> Ιδιότητες Υλικών Θερμικής Αποθήκευσης.....	71
<b>Πίνακας 5.1</b> Χαρακτηριστικά Σταθμού .....	97
<b>Πίνακας 6.1</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – Wnet=30MW – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	135
<b>Πίνακας 6.2</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – Wnet=50MW – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	136
<b>Πίνακας 6.3</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – Wnet=70MW – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	137
<b>Πίνακας 6.4</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=1500 στρεμμάτων – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	139
<b>Πίνακας 6.5</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2000 στρεμμάτων – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	140
<b>Πίνακας 6.6</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2500 στρεμμάτων – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	141
<b>Πίνακας 6.7</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – Wnet=30MW – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	142
<b>Πίνακας 6.8</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – Wnet=50MW – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	143
<b>Πίνακας 6.9</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – Wnet=70MW – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος .....	144
<b>Πίνακας 6.10</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=1500 στρεμμάτων – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	146
<b>Πίνακας 6.11</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2000 στρεμμάτων – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	147

<b>Πίνακας 6.12</b> Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2500 στρεμμάτων – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.....	148
<b>Πίνακας 7.1</b> Σύγκριση μεγεθών σταθμού, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος .....	153
<b>Πίνακας 7.2</b> Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Ον. Ισχύς – Χωρίς Περιορισμούς).....	155
<b>Πίνακας 7.3</b> Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Ον. Ισχύς – Με Περιορισμούς).....	155
<b>Πίνακας 7.4</b> Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Έκταση Γης – Χωρίς Περιορισμούς).....	155
<b>Πίνακας 7.5</b> Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Έκταση Γης – Με Περιορισμούς).....	156

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

---

## Ηλιοθερμικοί Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στους Ηλιοθερμικούς σταθμούς ενέργειας, αναφέρονται οι προϋποθέσεις ώστε ένας τύπος να είναι κατάλληλος για έναν τέτοιο σταθμό καθώς επίσης και κάποια γενικά στοιχεία.

### 1.1 Εισαγωγή

Σήμερα, η πλειοψηφία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στην παραγωγή ατμού μέσα από την καύση άνθρακα, πετρελαίου, αερίων ή από πυρηνική σχάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Σε ολόκληρο τον πλανήτη, 11 δισεκατομμύρια τόνοι  $\text{CO}_2$  παράγονται μόνο από την καύση άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας, με τεράστιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις [1]. Για αυτό το λόγο, δημιουργήθηκε η ανάγκη για τη δημιουργία μιας νέας, φιλικής προς το περιβάλλον, τεχνολογίας για την παραγωγή ατμού και κατά συνέπεια ενέργειας. Έτσι, η ιδέα της χρήσης της Ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή της απαραίτητης θερμότητας αντί για την χρήση των παραπάνω μεθόδων οδήγησε στην ανάπτυξη των Ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τρόπος λειτουργίας τους είναι απλός. Συγκεντρώνουν ενέργεια από την Ηλιακή ακτινοβολία, την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας κάποιον θερμοδυναμικό κύκλο (συνήθως κύκλο Rankine) παράγουν Ηλεκτρική ενέργεια.

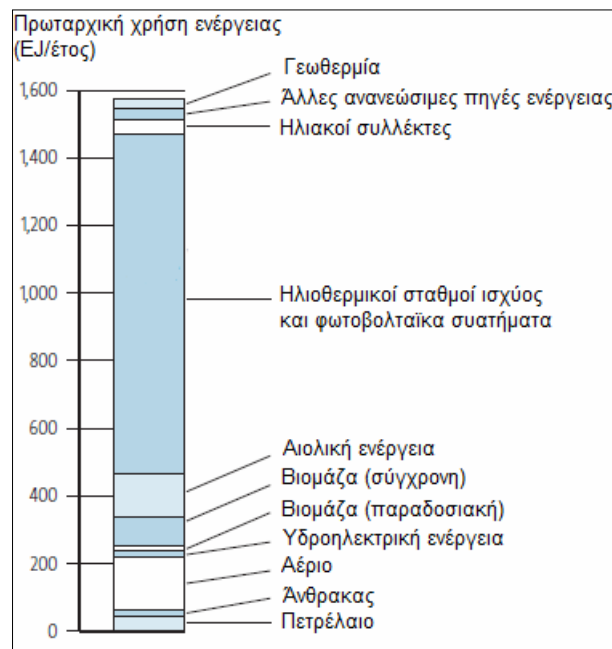
Οι πρώτοι, μικρής κλίμακας, Ηλιοθερμικοί σταθμοί κατασκευάστηκαν την δεκαετία του 1860 στη Γαλλία και τις Η.Π.Α. Σήμερα, οι μεγαλύτεροι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φτάνουν μέχρι ισχύ 80 MW και βρίσκονται στη νότια Καλιφόρνια. Εκεί υπάρχουν συνολικά 9 σταθμοί (Πίνακας 1.1) συνολικής ισχύος 354 MW που παράγουν ετησίως περίπου 800 GWh, ενέργεια αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες μιας μεσαίου μεγέθους πόλης 200.000 κατοίκων [2].

SEGS	I	II	II	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1 <sup>ος</sup> χρόνος λειτουργίας	1985	1986	1987	1987	1988	1989	1989	1990	1991
Net Power (MW)	13,8	30	30	30	30	30	30	80	80
Gross Power (MW)	14,7	33	33	33	33	33	33	88	88
Έκταση Συλλεκτών (στρεμ.)	3	190	230	230	250	188	194	464	484

Πίνακας 1.1 Βασικά χαρακτηριστικά των SEGS [3]

Με την υπάρχουσα κατάσταση οι ηλιοθερμικοί σταθμοί απαιτούν κρατική υποστήριξη ώστε να εξασφαλίσουν την ανταγωνιστική βιωσιμότητά τους. Σε μερικά χρόνια, η συγκεκριμένη τεχνολογία πιθανότατα δεν θα απαιτεί τέτοια υποστήριξη και έτσι θα είναι ικανή να ανταγωνιστεί σταθμούς ορυκτών καυσίμων φορτίου αιχμής και μεσαίου φορτίου.

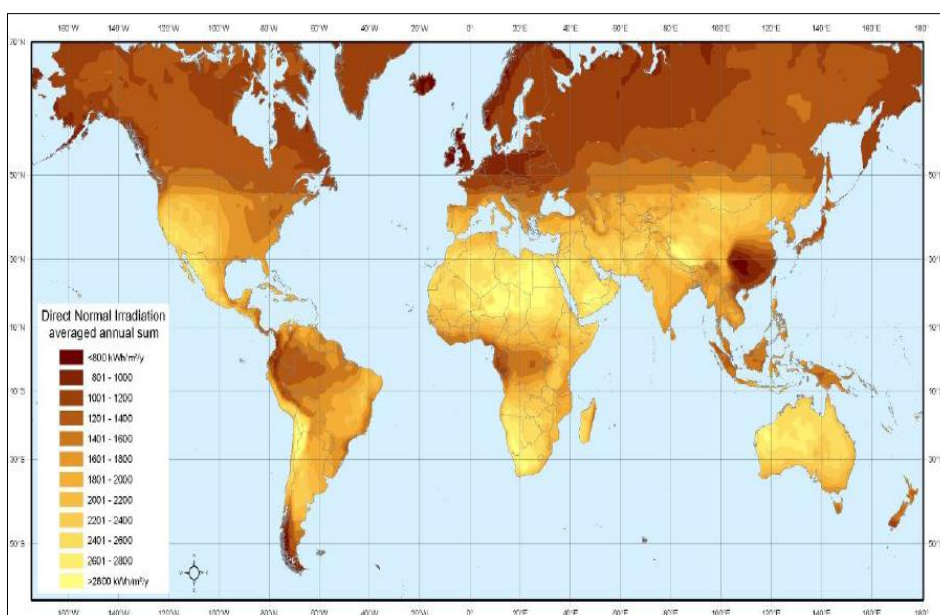
Μελέτες γνωστών ιδρυμάτων έδειξαν ότι προβλέπεται μεγάλη ανάπτυξη για τους Ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ηλιοθερμικών σταθμών θα αυξηθεί τουλάχιστον στα 20000 MW μέχρι το 2020. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται μία πρόβλεψη του Γερμανικού Συμβουλίου για την Παγκόσμια Αλλαγή (WBGU) για την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας το έτος 2100. Στη πρόβλεψη αυτή, βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας θα παράγεται από τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την Ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 1.1 Πρόβλεψη Ενεργειακής Ζήτησης/Κάλυψης για το έτος 2100 [4]

## 1.2 Κατάλληλες Τοποθεσίες για ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών Ενέργειας

Η ηλιοθερμική ενέργεια εκμεταλλεύεται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, έτσι οι αντίστοιχοι σταθμοί θα πρέπει να γίνονται σε τοποθεσίες με υψηλά ποσοστά άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Μία τοποθεσία για να είναι κατάλληλη θα πρέπει να μπορεί να παρέχει τουλάχιστον 2000 KWh ηλιακής ενέργειας ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας ετησίως, όταν οι καλύτερες τοποθεσίες παρέχουν περισσότερο από 2500 KWh/m<sup>2</sup> (Σχήμα 1.2). Τέτοιες τοποθεσίες είναι αυτές στις οποίες το κλίμα και η βλάστηση δεν προσφέρουν υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής υγρασίας, όπως στέπες, θαμνώδεις εκτάσεις, σαβάνες, ημερημικές και ερημικές περιοχές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος μεταξύ -40 και 40 μοιρών.



Σχήμα 1.2 Επίπεδα Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας και η κατανομή τους στον πλανήτη [5]

### 1.2.1 Παγκόσμιο Επίπεδο

Οι πιο κατάλληλες περιοχές του κόσμου για την κατασκευή ενός Ηλιοθερμικού σταθμού είναι οι νοτιοδυτικές Η.Π.Α., η κεντρική και νότια Αμερική, η Αφρική, η Μέση Ανατολή, οι Μεσογειακές Χώρες της Ευρώπης, το Ιράν, το Πακιστάν, οι ερημικές περιοχές της Ινδίας, της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, η Κίνα και η Αυστραλία όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1.3. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 1.2) φαίνονται διάφορες περιοχές με τις αντίστοιχες Ηλιακές τους ακτινοβολίες και τις εκτάσεις τους.

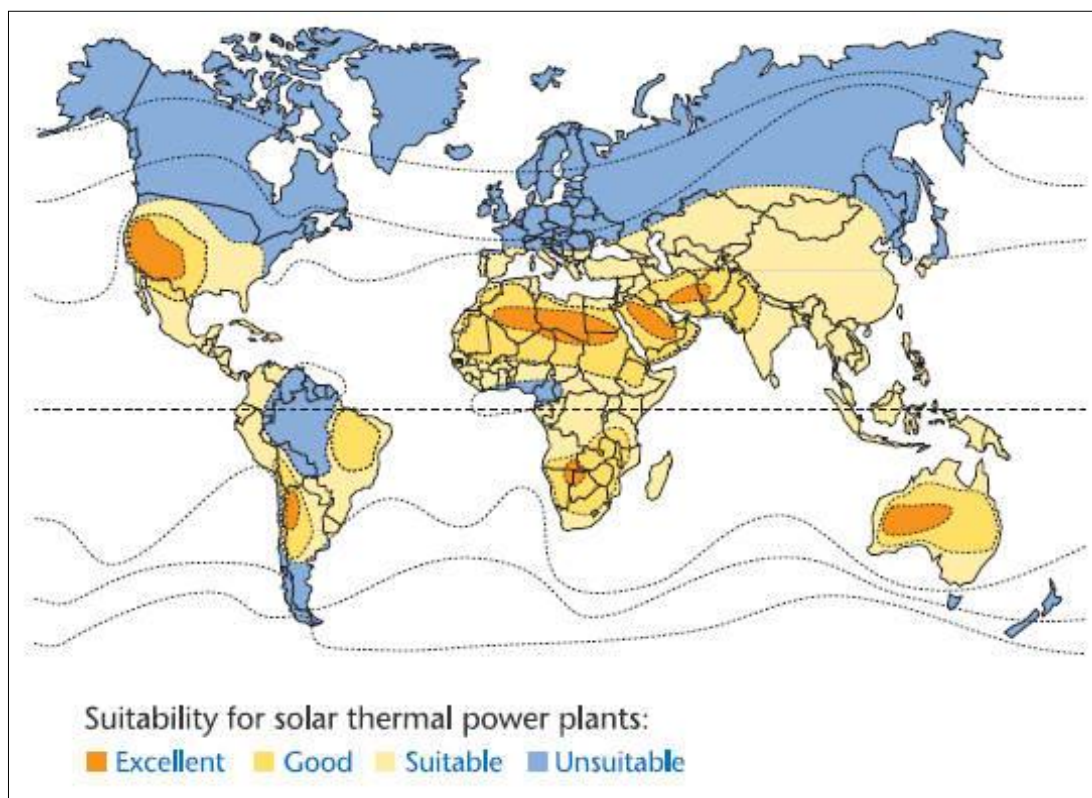
Επίπεδα DNI (KWh/m <sup>2</sup> )	Αφρική (Km <sup>2</sup> )	Αυστραλία (Km <sup>2</sup> )	Κεντρική Ασία (Km <sup>2</sup> )	Κίνα (Km <sup>2</sup> )	Κεντρική και Νότια Αμερική (Km <sup>2</sup> )	Ινδία (Km <sup>2</sup> )
2000 - 2099	1.082.050	70.164	151.109	88.171	334.096	83.522
2100 - 2199	1.395.900	187.746	3.025	184.605	207.927	11.510
2200 - 2299	1.351.050	355.188	3.594	415.720	232.678	5.310
2300 - 2399	1.306.170	812.512	1.642	263.104	191.767	7.169
2400 - 2499	1.862.850	1.315.560	569	99.528	57.041	3.783

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> Ηλιοθερμικοί Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής

<b>2500 - 2599</b>	1.743.270	1.775.670	-	96.836	31.434	107
<b>2600 - 2699</b>	1.468.970	1.172.760	-	17.939	42.139	976
<b>2700 - 2799</b>	2.746.100	393.850	-	24.435	93.865	120
<b>Σύνολο (Km<sup>2</sup>)</b>	12.956.360	6.083.450	159.939	1.190.948	1.190.000	112.497

<b>Επίπεδα DNI (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Μέση Ανατολή (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Μεξικό (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Υπόλοιπη Αναπτυσσόμενη Ασία (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Υπόλοιπη Ανατολική Ευρώπη (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Η.Π.Α. (Km<sup>2</sup>)</b>
<b>2000 – 2099</b>	36.315	16.999	47.520	59	149.166
<b>2100 – 2199</b>	125.682	34.123	52.262	129	172.865
<b>2200 – 2299</b>	378.654	35.263	105.768	23	210.128
<b>2300 – 2399</b>	557.299	53.765	284.963	-	151.870
<b>2400 – 2499</b>	633.994	139.455	172.043	-	212.467
<b>2500 – 2599</b>	298.775	60.972	37.855	-	69.364
<b>2600 – 2699</b>	265.541	12.628	2.084	-	19.144
<b>2700 – 2799</b>	292.408	14.903	1.082	-	-
<b>Σύνολο (Km<sup>2</sup>)</b>	2.588.648	368.108	368.108	211	985.005

*Πίνακας 1.2 Κατανομή επιπέδων άμεσης Ηλιακής ακτινοβολία σε διάφορες περιοχές του κόσμου [5]*



*Σχήμα 1.3 Απεικόνιση τοποθεσιών που είναι κατάλληλες για εγκατάσταση Ηλιοθερμικών Σταθμών Ενέργειας*



### 1.2.2 Εθνικό Επίπεδο

Κατάλληλες περιοχές στην Ελλάδα για κατασκευή Ηλιοθερμικού σταθμού είναι η Κρήτη, η Ρόδος και η νότια Πελοπόννησος. Υπό προϋποθέσεις θα μπορούσε να είναι και η ανατολική Αττική. Στον επόμενο Πίνακα (Πίνακας 1.3) παρουσιάζονται ορισμένες περιοχές της Ελλάδας με την αντίστοιχη άμεση ηλιακή ακτινοβολία τους κατά την διάρκεια ενός χρόνου.

Τοποθεσία	Επίπεδα DNI (KWh/m <sup>2</sup> )
Μέγαρα Αττικής	1718
Ανατολική Αττική	1690
Θήβα	1677
Λακωνία	1903
Ακρωτήριο	2338

*Πίνακας 1.3 Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ορισμένες περιοχές της Ελλάδας*

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται ορισμένες από τις περιοχές που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 1.3.



*Σχήμα 1.4 Θήβα, Μέγαρα Αττικής, Ανατολική Αττική, περιοχές κατάλληλες για Ηλιοθερμικό σταθμό*



Σχήμα 1.5 Ακρωτήρι, περιοχή κατάλληλη για Ηλιοθερμικό σταθμό

### 1.3 Τρόπος λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μια σχετικά απλή διαδικασία. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί και να συλλεχθεί με την χρήση διάφορων τεχνολογιών συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να παρέχει θερμότητα σε μέτριες ως υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η θερμότητα στην συνέχεια χρησιμοποιείται ώστε να λειτουργήσει ένας συμβατικός κύκλος παραγωγής ισχύος και να παράγει ηλεκτρισμό.

Υπάρχουν πέντε βασικές τεχνολογίες για την συγκέντρωση της Ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτές είναι: i)η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων, ii)η τεχνολογία Ηλιακού πύργου, iii)η τεχνολογία παραβολικών πιάτων με μηχανές Stirling, iv)η τεχνολογία Ηλιακής καμινάδας και v)η τεχνολογία Fresnel.

Η θερμότητα που συλλέγεται κατά την διάρκεια της ημέρας μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρά, στερεά ή υλικά αλλαγής φάσης όπως υδροποιημένα άλατα, κεραμικά, τσιμέντο ή μελλοντικά σε μείγματα αλάτων αλλαγής φάσης. Τη νύχτα μπορεί να εξαχθεί θερμότητα από το μέσο αποθήκευσης και να χρησιμοποιηθεί ώστε να λειτουργήσει ο σταθμός, βοηθώντας έτσι στις αιχμές του φορτίου κατά τις βραδινές ώρες.

### 1.4 Το μέλλον των Ηλιοθερμικών Σταθμών Ενέργειας

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 η ανάπτυξη των Ηλιοθερμικών σταθμών θα είναι ραγδαία τα επόμενα χρόνια. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>, την δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας και την παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας.

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά σε παγκόσμια, σε ευρωπαϊκή και σε εθνική κλίμακα.



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> Ηλιοθερμικοί Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής

### Παγκόσμια Κλίμακα:

Χρονολογία	Σύνολο MW	Σύνολο MWh	Σύνολο tCO <sub>2</sub>	Συνολική Επένδυση(M\$)	Θέσεις Εργασίας
2002	354	708.000	424.800	0	0
2005	505	1.058.000	634.800	375	9.900
2010	1.550	6.095.500	3.657.300	1.280	11.929
2015	5.990	15.208.000	9.124.800	2.056	72.294
2020	21.540	54.583.000	32.749.800	7.687	198.774

*Πίνακας 1.4 Ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών σε Παγκόσμια κλίμακα μέχρι το έτος 2020*

### Ευρωπαϊκή Κλίμακα:

Χρονολογία	Σύνολο MW	Σύνολο MWh	Σύνολο tCO <sub>2</sub>	Συνολική Επένδυση(M\$)	Θέσεις Εργασίας
2002	0	0	0	0	0
2005	100	250.000	150.000	250	1.300
2010	470	1.800.000	1.080.000	310	1.950
2015	1.620	4.050.000	2.430.000	426	3.250
2020	3.970	9.925.000	5.955.000	775	7.150

*Πίνακας 1.5 Ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών σε Ευρωπαϊκή κλίμακα μέχρι το έτος 2020*

### Εθνική Κλίμακα:

Χρονολογία	Σύνολο MW	Σύνολο MWh	Σύνολο tCO <sub>2</sub>	Συνολική Επένδυση(M\$)	Θέσεις Εργασίας
2002	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	0
2015	350	1.000.000	600.000	267	650
2020	750	1.875.000	1.125.000	141	1.300

*Πίνακας 1.6 Ανάπτυξη Ηλιοθερμικών Σταθμών στον ελλαδικό χώρο μέχρι το έτος 2020*



## Κεφάλαιο 2°

---

### Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, κατά κάποιο τρόπο, όπως και οι συμβατικοί σταθμοί. Η διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι η απαραίτητη για την λειτουργία τους ενέργεια παρέχεται από την συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας η οποία μετατρέπεται είτε σε ατμό υψηλής θερμοκρασίας ή χρησιμοποιείται για την θέρμανση κάποιου αερίου τα οποία κινούν έναν στρόβιλο ή κάποια μηχανή. Τέσσερα βασικά στοιχεία απαιτούνται: ένας συγκεντρωτής, ένας συλλέκτης, κάποια μορφή μέσου μεταφοράς θερμότητας ή αποθήκευσης και ένας εναλλάκτης θερμότητας. Πολλοί διαφορετικοί τύποι συστημάτων είναι πιθανοί, αλλά πέντε είναι οι πιο πολλά υποσχόμενες ηλιοθερμικές τεχνολογίες. Μερικές από αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιούνται ήδη σε πραγματικούς σταθμούς ενέργειας και άλλες βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Οι τεχνολογίες αυτές περιγράφονται και εξηγούνται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

#### 2.1 Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων

Κάτοπτρα παραβολικού σχήματος (Σχήμα 2.1) χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμικά αποδοτικούς σωλήνες απορρόφησης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην ευθεία εστίασης του παραβολικού κατόπτρου. Σε αυτούς τους σωλήνες κυκλοφορεί κάποιο μέσο μεταφοράς θερμότητας, όπως συνθετικό θερμικό έλαιο. Αφού θερμανθεί σε θερμοκρασία περίπου 400 °C από τις ηλιακές ακτίνες που έχουν συγκεντρωθεί, το έλαιο αντλείται σε μία σειρά εναλλακτών θερμότητας ώστε να παραχθεί υπέρθερμος ατμός. Ο ατμός μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σε έναν ατμοστρόβιλο ο οποίος μπορεί είτε να είναι μέρος ενός συμβατικού κύκλου ατμού είτε ενσωματωμένος σε έναν συνδυασμένο κύκλο ατμού – καυσαερίων.

Η αρχή λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών που είναι σχεδιασμένοι με βάση την τεχνολογία παραβολικού κατόπτρου φαίνεται στο σχήμα 2.3 και είναι αντιπροσωπευτική για την πλειοψηφία των σταθμών αυτού του τύπου που λειτουργούν σήμερα. Το πεδίο συλλογής είναι μία μεγάλη έκταση η οποία καλύπτεται από ηλιακούς συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου μονού άξονα. Το ηλιακό πεδίο συντίθεται από πολλές παράλληλες γραμμές ηλιακών συλλεκτών οι οποίοι είναι προσανατολισμένοι στον οριζόντιο άξονα βορρά νότου. Οι συλλέκτες ακολουθούν τον ήλιο από την ανατολή στην δύση κατά την διάρκεια της

ημέρας, με κατάλληλο μηχανισμό οδήγησης (Σχήμα 2.2), ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να εστιάζεται συνεχώς στον γραμμικό απορροφητή.



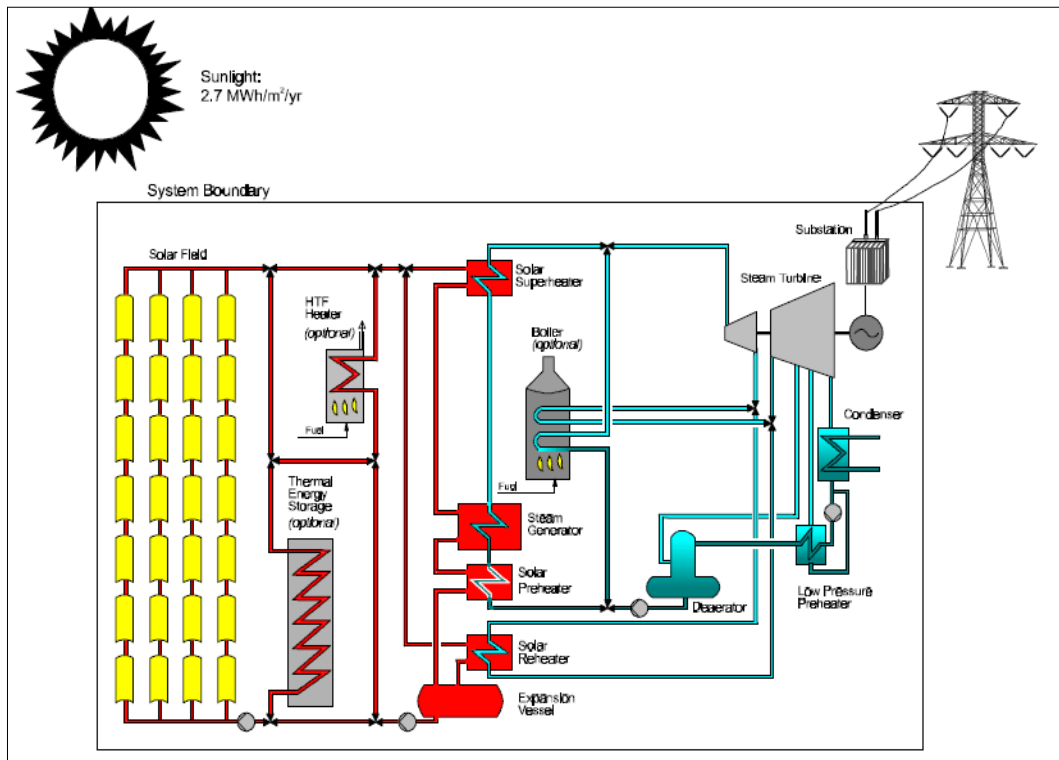
*Σχήμα 2.1* Ηλιοθερμικός σταθμός με τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων



*Σχήμα 2.2* Μηχανισμός οδήγησης κατόπτρου [7]

### 2.1.1 Χρήση Συμβατικού Καυσίμου για βοηθητική λειτουργία του σταθμού

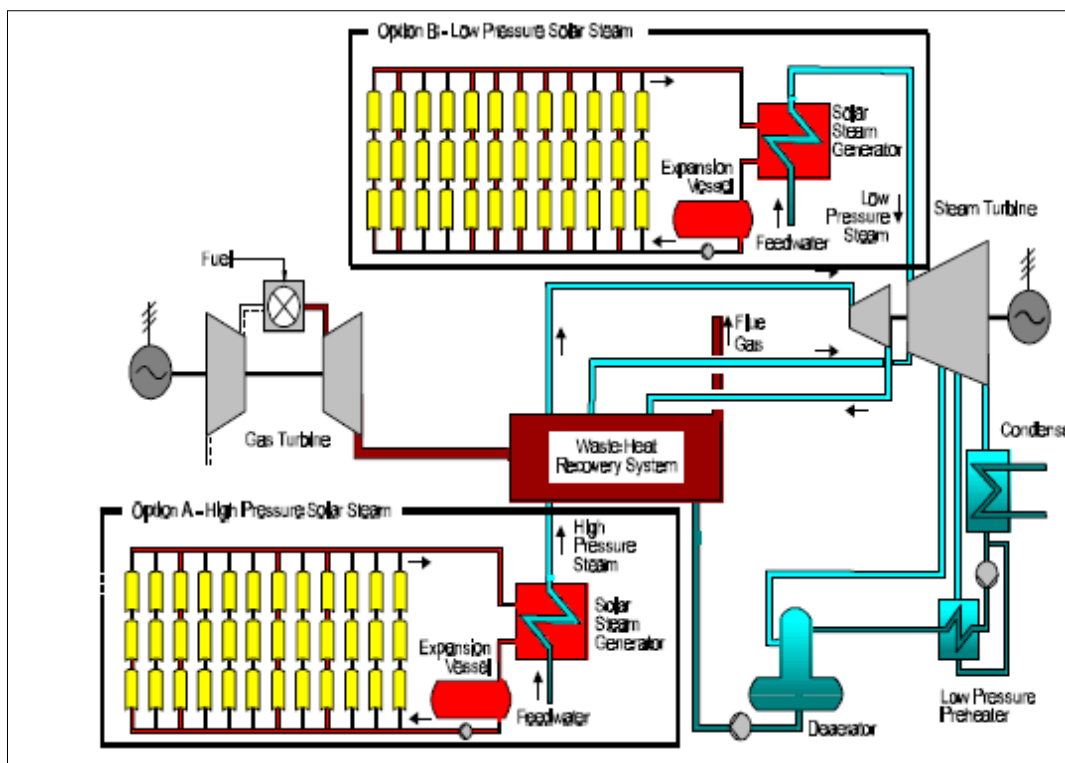
Πολλοί ηλιοθερμικοί σταθμοί, τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων, διαθέτουν συνήθως συμβατικό λέβητα που βοηθάει στην διατήρηση της ισχύος σε περιόδους συννεφιάς και ενώ η αποθήκη είναι άδεια, στην γρήγορη έναρξη της λειτουργίας του σταθμού τις πρωϊνές ώρες, στη λειτουργία του μετά τη δύση του ήλιου και στην διατήρηση της λειτουργικότητας του συνθετικού ελαίου και του υγροποιημένου άλατος (μέσο αποθήκευσης) [8].



Σχήμα 2.3 Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού σταθμού με χρήση συμβατικού καυσίμου για βοηθητική λειτουργία

### 2.1.2 Χρήση Συμβατικού Καυσίμου για κύρια λειτουργία του σταθμού (μονάδα συνδυασμένου κύκλου ISCCS)

Το ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένου κύκλου είναι μια ηλιακή εγκατάσταση με παραβολικά κάτοπτρα τα οποία συνδέονται με μια εγκατάσταση στροβιλογεννήτριας (τουρμπίνας) αερίου συνδυασμένου κύκλου. Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνεται μείωση του κόστους και αύξηση της αποδοτικότητας της ηλιακής εγκατάστασης. Το σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός συστήματος “ISCCS” (Integrated Solar Combined Cycle System) παρουσιάζεται παρακάτω [8].



Σχήμα 2.4 Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού σταθμού με χρήση συμβατικού καυσίμου για κύρια λειτουργία

Σε αυτού του είδους τα συστήματα, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ως συμπλήρωμα στην θερμότητα που παράγει το συμβατικό καύσιμο με αποτέλεσμα την αύξηση της μετατροπής ενέργειας στο υποσύστημα του κύκλου Rankine. Ως συμπέρασμα συνάγεται ότι η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή πρόσθετου ατμού ενώ η χαμένη, από την στροβιλογεννήτρια, θερμότητα χρησιμοποιείται για την προθέρμανση ή την υπερθέρμανση του ατμού.

Τα πλεονεκτήματα μιας εγκατάστασης «ISCCS» είναι:

- Το μικρότερο κόστος εγκατάστασης, αναλογικά με την απόδοση του, σε σχέση με το κόστος μιας απλής (κύκλου Rankine) ηλιακής εγκατάστασης.
- Η μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

### 2.1.3 Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των παραβολικών κατόπτρων είναι τα εξής:

- Αποδεδειγμένη ετήσια απόδοση 14 – 18%.
- Μέγεθος ισχύος μέχρι και 80 MW.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να προσεγγίσει μέχρι και τους 500°C.
- Εμφανίζουν ικανοποιητικό βαθμό χρήσης γης σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες Ηλιοθερμικών.
- Παρέχουν δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας.
- Υπάρχουν αποδεδειγμένα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας.
- Το σύστημα tracker ενός άξονα διασφαλίζει χαμηλότερο κόστος κατασκευής και υψηλότερη αξιοπιστία.



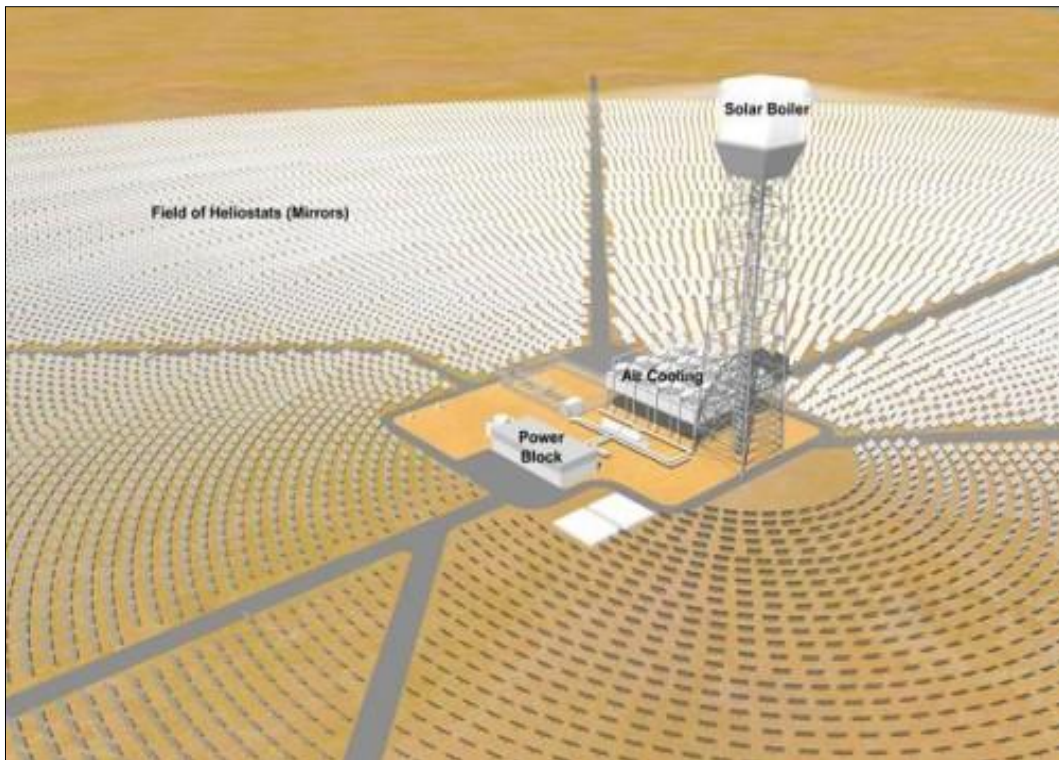
### 2.1.4 Μειονεκτήματα Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας των παραβολικών κατόπτρων είναι τα εξής:

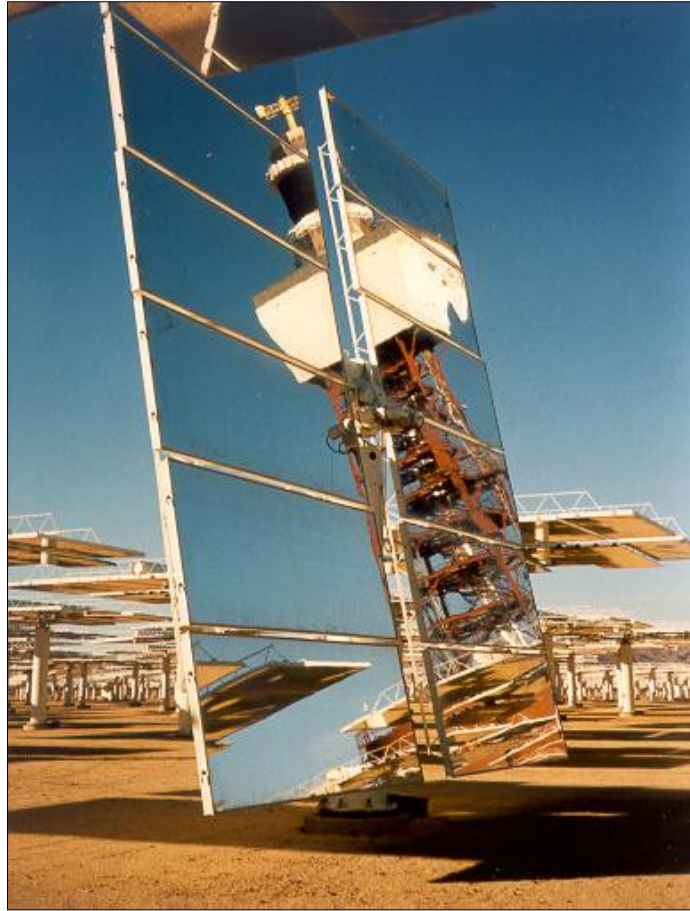
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης.
- Η εμπορική λειτουργία (χρήση συνθετικού ελαίου) οδηγεί σε ατμό μέτριας ποιότητας (θερμοκρασία ελαίου < 400°C).

### 2.2 Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου

Μια κυκλική συστοιχία ηλιοστατών (Σχήμα 2.6) (μεγάλα μεμονωμένα κάτοπτρα που ακολουθούν την πορεία του ήλιου) χρησιμοποιείται για να συγκεντρωθεί η ηλιακή ακτινοβολία σε έναν κεντρικό συλλέκτη ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός πύργου (Σχήμα 2.5). Κάποιο μέσο μεταφοράς θερμότητας το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα στον συλλέκτη απορροφά την υψηλής συγκέντρωσης ακτινοβολία η οποία αντανακλάται από τους ηλιοστάτες και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού ο οποίος κινεί κάποιο στρόβιλο. Έχουν δοκιμαστεί διάφορα μέσα μεταφοράς θερμότητας συμπεριλαμβανομένου των νερό/ατμός, υγροποιημένα άλατα, υγρό νάτριο και αέρας. Αν κάποιο αέριο ή ακόμα και αέρας συμπιεστεί μέσα στον συλλέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά για να κινήσει κάποιο αεριοστρόβιλο (αντί να παραχθεί ατμός για ατμοστρόβιλο).



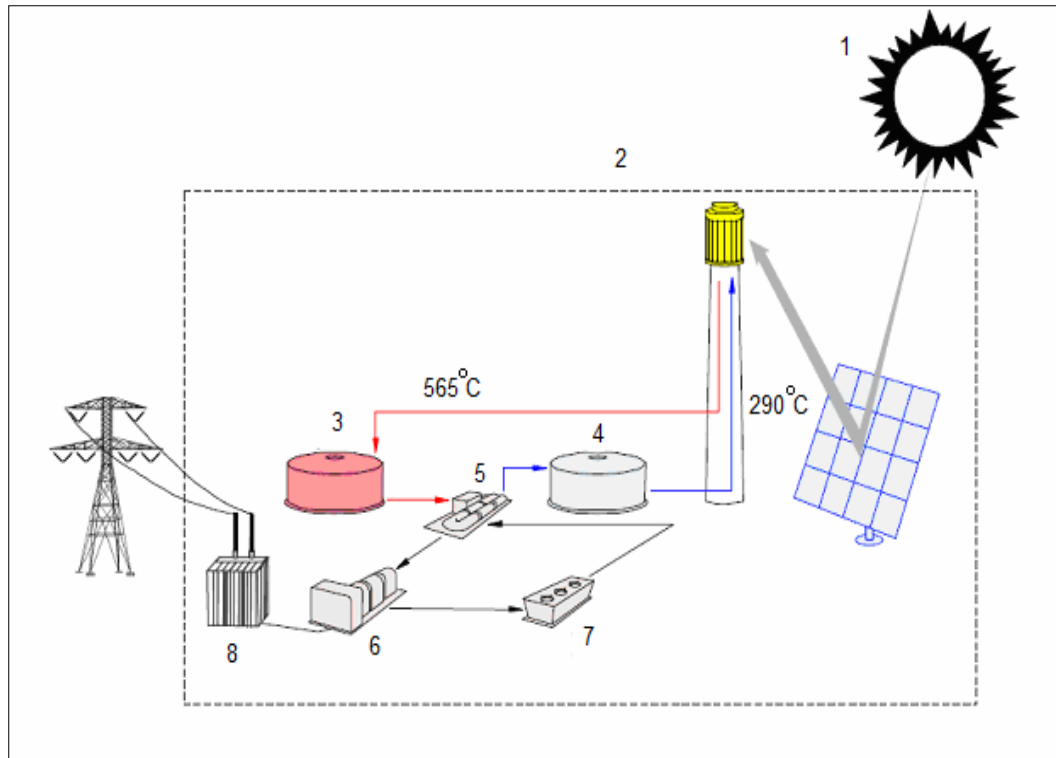
Σχήμα 2.5 Ηλιοθερμικός Σταθμός με Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου



*Σχήμα 2.6 Αναπαράσταση Ηλιοστάτη*

Σε έναν ηλιακό πύργο υγροποιημένου άλατος το υγρό άλας θερμοκρασίας 290 °C αντλείται από μία ‘κρύα’ δεξαμενή αποθήκευσης και διαμέσου του συλλέκτη όπου θερμαίνεται στους 565 °C οδηγείται σε μία θερμή δεξαμενή για αποθήκευση. Όταν απαιτείται παραγωγή ισχύος από τον σταθμό, το θερμό υγρό αλάτι οδηγείται σε έναν ατμοπαραγωγό όπου παράγεται υπέρθερμος ατμός για ένα συμβατικό σύστημα ατμοστροβίλου – γεννήτριας που βασίζεται στον κύκλο Rankine. Από τον ατμοπαραγωγό, το αλάτι επιστρέφει στην ‘κρύα’ δεξαμενή όπου αποθηκεύεται ώστε να επαναληφθεί η διαδικασία. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται τα βασικά μονοπάτια της ροής σε έναν ηλιοθερμικό σταθμό ηλιακού πύργου υγροποιημένου άλατος. Ο καθορισμός του βέλτιστου μεγέθους της αποθήκης ενέργειας ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις ισχύος είναι πολύ σημαντικό κομμάτι στην σχεδίαση του σταθμού.





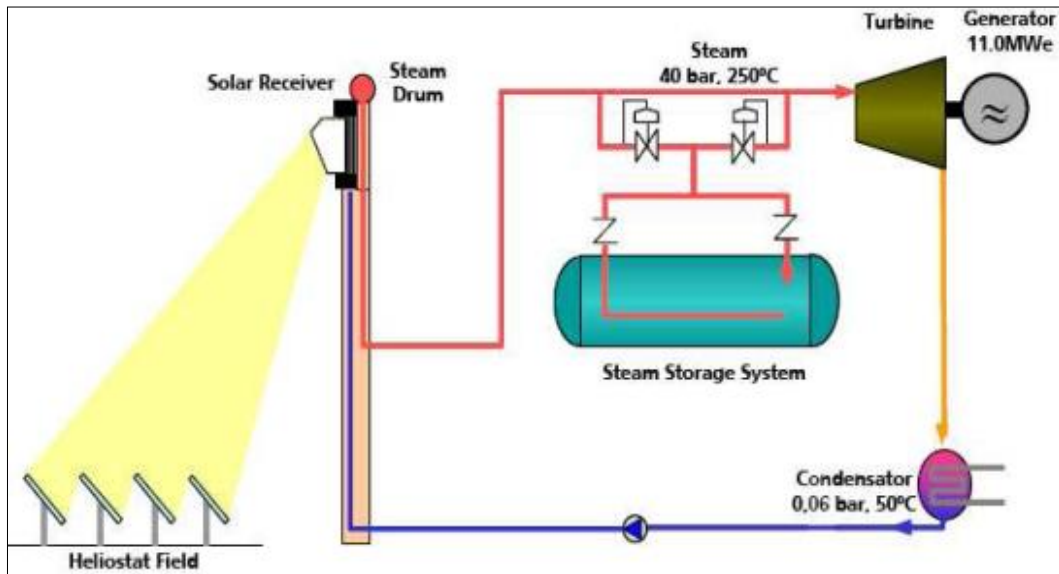
**Σχήμα 2.7** Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου (χρήση υγροποιημένου άλατος ως HTF) [9]

όπου:

- 1 : Ηλιακή Ακτινοβολία
- 2 : Όρια συστήματος
- 3 : Θερμή δεξαμενή αποθήκευσης
- 4 : Ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης
- 5 : Ατμοπαραγωγός
- 6 : Ατμοστρόβιλος
- 7 : Συμπυκνωτής
- 8 : Υποσταθμός

Το πεδίο των ηλιοστατών που περιβάλλει τον ηλιακό πύργο είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να βελτιστοποιείται η ετήσια απόδοση του σταθμού. Η έκταση του ηλιακού πεδίου όπως και ο συλλέκτης διαστασιολογούνται ανάλογα με της ανάγκες της εφαρμογής. Σε συνηθισμένες εγκαταστάσεις η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται με ρυθμούς μεγαλύτερους από τον μέγιστο ρυθμό που απαιτείται ώστε να παρέχεται ατμός στον στρόβιλο. Συνεπώς το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να φορτίζεται ενόσω ο σταθμός λειτουργεί στο ονομαστικό του φορτίο. Ο λόγος της θερμικής ισχύος που παρέχεται από το σύστημα συλλογής (το πεδίο των ηλιοστατών και τον συλλέκτη) προς το μέγιστο της θερμικής ισχύος που απαιτείται από την στροβιλογεννήτρια ονομάζεται ηλιακός πολλαπλασιαστής (Solar Multiple). Με έναν ηλιακό πολλαπλασιαστή της τάξεως του 2,7 ένας ηλιακός πύργος υγροποιημένου άλατος που βρίσκεται στην έρημο Mojave της Καλιφόρνια μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να έχει συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας περίπου 65% . Συνεπώς, ένας ηλιοθερμικός σταθμός ηλιακού πύργου μπορεί να λειτουργήσει το 65% του χρόνου χωρίς την ανάγκη υποστήριξης από εφεδρική πηγή καυσίμου. Χωρίς την αποθήκευση ενέργειας οι ηλιακές τεχνολογίες περιορίζονται σε ετήσιο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας γύρω στο 25% [10].

Τέλος, στο επόμενο σχήμα φαίνεται η λειτουργία ενός σταθμού με ηλιακό πύργο όταν αυτός λειτουργεί παράγοντας απευθείας ατμό στην κορυφή του πύργου.



Σχήμα 2.8 Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου (απευθείας παραγωγή ατμού)

### 2.2.1 Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας Ηλιακού Πύργου

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου είναι τα εξής:

- Είναι δυνατή η επίτευξη θερμοκρασιών τάξεως ακόμη και  $1000^{\circ}\text{C}$  (έχει αποδειχτεί ότι μπορούν να φτάσουν τους  $565^{\circ}\text{C}$ ).
- Απορρόφηση θερμότητας μέσω του Ηλιακού πύργου εξασφαλίζει εύκολη και προσιτή μετάβαση σε μελλοντικές τεχνολογίες.
- Είναι δυνατή η αποθήκευση ενέργειας σε υψηλές τιμές θερμοκρασιών.
- Είναι δυνατή η υβριδική λειτουργία του σταθμού με χρήση συμβατικού λέβητα.
- Καλύτερη λειτουργία σε περίπτωση αερόψυκτου συστήματος ψύξης.
- Είναι δυνατή η χρήση μη επίπεδων εκτάσεων.

### 2.2.2 Μειονεκτήματα Τεχνολογίας Ηλιακού Πύργου

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου είναι τα εξής:

- Τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας δεν είναι επιβεβαιωμένα.
- Μικρός αριθμός υφιστάμενων σταθμών, υψηλότερες αντανάκλασεις Ηλιακού πεδίου, μεγαλύτερες απαιτήσεις γης.
- Υποστήριξη παραγωγής από θέρμανση τηγμένου άλατος είναι απαραίτητη, αυξάνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος.

### 2.3 Τεχνολογία Παραβολικών «Πιάτων» με μηχανές Stirling

Τα συστήματα ηλιακών δίσκων χρησιμοποιούν μεγάλης κλίμακας ηλιακά κάτοπτρα που σχηματικά μοιάζουν με δορυφορικά πιάτα μετάδοσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

Η επιφάνεια ανάκλασης τους αποτελείται από καθρέφτες σε σχηματισμό παραβολικού «πιάτου» με διάμετρο που κυμαίνεται συνήθως από 5 έως 10 μέτρα. Τα «πιάτα» αυτά χρησιμοποιούν μηχανισμό tracking που τους επιτρέπει την κίνηση σε δύο άξονες.

Ο συλλέκτης της ανακλώμενης ακτινοβολίας βρίσκεται στο κέντρο του «πιάτου» έχοντας ενσωματωμένη μία μηχανή Stirling. Η συγκεντρωμένη ακτινοβολία απορροφάται από υγρό ή αέριο μέσο, στη συνέχεια έχουμε διαστολή του μέσου και λειτουργία της μηχανής Stirling. Με αυτή τη τεχνική είναι δυνατή η ανάπτυξη θερμοκρασιών της τάξεως των 750°C στο εσωτερικό της μηχανής.



Σχήμα 2.9 Σύστημα Ηλιακού παραβολικού δίσκου

Τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος βρίσκονται στην υψηλή αποδοτικότητά τους, η απόδοσή τους είναι της τάξεως του 32%, στην υβριδική τους λειτουργία και στην ευελιξία τους. Ανάλογα με το σταθμό και την περιοχή εγκατάστασής τους, τα παραπάνω συστήματα καλύπτουν έκταση σχεδόν 10.000 τετραγωνικών μέτρων ανά εγκατεστημένο MWe και κοστίζουν σχεδόν 10.000 ευρώ ανά KWe για ηλιακά πρωτότυπα ή 1.000 ευρώ ανά KWe για υβριδικά συστήματα μαζικής παραγωγής.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένας ηλιοθερμικός σταθμός, τεχνολογίας παραβολικών πιάτων με μηχανές Stirling.





*Σχήμα 2.10 Αναπαράσταση πάρκου, τεχνολογίας παραβολικών πιάτων με μηχανές Stirling*

## 2.4 Τεχνολογία Fresnel

Η τεχνολογία μοιάζει αρκετά με αυτή των παραβολικών κατόπτρων. Η διάταξή τους φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Υπάρχουν πολλοί, μικροί επίπεδοι καθρέφτες τοποθετημένοι ο ένας δίπλα στον άλλο, έχοντας τη δυνατότητα να κινούνται ανεξάρτητα σε επίπεδο ενός άξονα.

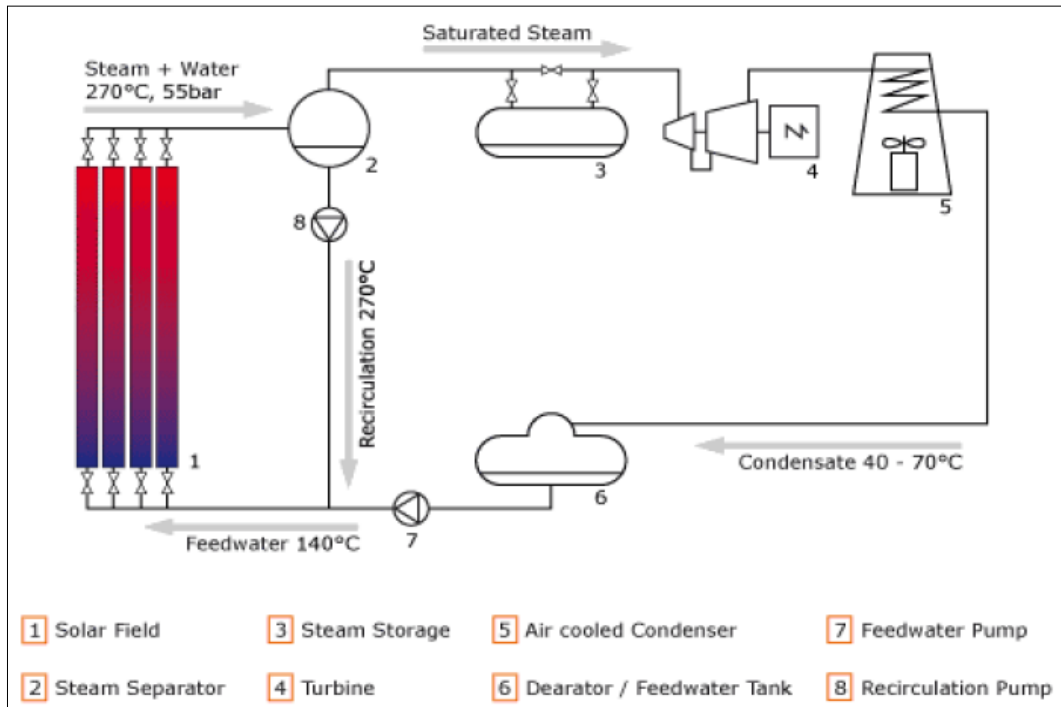


*Σχήμα 2.11 Ηλιοθερμικός Σταθμός με Τεχνολογία Fresnel*

Ο συλλέκτης της ανακλώμενης ακτινοβολίας (σε αντίθεση με την τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων) είναι στερεωμένος πάνω από το επίπεδο των καθρεφτών και διαρρέεται (συνήθως) από μείγμα νερού-ατμού που απορροφώντας την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία δίνει υπέρθερμο ατμό θερμοκρασίας 270°C και πίεσης 55 bar στην έξοδο του πεδίου όπως

φαίνεται και στο Σχήμα 2.12. Στην συνέχεια ο υπέρθερμος ατμός οδηγείται σε στροβιλογεννήτρια προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τεχνολογία Fresnel έχει μικρότερη απόδοση από την τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων, αλλά έχει μικρότερο κόστος σε σύγκριση με τους άλλους ηλιοθερμικούς σταθμούς. Είναι επίσης δυνατή υβριδική λειτουργία (παράλληλη λειτουργία με συμβατικό λέβητα).



Σχήμα 2.12 Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με τεχνολογία Fresnel

όπου:

- 1 : Ηλιακό πεδίο
- 2 : Διαχωριστής ατμού
- 3 : Αποθήκευση ατμού
- 4 : Στροβιλογεννήτρια
- 5 : Αερόψυκτος συμπυκνωτής
- 6 : Εξαερωτήρας
- 7 : Αντλία υδροδότησης
- 8 : Αντλία ανακυκλοφορίας

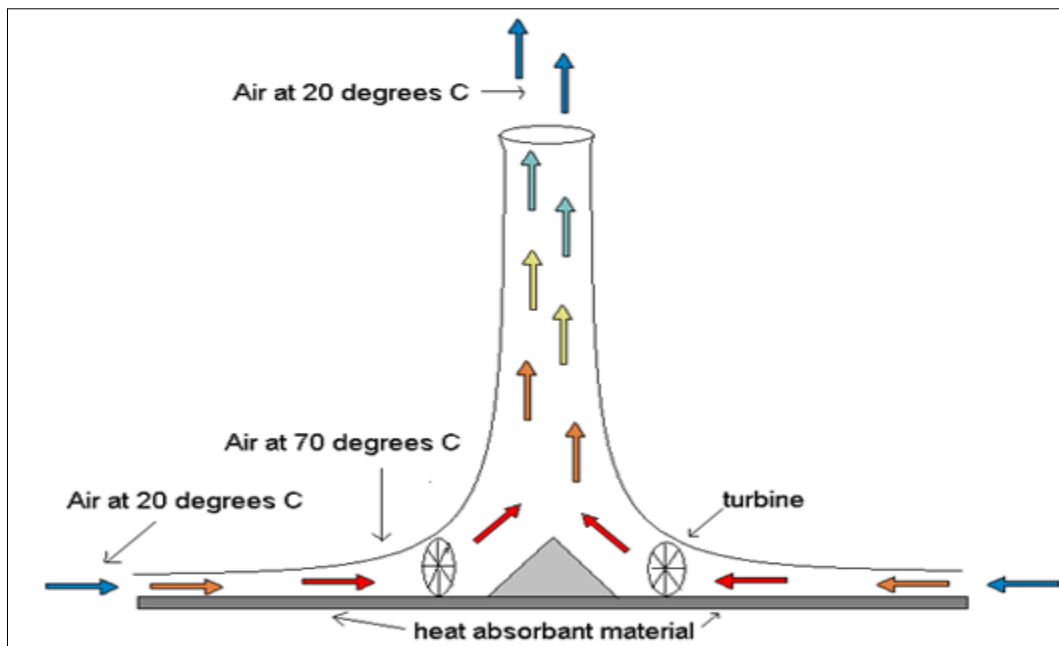
## 2.5 Τεχνολογία Ηλιακής «Καμινάδας»

Αποτελείται από έναν πύργο-καμινάδα και μία γυάλινη επιφάνεια στη βάση του (Σχήμα 2.13). Η γυάλινη επιφάνεια επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να τη διαπεράσει και να θερμάνει τον αέρα που βρίσκεται μεταξύ αυτής και του εδάφους. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα στη βάση του πύργου και αυτού στην κορυφή, προκαλεί κίνηση του θερμού αέρα από την βάση του προς την κορυφή του. Η κίνηση αυτή του αέρα από κάτω προς τα πάνω κινεί τουρμπίνα (μοιάζει με αυτή των Α/Γ) που βρίσκεται εντός του πύργου (Σχήμα 2.14), παράγοντας ακολούθως ηλεκτρική ενέργεια. Πειραματική εφαρμογή αποτελούσαν από πύργο ύψους 200m και γυάλινη επιφάνεια ακτίνας 122m.



Σχήμα 2.13 Ηλιοθερμικός Σταθμός με Τεχνολογία Ηλιακής «Καμινάδας»

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού σταθμού με Ηλιακή «καμινάδα».



Σχήμα 2.14 Απεικόνιση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού με Ηλιακή «Καμινάδα»

## 2.6 Σύγκριση Ηλιακών Θερμικών Συστημάτων

Τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων είναι διασυνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, επεξεργάζονται μέσω με υψηλό επίπεδο θερμοκρασιών και η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς μιας μονάδας μέχρι σήμερα φθάνει τα 80MWe.

Τα συστήματα ηλιακού πύργου είναι επίσης συνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο και επεξεργάζονται υψηλό επίπεδο θερμοκρασιών. Η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς μιας μονάδας μέχρι σήμερα φθάνει τα 10MWe.

Τα συστήματα παραβολικών δίσκων είναι απομονωμένα συστήματα ενέργειας εκτός δικτύου ή αποτελούν μέρη μεγάλων πάρκων παραγωγής τα οποία συνδέονται σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς μονάδας δίσκου μέχρι σήμερα φθάνει τα 25KWe.





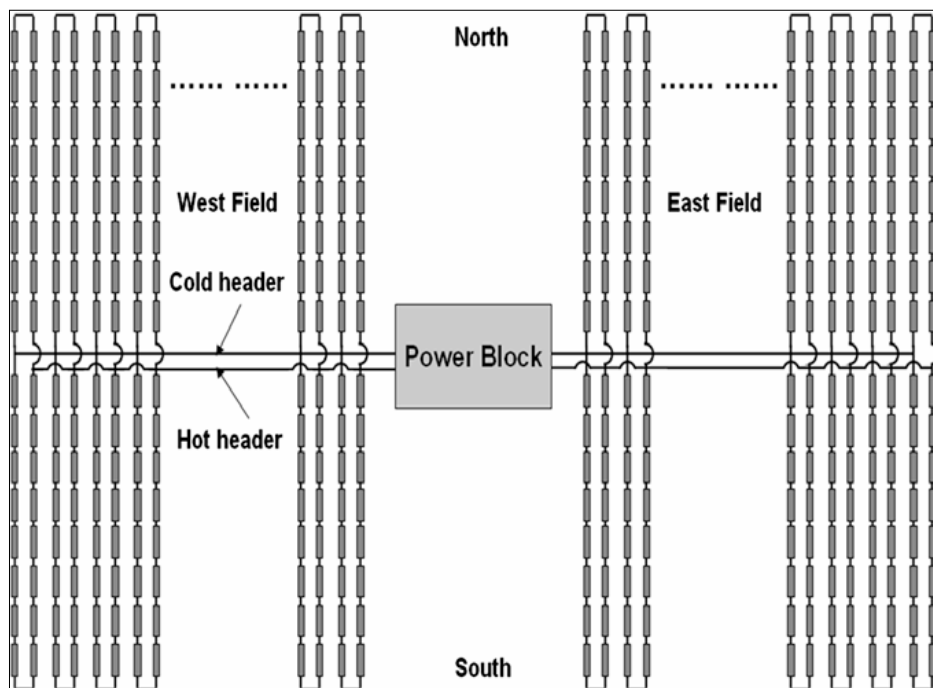
## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)

Σε αυτό το Κεφάλαιο, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του Ηλιακού Πεδίου των Ηλιοθερμικών σταθμών και παρουσιάζονται παραδοχές που έχουν γίνει για τον σταθμό που θα προσομοιωθεί στο Κεφάλαιο 5.

#### 3.1 Εισαγωγή

Αρχικά παρουσιάζεται μία κάτοψη (Σχήμα 3.1) ενός Ηλιοθερμικού σταθμού. Σε αυτή, φαίνονται το Ηλιακό Πεδίο που αποτελείται από τους βρόχους, οι σωληνώσεις που οδηγούν το μέσο μεταφοράς θερμότητας από και προς το Ηλιακό Πεδίο, όπως επίσης και ο κύκλος ισχύος του σταθμού (Power Block). Στο Power Block βρίσκονται επίσης το σύστημα ψύξης του σταθμού, ο καυστήρας (εφ' όσον υπάρχει) καθώς και οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται. Ένα σημαντικό τμήμα του Ηλιοθερμικού σταθμού, που δεν φαίνεται όμως εδώ, είναι η αποθήκη του.

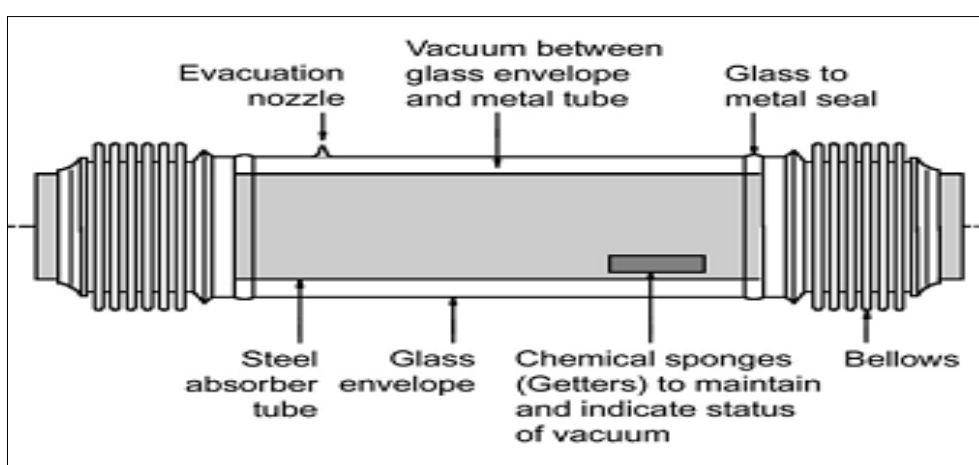


Σχήμα 3.1 Κάτοψη ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού [11]

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)

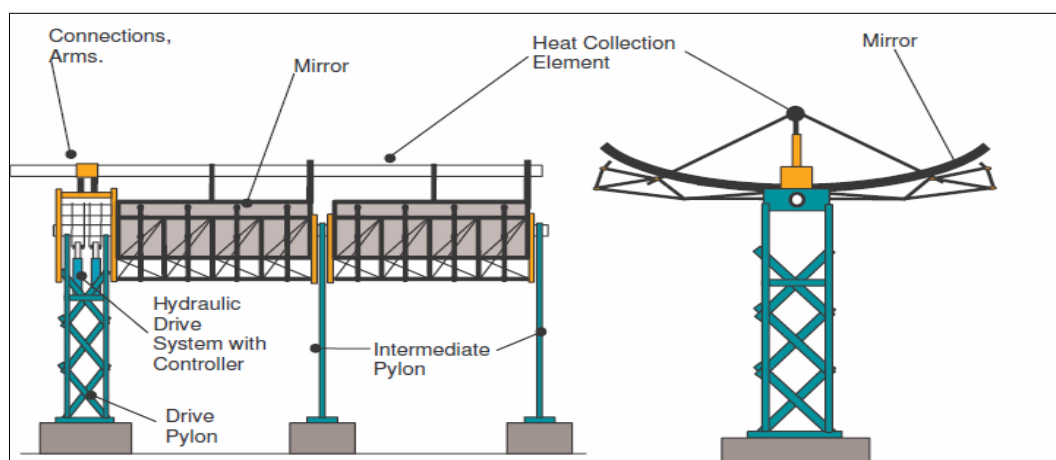
Το μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF) διοχετεύεται από το Power Block στο Ηλιακό Πεδίο μέσω ενός κεντρικού σωλήνα (Cold Header). Στη συνέχεια, το λάδι από αυτόν τον κεντρικό σωλήνα διοχετεύεται σε κάθε έναν ηλιακό βρόχο, κάθε ένας από τους οποίους αποτελείται από τέσσερις ηλιακούς συλλέκτες (SCAs), οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε δύο παράλληλες σειρές, των δύο συλλεκτών η κάθε μία. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας κινούμενο μέσα στον ηλιακό βρόχο θερμαίνεται απορροφώντας θερμική ενέργεια και εξέρχεται από αυτόν. Τελικώς, το μέσο μεταφοράς θερμότητας που έχει θερμανθεί από τον κάθε βρόχο συγκεντρώνεται και πάλι σε έναν κεντρικό σωλήνα (Hot Header) και κατευθύνεται προς το Power Block και συγκεκριμένα στον εναλλάκτη θερμότητας [12].

Το μέσο μεταφοράς θερμότητας απορροφά την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία διαμέσου του στοιχείου συλλογής θερμότητας το οποίο βρίσκεται στο σημείο εστίασης κάθε παραβολικού κατόπτρου. Το σχήμα 5.2 αναπαριστά ένα τυπικό στοιχείο συλλογής θερμότητας (HCE).



Σχήμα 3.2 Αναπαράσταση ενός τυπικού στοιχείου συλλογής θερμότητας

Μία σχηματική απεικόνιση ολόκληρου του συστήματος του ηλιακού συλλέκτη (SCA), το οποίο δείχνει την δομή και την τοποθεσία των συστημάτων οδήγησης του ηλιακού συλλέκτη, φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.3 Σχηματική απεικόνιση ενός ηλιακού συλλέκτη (SCA) [Πηγή: Stuetzle, 2002]

Η αύξηση της θερμοκρασίας, του μέσου μεταφοράς θερμότητας (HTF), από το ηλιακό πεδίο είναι της τάξης των 100°C, από μία θερμοκρασία εισόδου 293°C σε μία θερμοκρασία εξόδου

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)

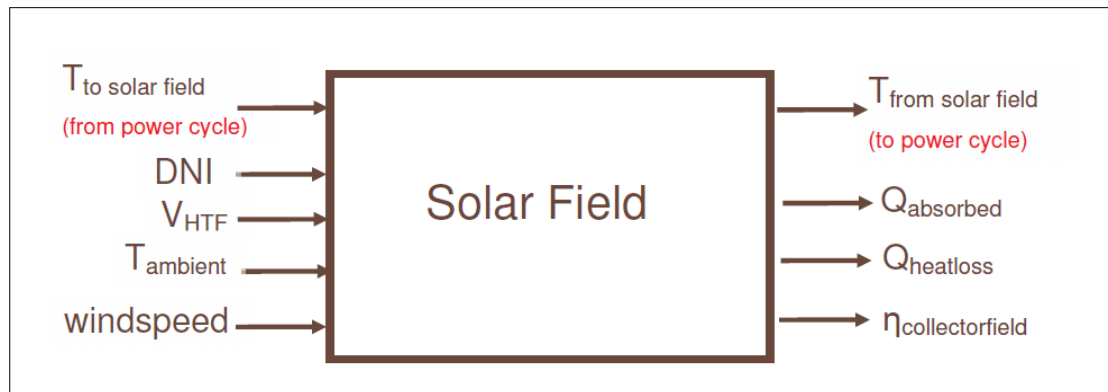
γύρω στους 390°C. Κατά την διάρκεια συννεφιασμένων ημερών ή μη καλοκαιρινών περιόδων η αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι χαμηλότερη για μία σταθερή ροή ταχύτητας λαδιού. Η πραγματική θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στην έξοδο του Ηλιακού Πεδίου εξαρτάται από μία σειρά από μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των εξής: της ταχύτητας ροής του μέσου μεταφοράς θερμότητας, της θερμοκρασίας εισόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο, της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, των θερμικών απωλειών, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της καθαρότητας των συλλεκτών, της ακρίβειας παρακολούθησης του ήλιου και των επιφανειακών ιδιοτήτων των υλικών του συλλέκτη.

Στο μοντέλο, που προσομοιώνεται στο Κεφάλαιο 5, γίνονται οι εξής παραδοχές:

$$T_{outlet} = 393 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (θερμοκρασία εξόδου του HTF από το ηλιακό πεδίο)}$$

$$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (θερμοκρασία περιβάλλοντος)}$$

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ροής του Ηλιακού Πεδίου.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής του Ηλιακού Πεδίου [12]

Οι απαιτούμενες εισοδοί για το μοντέλο του Ηλιακού Πεδίου είναι:

- Η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας (HTF) σε [°C] στην είσοδο του πεδίου.
- Η άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI) πάνω από το πεδίο [W/m<sup>2</sup>].
- Η ογκομετρική ροή του μέσου μεταφοράς θερμότητας σε [m<sup>3</sup>/sec].
- Η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος.
- Η ταχύτητα του αέρα σε [m/sec].

Το μοντέλο του Ηλιακού Πεδίου επιστρέφει την θερμοκρασία εξόδου του HTF, τον ρυθμό απορρόφησης ενέργειας, τις απώλειες ενέργειας του πεδίου, και την στιγμιαία αποδοτικότητα του πεδίου των συλλεκτών.

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας στην έξοδο του Ηλιακού Πεδίου μπορεί να διαιρεθεί σε τρία διαφορετικά στάδια. Αρχικά, υπολογίζεται η απορροφώμενη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία,  $Q_{absorbed}$ . Ως  $Q_{absorbed}$ , ορίζεται η ενέργεια η οποία απορροφάται πραγματικά από το μέσο μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του σωλήνα απορρόφησης. Η απορροφώμενη ακτινοβολία θα είναι κάποιο ποσοστό

της DNI, εξαρτώμενη από τη γωνία πρόσπτωσης, τη σκίαση των γραμμών, τη διαθεσιμότητα του ηλιακού πεδίου, την καθαρότητα των συλλεκτών και τις ιδιότητες του πεδίου συλλεκτών καθώς επίσης και της επιφάνειας των στοιχείων συλλογής θερμότητας. Στο επόμενο βήμα, υπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας των συλλεκτών,  $Q_{\text{heatloss}}$ . Η απώλεια θερμότητας στους συλλέκτες συμβαίνει εξ' αιτίας της ακτινοβολίας ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου συλλογής θερμότητας και στον ατμοσφαιρικό αέρα. Επίσης, στον όρο  $Q_{\text{heatloss}}$  συμπεριλαμβάνονται θερμικές απώλειες από τις σωληνώσεις που οδηγούν από και προς το κύκλωμα των συλλεκτών. Ένα απλό ισοζύγιο ενέργειας δείχνει ότι η διαφορά μεταξύ της απορροφώμενης ακτινοβολίας και των απωλειών του συλλέκτη είναι το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του μέσου μεταφοράς θερμότητας,  $Q_{\text{collected}}$ .

## 3.2 Απορροφώμενη Ηλιακή Ακτινοβολία

Η απορροφώμενη θερμική ενέργεια από το μέσο μεταφοράς θερμότητας δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [12]:

$$Q_{\text{absorbed}} = DNI * \cos(\theta) * IAM * RowShadow * EndLoss * n_{\text{Field}} * n_{\text{HCE}} \quad (3.1)$$

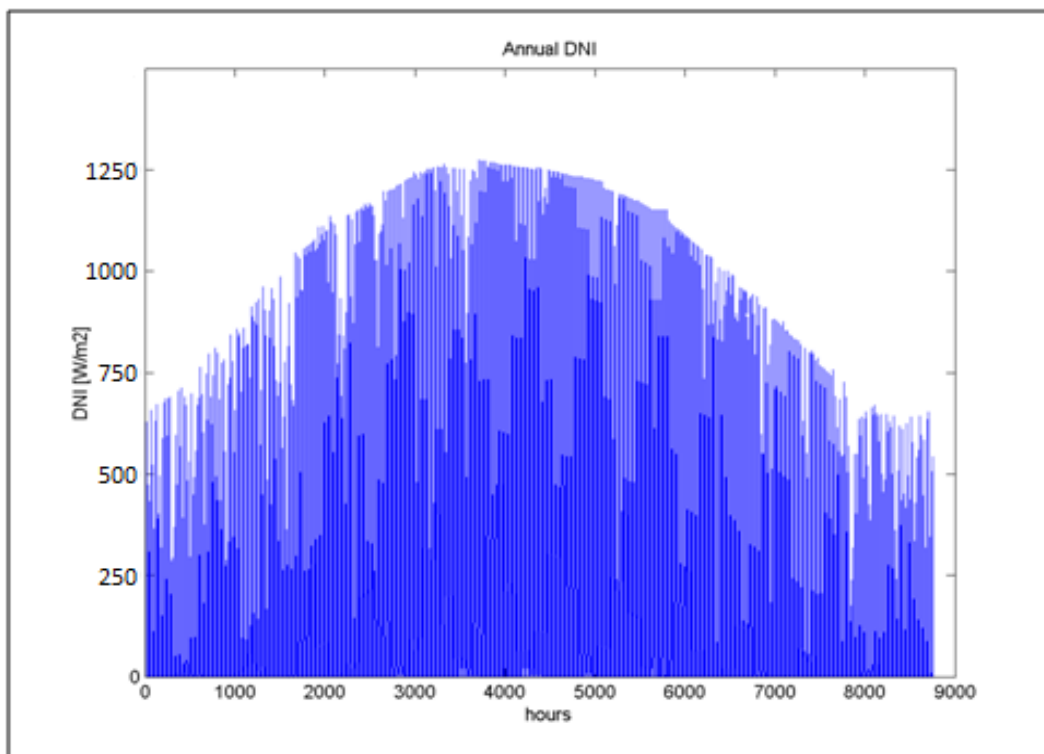
Κάθε παράγοντας της εξίσωσης (3.1) εξηγείται λεπτομερώς στις επόμενες παραγράφους.

### 3.2.1 Άμεση Κανονική Ηλιακή Ακτινοβολία (DNI)

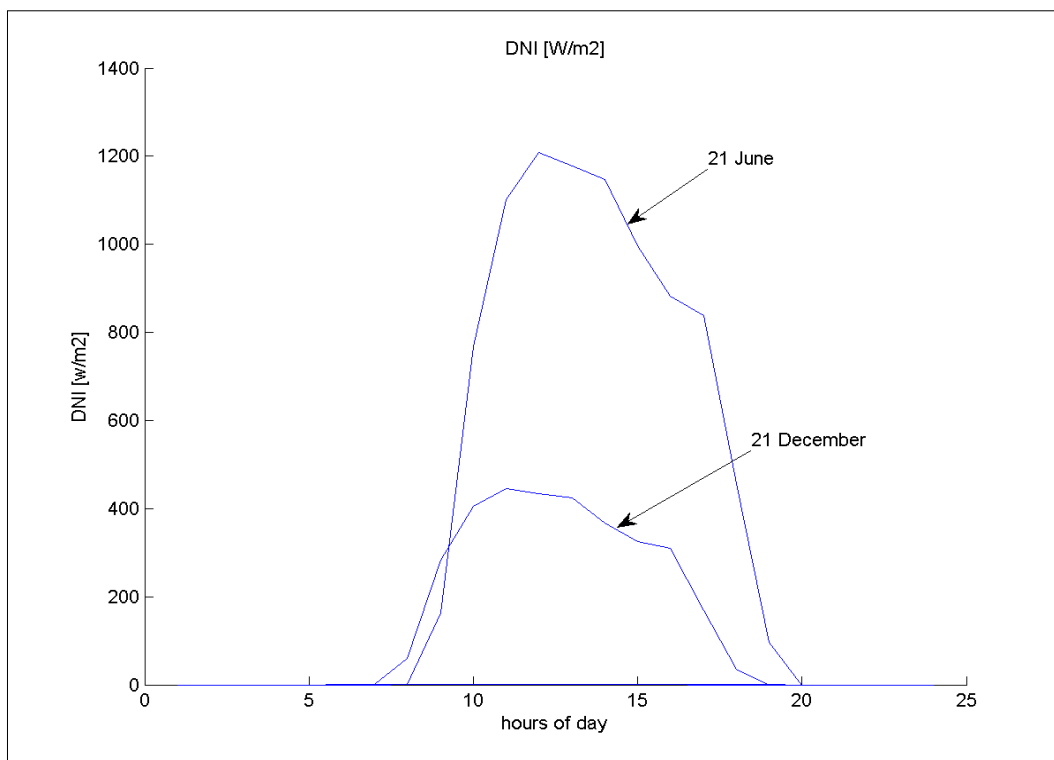
Η ηλιακή ακτινοβολία ακολουθεί μία ευθεία γραμμή από τον ήλιο στη γη. Με την είσοδό της στη γήινη ατμόσφαιρα κάποια ηλιακή ακτινοβολία διαχέεται από τα μόρια του αέρα, το νερό και την σκόνη που βρίσκεται διάχυτη στην ατμόσφαιρα. Η άμεση κανονική ακτινοβολία αντιστοιχεί σε εκείνο το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς να έχει διασπαρθεί ή απορροφηθεί από την ατμόσφαιρα.

Στα γραφήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται η Άμεση Κανονική Ηλιακή Ακτινοβολία για έναν ολόκληρο χρόνο και για τις ημέρες του χειμερινού και θερινού Ηλιοστάσιου (21 Δεκεμβρίου, 21 Ιουνίου) αντίστοιχα, για την περιοχή της Κρήτης.

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)



Γράφημα 3.1 Αναπαράσταση της ετήσιας Ηλιακής ακτινοβολίας

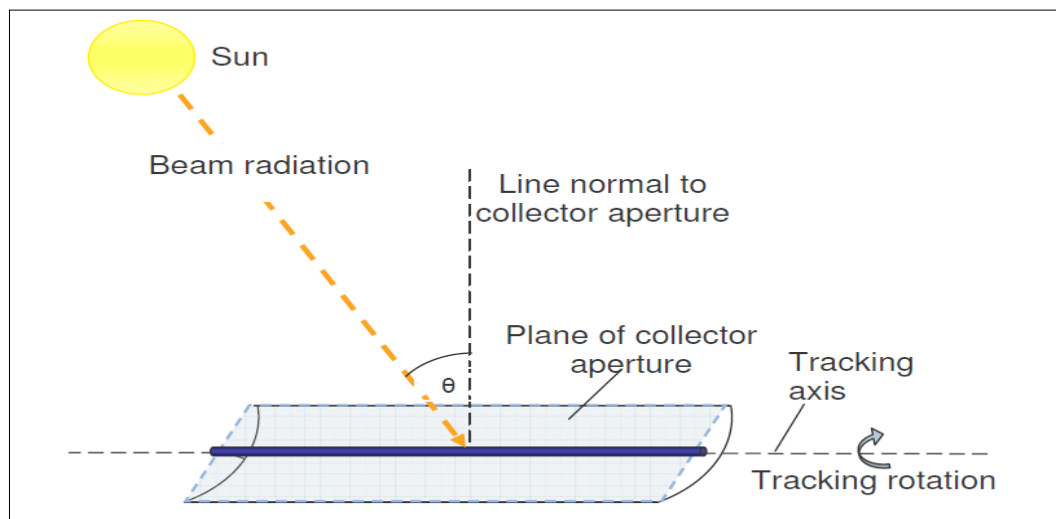


Γράφημα 3.2 Αναπαράσταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας για τις ημέρες του χειμερινού και θερινού Ηλιοστάσιου

### 3.2.2 Γωνία Πρόσπτωσης ( $\theta$ )

Μόνο η ακτινοβολία που είναι άμεσα κάθετα προς την επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να εστιαστεί και επομένως να είναι διαθέσιμη ώστε να θερμάνει τους σωλήνες απορρόφησης. Η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) αντιπροσωπεύει τη γωνία μεταξύ μιας δέσμης ακτινοβολίας που καταλήγει στην επιφάνεια της γης με την κάθετο στην επιφάνεια αυτή. Η γωνία πρόσπτωσης θα ποικίλλει κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (καθώς και όλο το χρόνο) και θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των συλλεκτών.

Το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.5) αναπαριστά αυτή τη γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση της γωνίας πρόσπτωσης για ένα παραβολικό κάτοπτρο [12]

Η γωνία πρόσπτωσης, για κάθε ώρα του έτους, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\cos(\theta) = \sqrt{(\cos(z)^2 + \cos(d)^2 * \sin(w)^2)} \quad (3.2)$$

όπου:

d : η γωνία απόκλισης.

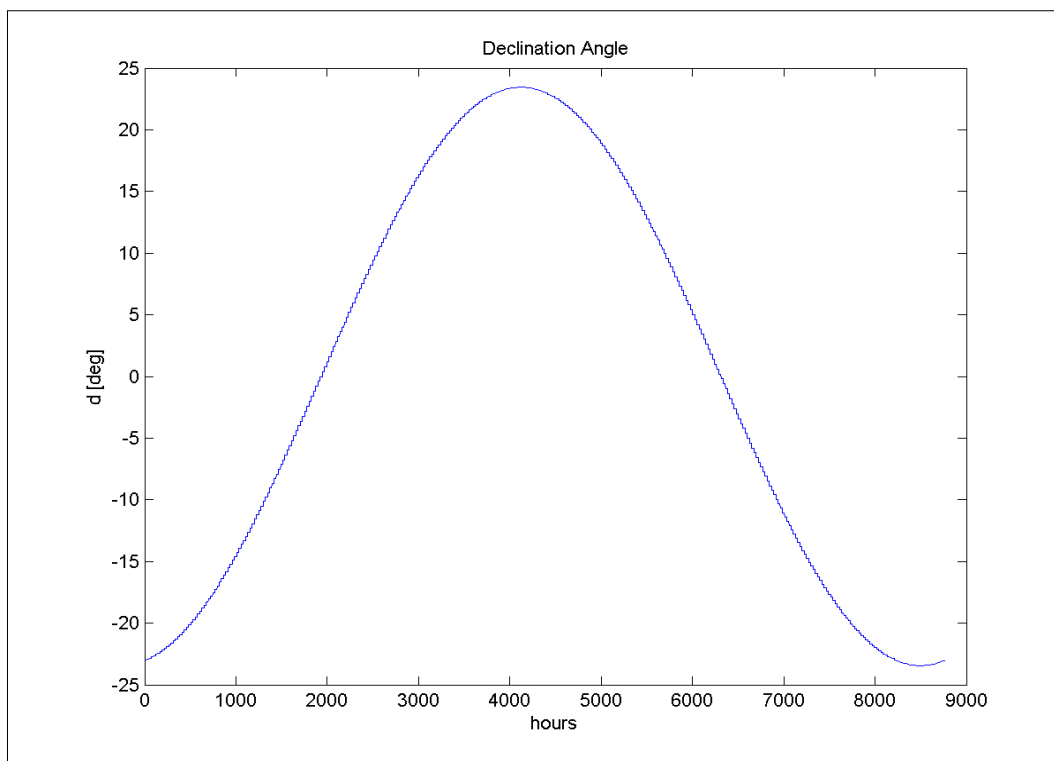
w : η γωνία της ώρας.

z : η γωνία ζενίθ.

#### 3.2.2.1 Γωνία Απόκλισης (d)

Η θέση του Ήλιου ποικίλλει κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία απόκλισης είναι η γωνιακή θέση του Ήλιου στο ηλιακό μεσημέρι, σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Αν η Γη περιστρεφόταν κατακόρυφα στον άξονά της τότε δεν θα υπήρχε καμία αλλαγή στην γωνία απόκλισης καθώς η γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο. Όμως, η Γη βρίσκεται σε κλίση ως προς τον άξονά της, σε μία γωνία  $23,45^\circ$ . Έτσι καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο κατά την διάρκεια ενός έτους, η γωνία απόκλισης θα παίρνει τιμές από  $-23,45^\circ$  έως  $+23,45^\circ$ .

Στο επόμενο γράφημα, φαίνεται η αναπαράσταση της γωνίας αποκλίσεως κατά τη διάρκεια ενός έτους.



Γράφημα 3.3 Αναπαράσταση της γωνίας αποκλίσεως

#### 3.2.2.2 Γωνία της ώρας ( $w$ )

Η θέση του Ήλιου εξαρτάται από την γωνία της ώρας, ή την γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού. Η γωνία της ώρας είναι αρνητική όταν ο ήλιος βρίσκεται ανατολικά του τοπικού μεσημβρινού (το πρωί), θετική όταν ο ήλιος βρίσκεται δυτικά του τοπικού μεσημβρινού (το απόγευμα), και μηδενική όταν ο ήλιος βρίσκεται στην ευθεία του τοπικού μεσημβρινού (το μεσημέρι) [12].

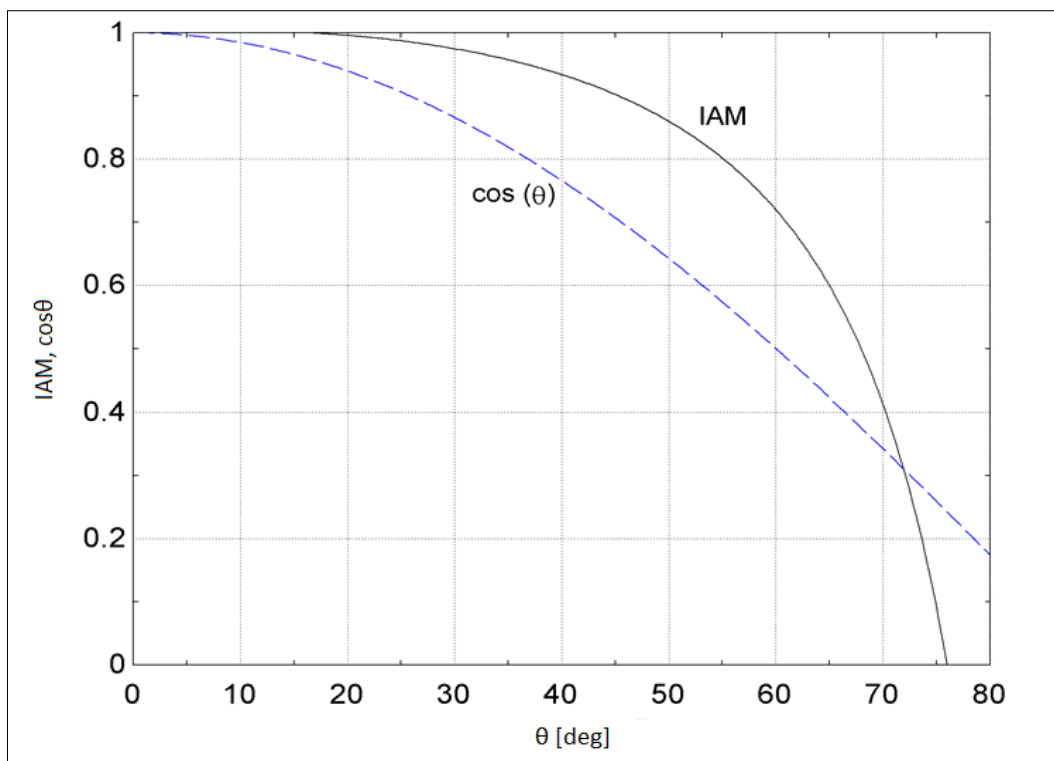
#### 3.2.2.3 Γωνία ζενίθ ( $z$ )

Η τελευταία γωνία που πρέπει να υπολογιστεί, ούτως ώστε να βρεθεί η γωνία πρόσπτωσης, είναι η γωνία ζενίθ. Η γωνία ζενίθ είναι η γωνία μεταξύ της γραμμής όρασης του ήλιου και της καθέτου και είναι εξαρτώμενη από την γωνία αποκλίσεως, από την γωνία της ώρας και από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας στην οποία αναφερόμαστε [13], [14].

#### 3.2.3 Μετατροπείας Γωνίας Πρόσπτωσης (IAM)

Εκτός από τις απώλειες που οφείλονται στην γωνία πρόσπτωσης, υπάρχουν και άλλες απώλειες που μπορούν να συσχετισθούν με τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτές οι απώλειες συμβαίνουν εξ' αιτίας της πρόσθετης αντανάκλασης και απορρόφησης από το γυάλινο περίβλημα όταν η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει. Ο μετατροπείας γωνίας πρόσπτωσης (IAM) διορθώνει αυτές τις πρόσθετες απώλειες των αντανάκλασεων και απορροφήσεων.

Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η σχέση του μετατροπεία της γωνίας πρόσπτωσης (IAM) με την γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ).



Γράφημα 3.4 Αναπαράσταση του μετατροπέα της γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

### 3.2.4 Σκίαση παράλληλων σειρών και απώλειες άκρων

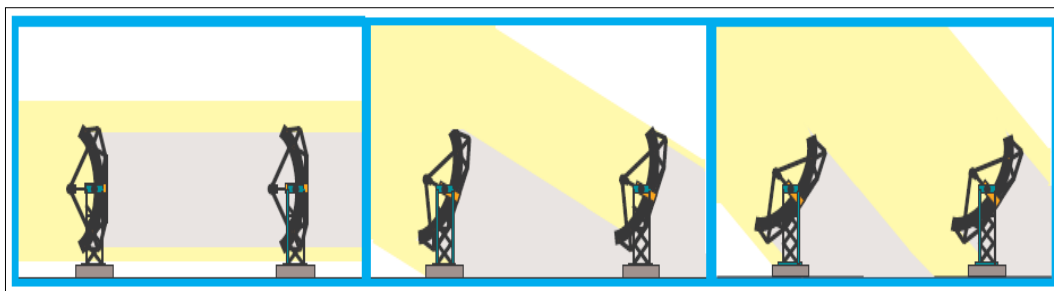
Η τοποθέτηση και η γεωμετρία των ηλιακών κατόπτρων και των στοιχείων συλλογής θερμότητας μπορούν να εισαγάγουν περαιτέρω απώλειες, εξ' αιτίας της σκίασης των παράλληλων σειρών το πρωί και το απόγευμα όπως επίσης και απώλειες άκρων από τα στοιχεία συλλογής θερμότητας.

Στον Ηλιοθερμικό σταθμό που προσομοιώνεται στο Κεφάλαιο 5, οι συλλέκτες είναι διατεταγμένοι σε παράλληλες σειρές, με περίπου 17m απόσταση μεταξύ της κάθε σειράς. Νωρίς το πρωί όλοι οι συλλέκτες είναι στραμμένοι στην ανατολή. Εξ' αιτίας της μικρής γωνίας ηλιακού ύψους το πρωί, η ανατολικότερη σειρά συλλεκτών δέχεται όλη την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά αυτή η σειρά θα σκιάζει όλες τις διαδοχικές σειρές προς τη δύση. Όσο ο ήλιος υψώνεται και οι συλλέκτες ακολουθούν τον ήλιο, αυτή η αμοιβαία σκίαση των σειρών μειώνεται μέχρι κάποια κρίσιμη γωνία ζενίθ στην οποία δεν συμβαίνει σκίαση γραμμών. Οι γραμμές των συλλεκτών παραμένουν ασκίαστες κατά την διάρκεια του μέσου της ημέρας, από αργά το πρωί μέχρι νωρίς το απόγευμα. Η αμοιβαία σκίαση των γραμμών επανεμφανίζεται πάλι αργά το απόγευμα και το δειλινό όταν η γωνία ηλιακού ύψους είναι και πάλι πολύ μικρή.

Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει την πορεία των ηλιακών συλλεκτών κατά την διάρκεια του πρωινού και την επακόλουθη σκίαση των σειρών που συμβαίνει κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου.



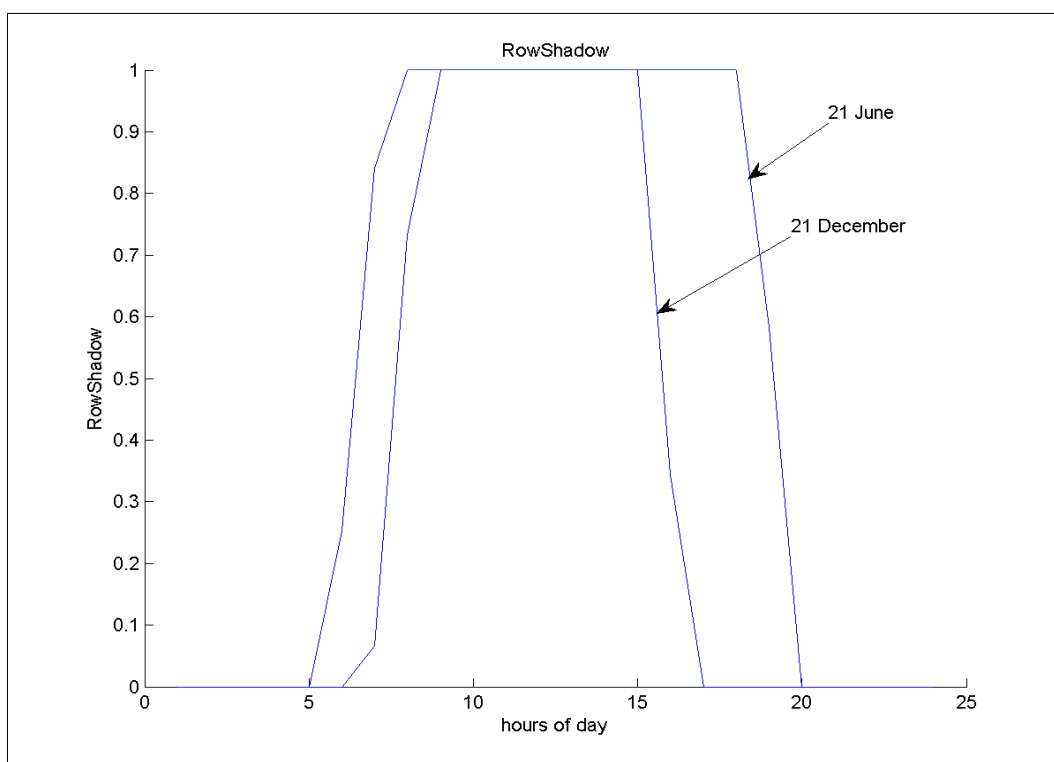
### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)



Σχήμα 3.6 Σκίαση σειρών κατά την διάρκεια του πρωινού

Η σκίαση των σειρών μειώνει την απόδοση των συλλεκτών μειώνοντας το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει στους συλλέκτες. Το εύρος του ανοίγματος του κατόπτρου το οποίο προσλαμβάνει την προσπίπτουσα ακτινοβολία (αυτό είναι το εύρος του ανοίγματος του κατόπτρου το οποίο δεν σκιάζεται) ορίζεται ως «αποτελεσματικό εύρος κατόπτρου». Ο παράγοντας σκίασης σειράς είναι ο λόγος του αποτελεσματικού εύρους κατόπτρου προς το πραγματικό εύρος του κατόπτρου. Αυτός ο λόγος μπορεί να εξαχθεί από την γεωμετρία της ηλιακής γωνίας ζενίθ, της γωνίας πρόσπτωσης και από την διάταξη των ηλιακών συλλεκτών μέσα στο πεδίο.

Ο συντελεστής RowShadow παίρνει τιμές από 0 έως 1. Μηδέν, όταν το άνοιγμα όλου του ηλιακού συλλέκτη σκιάζεται και ένα, όταν το άνοιγμα του ηλιακού συλλέκτη δεν σκιάζεται καθόλου. Στο επόμενο γράφημα φαίνεται ο συντελεστής αυτός για τις 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου.

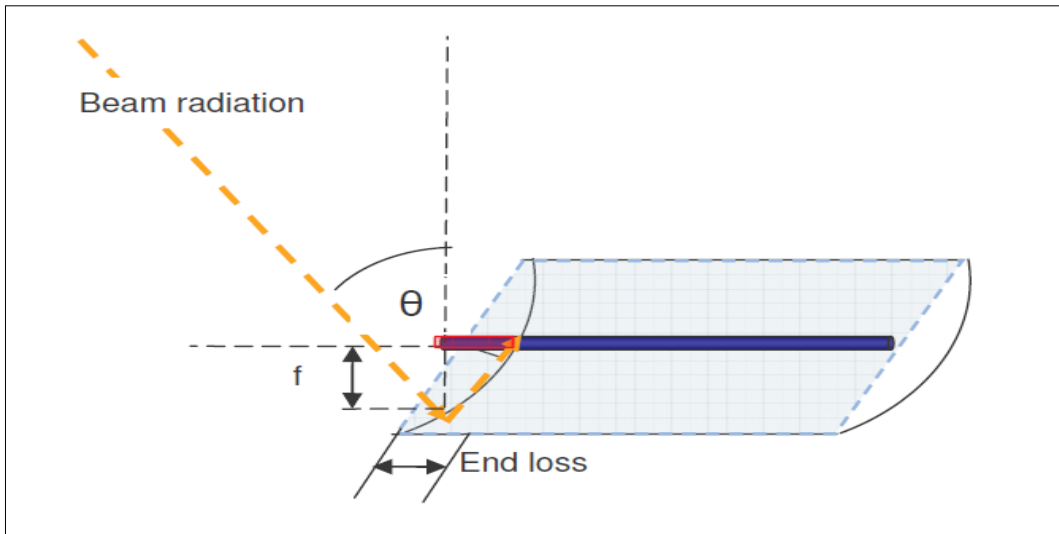


Γράφημα 3.5 Αναπαράσταση του παράγοντα σκίασης για τις 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου

Οι απώλειες άκρων συμβαίνουν στα άκρα του στοιχείου συλλογής θερμότητας όπου, για μία μη μηδενική γωνία πρόσπτωσης, ορισμένο μήκος του απορροφητικού σωλήνα δεν φωτίζεται

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)

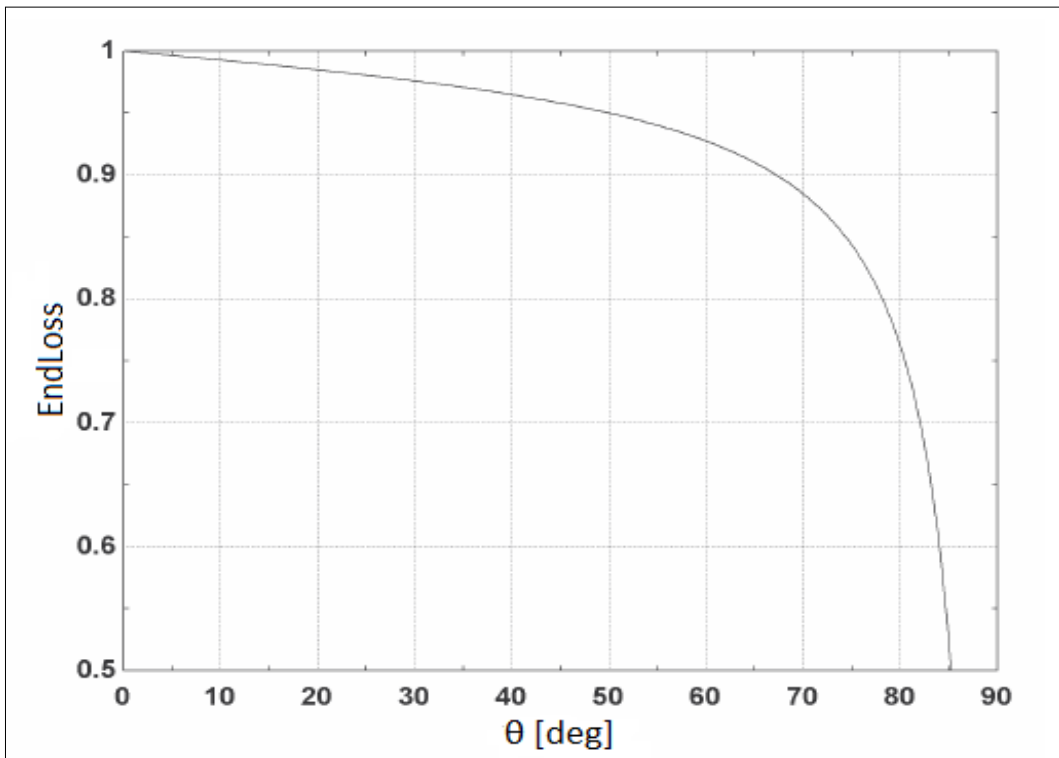
από την ηλιακή ακτινοβολία που αντανακλάται από τα κάτοπτρα. Το επόμενο σχήμα απεικονίζει αυτές τις απώλειες άκρων για ένα στοιχείο συλλογής θερμότητας για μία μη μηδενική γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 3.7 Απώλειες άκρων ηλιακού συλλέκτη [12]

Οι απώλειες άκρων είναι μία συνάρτηση του μήκους εστίασης του συλλέκτη, του μήκους του συλλέκτη και της γωνίας πρόσπτωσης.

Οι απώλειες άκρων που περιγράψαμε παραπάνω φαίνονται στο επόμενο γράφημα συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης ( $\theta$ ).



Γράφημα 3.6 Απώλειες άκρων συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

#### 3.2.5 Αποδοτικότητα πεδίου ( $n_{\text{Field}}$ ) και αποδοτικότητα στοιχείου συλλογής θερμότητας ( $n_{\text{HCE}}$ )

Η τελευταία κατηγορία απωλειών ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στις ιδιότητες της επιφάνειας και στις ατέλειες των κατόπτρων του ηλιακού συλλέκτη, του γυάλινου περιβλήματος και των υλικών των σωλήνων απορρόφησης. Η ακτινοβολία μπορεί να απορροφηθεί ή να διασκορπιστεί από ακαθαρσίες στα κάτοπτρα ή να μην ανακλαστεί σωστά εξ' αιτίας μικρών ατελειών των κατόπτρων ή λαθών κατά την παρακολούθηση του ήλιου. Η μεταδοτικότητα του γυάλινου περιβλήματος, η απορροφητικότητα του εκλεκτικού επιχρίσματος του σωλήνα απορρόφησης και άλλες επιφανειακές ιδιότητες μπορούν επίσης να επηρεάσουν την τελική απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

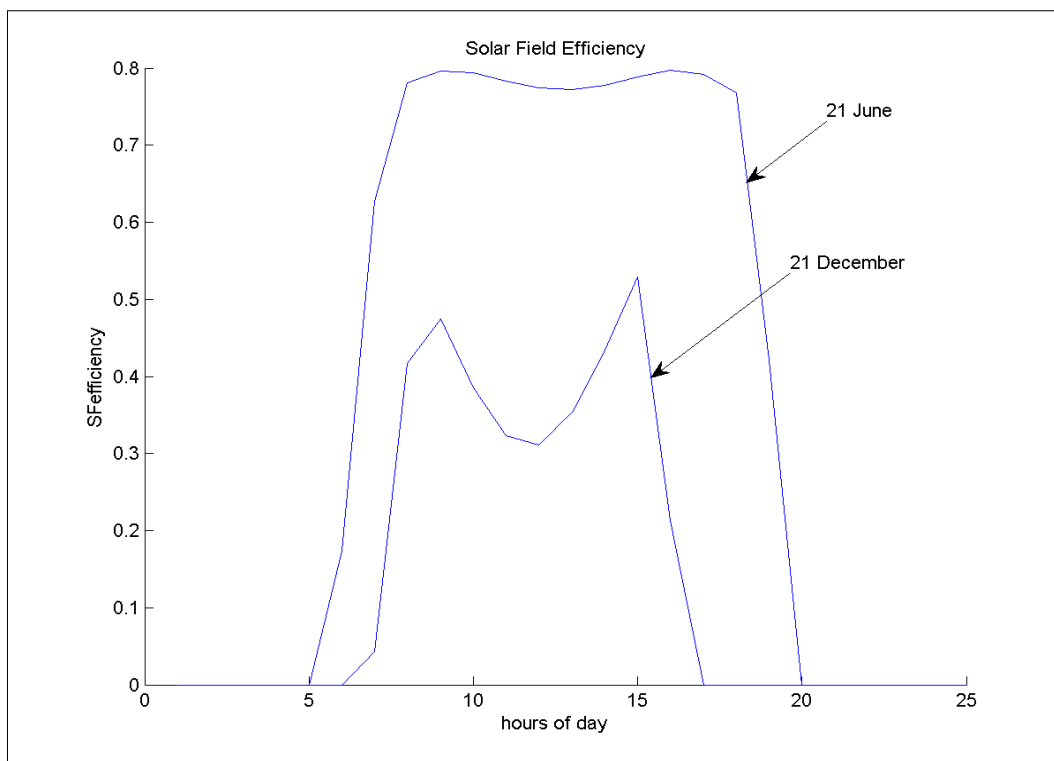
Κατά την λειτουργία του σταθμού, καθώς οι παλαιότεροι συλλέκτες, οι οποίοι δυσλειτουργούν, βαθμιαία αντικαθίστανται με νέας γενιάς στοιχεία συλλογής θερμότητας και κάτοπτρα. Έτσι η διαμόρφωση του πεδίου μπορεί να περιλαμβάνει δύο, τρεις ή και περισσότερους τύπους συστημάτων ηλιακών συλλεκτών και σωλήνων απορρόφησης. Οι ιδιότητες των επιφανειών και οι συντελεστές διόρθωσης μπορεί να διαφέρουν από ένα τύπο ή γενιά εξοπλισμού στην επόμενη. Η επακόλουθη αποδοτικότητα για το πεδίο ως σύνολο θεωρείται στο μοντέλο ότι είναι ο σταθμισμένος μέσος της απόδοσης κάθε τύπου εξαρτήματος που βρίσκεται στο πεδίο.

Το συνολικό αποτέλεσμα των επιφανειακών και διορθωτικών παραμέτρων για το σύστημα του συλλέκτη και των κατόπτρων, παράγοντας αποδοτικότητας πεδίου ( $n_{\text{field}}$ ), εξαρτάται από τα σφάλματα στροφής και παρακολούθησης του Ήλιου που σχετίζονται με τον τύπο του συλλέκτη, από την ακρίβεια της γεωμετρίας των κατόπτρων του συλλέκτη και από την ανακλαστικότητα και την καθαρότητα του κατόπτρου.

Το συνολικό αποτέλεσμα των επιφανειακών και διορθωτικών παραμέτρων για το μέσο μεταφοράς θερμότητας, παράγοντας αποδοτικότητας του HTF ( $n_{\text{HCE}}$ ), εξαρτάται από την μεταδοτικότητα του γυάλινου περιβλήματος, από την απορροφητικότητα του εκλεκτικού επιχρίσματος του HCE, από την σκίαση του HCE εξ' αιτίας της σκόνης στο περίβλημα και από την σκίαση των άκρων του HCE εξ' αιτίας των καλλυμάτων τους.

#### 3.2.6 Συνολική Απόδοση του Ηλιακού Πεδίου

Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η συνολική απόδοση του Ηλιακού πεδίου για τις 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου.



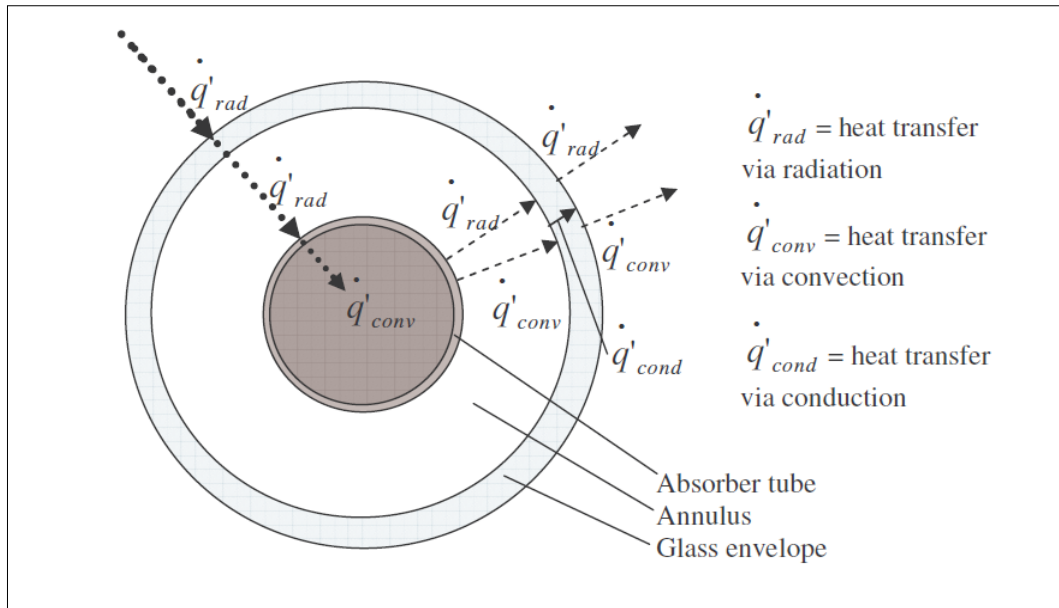
Γράφημα 3.7 Αναπαράσταση της συνολικής απόδοσης του Ηλιακού πεδίου

### 3.3 Απώλειες θερμότητας δέκτη

Καθώς το μέσο μεταφοράς θερμότητας ρέει μέσα στους σωλήνες του δέκτη, απορροφά ενέργεια και η θερμοκρασία του ανεβαίνει. Αυτή η αύξηση θερμοκρασίας δημιουργεί μία θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του ρευστού και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα. Απώλειες θερμότητας από τον σωλήνα δέκτη προς το γυάλινο περίβλημα, όπως και από το γυάλινο περίβλημα προς το περιβάλλον, συμβαίνουν εξ' αιτίας αυτής της θερμοκρασιακής διαφοράς. Αυτή η απώλεια θερμότητας μπορεί να συσχετιστεί με την θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας, όπως περιγράφεται παρακάτω.

#### 3.3.1 Αναλυτική προέλευση απωλειών θερμότητας

Το σχήμα 3.8 δείχνει τους σχετικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας που είναι υπεύθυνοι για τις απώλειες μεταξύ των επιφανειών του συλλέκτη και του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.8 Απώλειες μεταξύ των επιφανειών του συλλέκτη και του περιβάλλοντος [12]

Οι ροές θερμότητας που εισέρχονται σε κάθε επιφάνεια του ΗCE πρέπει να ισορροπούν τις ροές θερμότητας που εξέρχονται από την επιφάνεια. Με δεδομένη την μέση θερμοκρασία του ΗΤΕ, την ακτινοβολία, τις συνθήκες περιβάλλοντος, τις διαστάσεις του ΗCE και τις ιδιότητες της επιφάνειας του ΗCE, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ενεργειακό ισοζύγιο σε κάθε επιφάνεια του ΗCE για να καθοριστούν οι θερμοκρασίες των επιφανειών, η καθαρή ροή θερμότητας που απορροφάται από το ρευστό και η καθαρή ροή θερμότητας που χάνεται στο περιβάλλον.

### 3.3.2 Μοντέλο γραμμικής συσχέτισης θερμικών απωλειών

Η ροή θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του ΗCE προς το περιβάλλον επηρεάζεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, από την παροχή μάζας του ρευστού (η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή βελτιώνεται όταν η παροχή μάζας αυξάνεται) και από την θερμοκρασία περιβάλλοντος (αφού χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνει την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του μέσου μεταφοράς θερμότητας και του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες θερμότητας). Τέλος, και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει τις απώλειες θερμότητας αυξάνοντας τον συντελεστή συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια του ΗCE προς το περιβάλλον.

Η επιρροή της ταχύτητας του ανέμου είναι αμελητέα στις απώλειες θερμότητας εκτός από την περίπτωση που απουσιάζει το γυάλινο περίβλημα. Επίσης, επειδή η επιρροή της παροχής μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επηρεάζουν ελάχιστα τις απώλειες του συλλέκτη σε σύγκριση με την θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας και την ακτινοβολία, δεν λαμβάνονται υπόψη. Ως αποτέλεσμα, οι απώλειες του δέκτη (HeatLoss) μοντελοποιούνται ως συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του ρευστού και της ακτινοβολίας.

Το μοντέλο απωλειών θερμότητας του δέκτη, υπολογίζει τις απώλειες θερμότητας σε μία σταθερή, μέση θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θερμοκρασία του ρευστού διαφέρει από την είσοδο ως την έξοδο του

ηλιακού πεδίου μέχρι και 100°C. Για να συνυπολογιστεί αυτή η διαφορά θερμοκρασίας οι απώλειες του δέκτη ολοκληρώνονται από την είσοδο του πεδίου έως την έξοδο και διαιρούνται με την διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του πεδίου.

$$HL_{Field} = \frac{\int_{T_1}^{T_0} HeatLoss}{T_0 - T_1} \quad (3.3)$$

όπου:

$T_0$  = η θερμοκρασία του ελαίου στην έξοδο του Ηλιακού Πεδίου σε [°C].

$T_1$  = η θερμοκρασία του ελαίου στην είσοδο του Ηλιακού Πεδίου σε [°C].

Η διαίρεση με το πλάτος ανοίγματος του κατόπτρου γίνεται για να εκφράσουμε τις απώλειες του δέκτη ως προς την επιφάνεια ανοίγματος του κατόπτρου [W/m<sup>2</sup>].

$$RecHL = \sum_{i=1}^{NumHCETypes} \frac{HL_{Field,i}}{Width} \quad (3.4)$$

### 3.3.3 Απώλειες θερμότητας από τις σωληνώσεις μέσα στο ηλιακό πεδίο

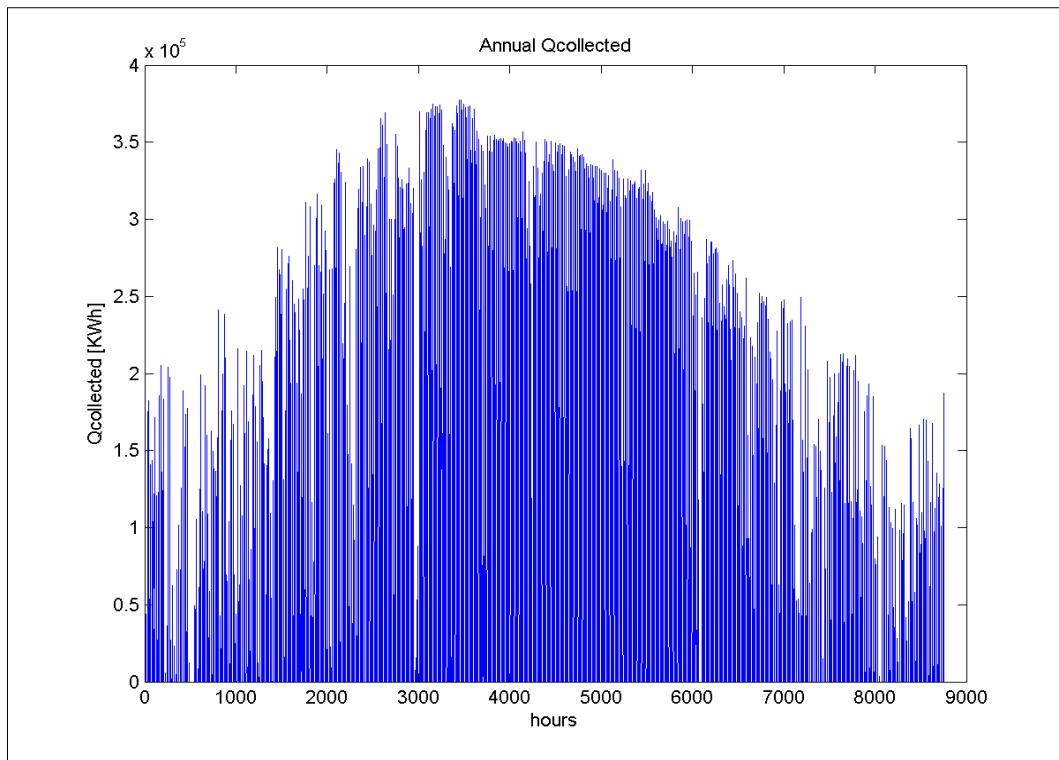
Οι θερμικές απώλειες από τις σωληνώσεις (SfPipe) που οδηγούν από και προς το ηλιακό πεδίο είναι γενικά μικρές, της τάξης των 10 W/m<sup>2</sup> ή και μικρότερης κατά την διάρκεια της λειτουργίας του ηλιακού πεδίου.

### 3.4 Ενεργειακό κέρδος του HTF και θερμοκρασιακή αύξηση

Η καθαρή ενέργεια που συλλέγεται από το μέσο μεταφοράς θερμότητας μέσα στο ηλιακό πεδίο, ανά μονάδα επιφάνεια ανοίγματος [W/m<sup>2</sup>], είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που απορροφάται από το ρευστό μέσα στους σωλήνες απορρόφησης ( $Q_{absorbed}$ ) και του αθροίσματος των απωλειών θερμότητας από τους δέκτες (RecHL) και τις απώλειες θερμότητας από τις σωληνώσεις που οδηγούν από και προς το ηλιακό πεδίο (SfPipe). Το ενεργειακό κέρδος του μέσου μεταφοράς θερμότητας μέσα στο πεδίο πολλαπλασιάζεται με την συνολική επιφάνεια ανοίγματος του ηλιακού πεδίου (TotalApertureArea) και έτσι προκύπτει η τελικώς συλλεγόμενη θερμική ενέργεια του μέσου μεταφοράς θερμότητας από το Ηλιακό Πεδίο.

$$Q_{collected} = (Q_{absorbed} - (RecHL + SfPipe)) * \frac{TotalApertureArea}{1000} \quad [KWth] \quad (3.5)$$

Ακολουθεί γράφημα το οποίο αναπαριστά την τελικώς συλλεγόμενη θερμική ενέργεια ( $Q_{collected}$ ) του λαδιού για τον ηλιοθερμικό σταθμό (Σταθμός 50 MW, με 169 loops) που προσομοιώνεται στο Κεφάλαιο 5.



Γράφημα 3.8 Αναπαράσταση της τελικά συλλεγόμενης ενέργειας από το μέσο μεταφοράς θερμότητας

### 3.5 Υπολογισμός διάφορων μεγεθών

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν διάφορα μεγέθη, άμεσα συνδεδεμένα με το Ηλιακό Πεδίο, που θα φανούν χρήσιμα στη συνέχεια. Τα μεγέθη αυτά αναφέρονται σε σταθμό καθαρής παραγωγής 50 MW όπου το Ηλιακό πεδίο αποτελείται από 169 βρόχους. Κάθε βρόχος περιλαμβάνει 4 καθρέφτες.

Λαμβάνοντας υπόψη την συνολική απόδοση του κύκλου ισχύος, περίπου 37 – 38%, καθώς επίσης και την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας του κύκλου ισχύος προκύπτει η ονομαστική θερμική ισχύς του σταθμού:

$$Q_{sfNom} = 150800 \quad [\text{KWth}]$$

Η Ονομαστική Θερμική Ισχύς του σταθμού είναι ίση με την διαφορά ενθαλπίας του ελαίου (μεταξύ εισόδου και εξόδου του εναλλάκτη θερμότητας ελαίου/νερού) επί την ονομαστική παροχή μάζας του ελαίου. Έτσι, με απλή επίλυση τύπου προκύπτει η ονομαστική ροή μάζας ελαίου:

$$m_{stNom} = 620 \quad [\text{Kg/sec}]$$

Κατά την διάρκεια της ημέρας, η ελάχιστη θερμική ισχύς που μπορεί να παράγει ο σταθμός είναι ίση με το 20% της ονομαστικής θερμικής ισχύος του.

$$Q_{sfmin} = 0,2 * Q_{sfNom} \quad [\text{KWth}] \quad (3.7)$$

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Λειτουργία Ηλιακού Πεδίου (Solar Field)

δηλαδή:

$$Q_{sfmin} = 30160 \quad [\text{KWth}]$$

Γενικά, για να λειτουργήσει ο σταθμός κατά την διάρκεια μίας ημέρας αφ' ενός πρέπει να παράγει την πρώτη ώρα λειτουργίας του θερμική ισχύς τουλάχιστον ίση με την απαιτούμενη θερμική ισχύς έναρξης του σταθμού (HRFOS) και αφ' ετέρου να παράγει για δύο τουλάχιστον συνεχόμενες ώρες θερμική ισχύς τουλάχιστον ίση με  $Q_{sfmin}$ .



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

---

### Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλυθούν το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, ο κύκλος ισχύος και το σύστημα ψύξης ενός Ηλιοθερμικού σταθμού. Επίσης, θα υπολογιστούν οι παρασιτικές καταναλώσεις που υφίστανται σε έναν τέτοιο σταθμό.

#### 4.1 Τεχνολογίες Αποθήκευσης θερμότητας για Ηλιοθερμικούς σταθμούς Ενέργειας

Η αποθήκευση θερμότητας πάντα συσχετιζόταν με τις ηλιακές εγκαταστάσεις, επειδή η διαθεσιμότητα (χρονική) της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περιορισμένη και δεν συμπίπτει με τις περιόδους αιχμής ζήτησης ενέργειας που είναι κυρίως τις βραδινές ώρες. Έτσι λοιπόν, απαιτείται κάποιο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και για τους Ηλιοθερμικούς σταθμούς ώστε να υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια κατά τη διάρκεια των βραδινών ωρών.

Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου η ανάπτυξη Ηλιοθερμικών σταθμών είναι ευνοϊκή στα νότια και συγκεκριμένα στην Κρήτη (νησιωτικό απομονωμένο σύστημα), η αποθήκευση ενέργειας αποκτά ακόμα μεγαλύτερη αναγκαιότητα. Αυτό συμβαίνει διότι, υπάρχει ενδεχόμενο να επιβληθεί περιορισμός στην παραγωγή ενέργειας του σταθμού κατά τις ώρες ηλιοφάνειας λόγω αδυναμίας απορρόφησης της ενέργειας από το δίκτυο (προσφορά ενέργειας μεγαλύτερη από τη ζήτηση). Έτσι ο σταθμός θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει την ενέργεια αυτή και να την προσφέρει στο δίκτυο όταν υπάρχει ανάγκη.

Στη παράγραφο λοιπόν αυτή, θα παρουσιαστούν διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε Ηλιοθερμικούς σταθμούς Ενέργειας. Οι τεχνολογίες αυτές αφορούν τόσο άμεσα όσο και έμμεσα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Άμεσο σύστημα αποθήκευσης είναι εκείνο στο οποίο χρησιμοποιείται το ίδιο μέσο τόσο για τη μεταφορά θερμότητας όσο και για την αποθήκευσή της. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται εναλλάκτης θερμότητας στο σύστημα αποθήκης.

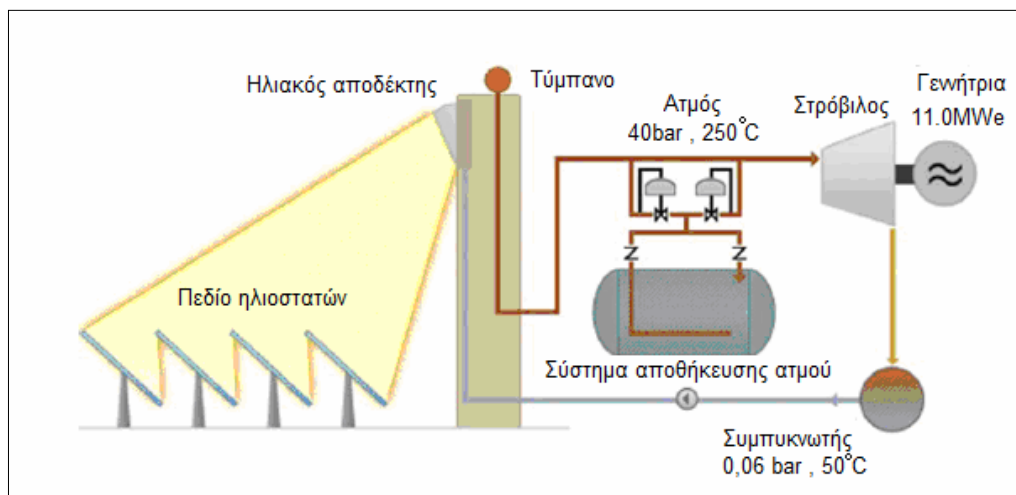
Έμμεσο σύστημα αποθήκευσης είναι εκείνο στο οποίο χρησιμοποιείται διαφορετικό μέσο για τη μεταφορά θερμότητας και διαφορετικό για την αποθήκευσή της. Σε αυτή την περίπτωση,

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

απαιτείται κάποιος εναλλάκτης θερμότητας ούτως ώστε να γίνει η μεταφορά θερμότητας από το μέσο μεταφοράς στο μέσο αποθήκευσης.

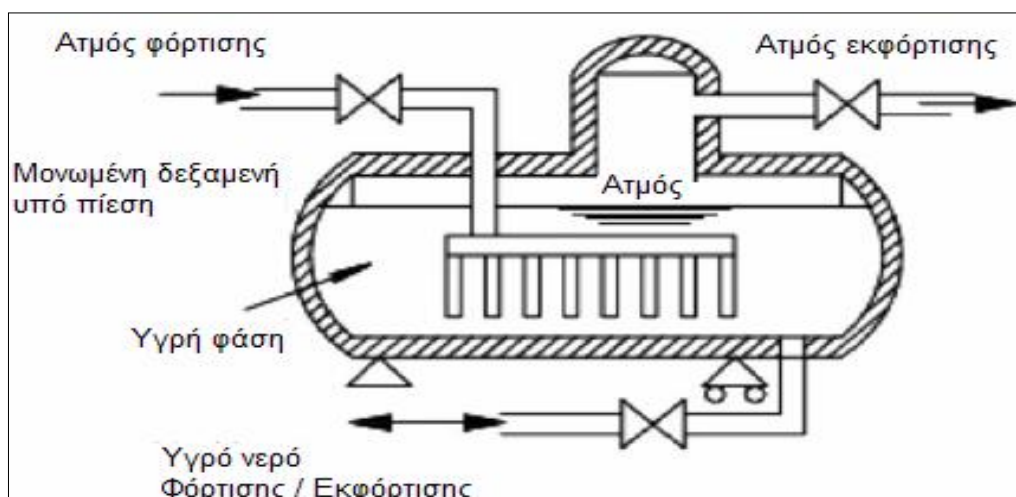
### 4.1.1 Άμεση Αποθήκευση Ατμού

Μία επιλογή για άμεση αποθήκευση θερμότητας είναι η δυνατότητα απευθείας παραγωγής ατμού στο Ηλιακό πεδίο (Σχήμα 4.1) και η χρησιμοποίησή του ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης. Αυτού του είδους τα συστήματα χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για να ισορροπήσουν την ζήτηση με την παραγωγή ατμού.



Σχήμα 4.1 Σύστημα απευθείας παραγωγής ατμού [15]

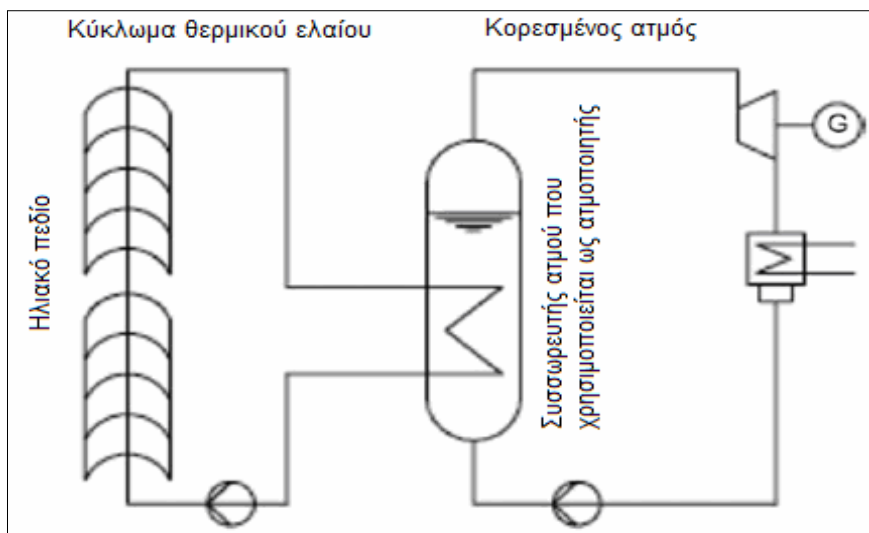
Συσσωρευτές ατμού (Σχήμα 4.2) μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις για προσωρινή αποθήκευση στους ηλιοθερμικούς σταθμούς παρέχοντας κορεσμένο ατμό σε πιέσεις της τάξεως των 100 bar. Αυτή η τεχνολογία εκμεταλλεύεται την υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης του νερού για αισθητή θερμότητα.



Σχήμα 4.2 Συσσωρευτής ατμού [15]

Ένας συσσωρευτής ατμού μπορεί να φορτιστεί και έμμεσα. Σε αυτή τη περίπτωση ένας εναλλάκτης θερμότητας τοποθετείται μέσα στην υγρή φάση (Σχήμα 4.3).

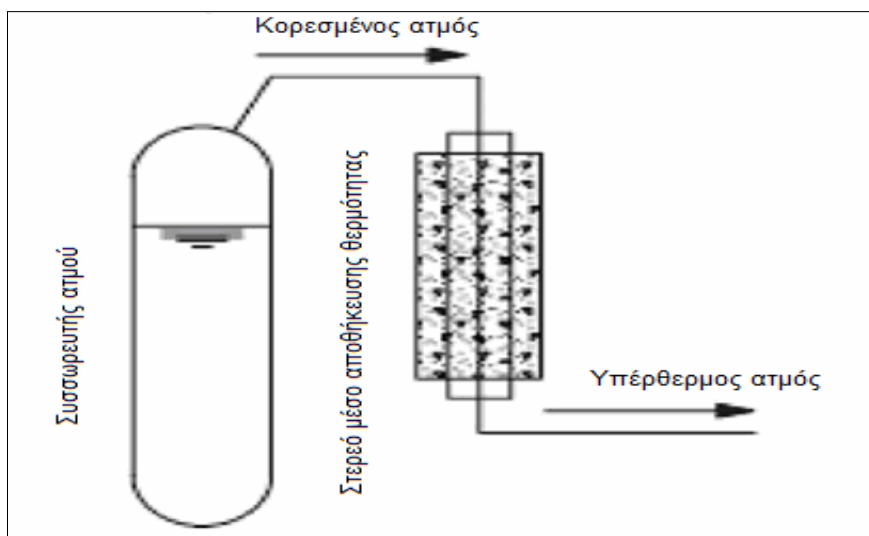
## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



Σχήμα 4.3 Έμμεση φόρτιση συσσωρευτή ατμού [15]

Το μέσο που διαρρέει τον εναλλάκτη δεν μπορεί να είναι νερό. Σε αυτή τη περίπτωση είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί κάποιο μέσο μεταφοράς θερμότητας που λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση.

Οι συσσωρευτές ατμού παρέχουν κορεσμένο ατμό. Αν χρειάζεται υπέρθερμος ατμός ένα δεύτερο σύστημα αποθήκευσης πρέπει να συνδεθεί στην έξοδο του συσσωρευτή ατμού (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Δεύτερο σύστημα αποθήκευσης για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού [15]

Η πιο ενδεδειγμένη επιλογή για δεύτερο σύστημα αποθήκευσης είναι με τη μορφή αισθητής θερμότητας όπως με την χρήση τσιμέντου ή υγροποιημένων αλάτων. Σε έναν ηλιοθερμικό σταθμό παραβολικών κατόπτρων μόνο το 10 – 15% της θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την υπερθέρμανση του ατμού.

### 4.1.2 Αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών που αλλάζουν φάση (Phase Change Materials, PCM) να απορροφούν ή να απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας (λανθάνουσα θερμότητα) κατά την ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης στην οποία βρίσκονται. Έτσι, η εξάτμιση, η τήξη, και η αλλαγή στην κρυσταλλική κατάσταση στερεών που, για παράδειγμα, περιέχουν νερό στους κρυστάλλους τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

Κατά αυτόν τον τρόπο ένα υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αποθήκη θερμότητας όταν το περίσσειμα της θερμικής ενέργειας διοχετευθεί σε αυτό έτσι ώστε να τηχθεί και το τήγμα να διατηρηθεί χωρίς απώλειες. Όταν απαιτηθεί αυτή η θερμότητα, θα ανακτηθεί από το τήγμα σε ποσότητα ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, οπότε το τήγμα θα πήξει. Αυτό είναι δυνατό να επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Για παράδειγμα, η αποθηκευμένη θερμότητα ενός υλικού που μεταβαίνει από μία θερμοκρασία  $T_1$  σε μια υψηλότερη θερμοκρασία  $T_2$ , αν συμβαίνει και αλλαγή φάσης αυτού σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία  $T^*$  είναι το άθροισμα της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της στερεάς φάσης του υλικού από τη θερμοκρασία  $T_1$  στη θερμοκρασία  $T^*$  και της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία τήξης  $T^*$  και της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της υγρής φάσης από θερμοκρασία  $T^*$  σε  $T_2$ :

$$Q_s = m * [(T^* - T_1) * C_s + f_s + (T_2 - T^*) * C_l] \quad (4.1)$$

όπου:

$m$  : η μάζα του υλικού.

$C_s$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα της στερεάς φάσης του υλικού.

$C_l$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης του υλικού.

$f_s$  : η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά που αλλάζουν φάση είναι η υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα και το μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος, αφού η διεργασία αλλαγής φάσης γίνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Επίσης, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στην θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται.

Γενικά είναι δυνατές οι ακόλουθες μετατροπές στην κατάσταση ενός υλικού, κατά φθίνουσα σειρά εμπλεκόμενου ποσού λανθάνουσας θερμότητας:

- από στερεό σε αέριο
- από υγρό σε αέριο
- από στερεό σε υγρό

Οι πρώτες δύο μορφές αλλαγής φάσης δε χρησιμοποιούνται καθώς το βασικό τους πρόβλημα είναι ο σχηματισμός αερίου και κατά συνέπεια η σημαντική μεταβολή όγκου η οποία κάνει

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

περισσότερο πολύπλοκη τη λειτουργία του συστήματος (δοχεία υπό πίεση κλπ). Για αυτό η πιο συνηθισμένη διεργασία είναι η τήξη και η πήξη του μέσου αποθήκευσης.

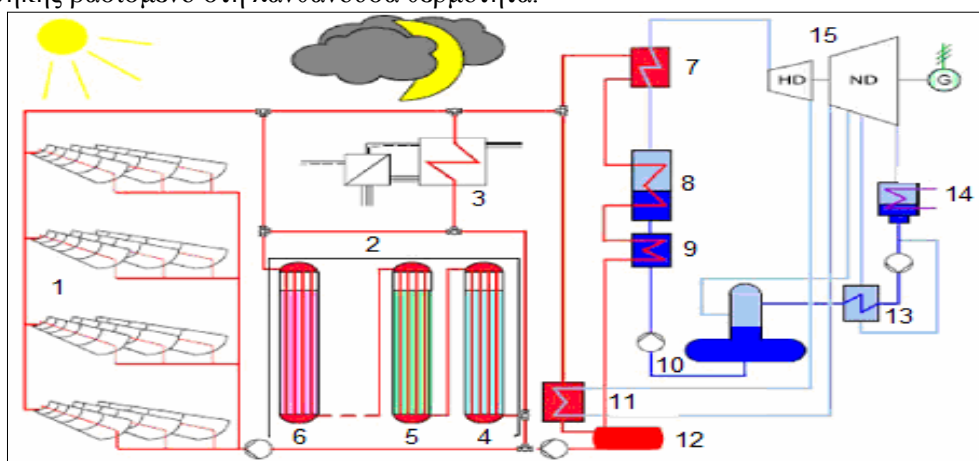
Τα PCMs διατίθενται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και θερμοτήτων αλλαγής φάσης. Σε πραγματικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας η αλλαγή της φάσης του υλικού δε γίνεται σε απόλυτα σταθερή θερμοκρασία αφού τα συστήματα αυτά δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται στο υλικό ακόμη ένα ποσό ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό PCM, σαν αποθήκη ενέργειας, θα πρέπει, σε μια πρώτη προσέγγιση, να ικανοποιεί αυτό και ο χώρος στον οποίο θα γίνει η αποθήκευση, τα παρακάτω κριτήρια:

1. υψηλή ενθαλπία μετάβασης ανά μονάδα μάζας.
2. ικανότητα για πλήρη αντιστροφή της διαδικασίας.
3. ικανή θερμοκρασία μετάβασης από τη μια φάση στην άλλη.
4. χημική ισορροπία και σταθερότητα με τον αποθηκευτικό χώρο.
5. ελάχιστη αλλαγή όγκου με την αλλαγή φάσης.
6. μη τοξικότητα.
7. χαμηλό κόστος.

Αυτό το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σχεδιάστηκε και για ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας οι οποίοι χρησιμοποιούν την τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων στα ηλιακά τους πεδία. Με την κατάλληλη επιλογή υλικού αλλαγής φάσης, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση της τεχνολογίας και σε σταθμούς ηλιακού πύργου.

Παρακάτω, ακολουθεί σχήμα με τη διάταξη ενός Ηλιοθερμικού σταθμού, με σύστημα αποθήκης βασισμένο στη λανθάνουσα θερμότητα.



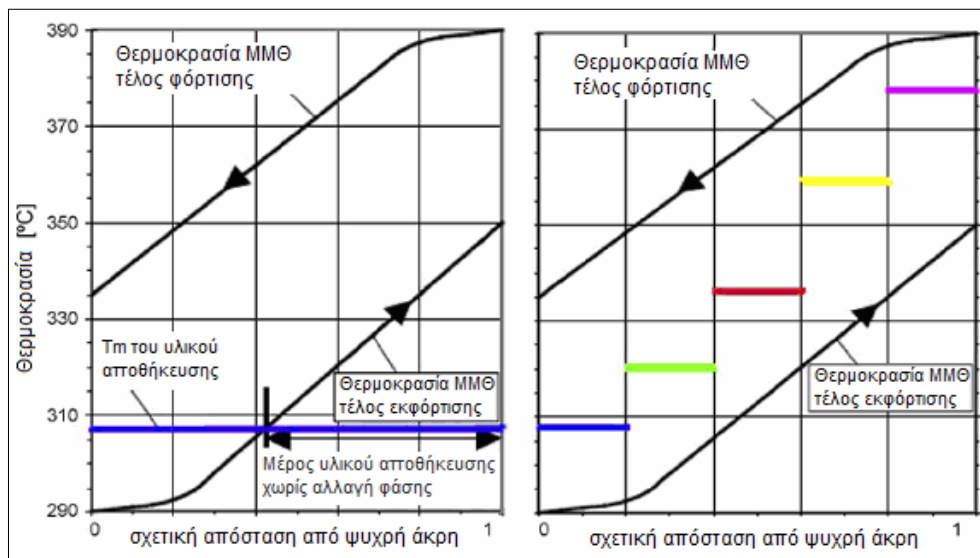
Σχήμα 4.5 Διάταξη εγκατάστασης Ηλιοθερμικού σταθμού με σύστημα αποθήκης, βασισμένο στη λανθάνουσα θερμότητα [15]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

όπου:

- 1 : Ηλιακό πεδίο.
- 2 : Αποθήκη θερμότητας.
- 3 : Θερμαντής HTF.
- 4 : Μονάδα 1<sup>η</sup>.
- 5 : Μονάδα 2<sup>η</sup>.
- 6 : Μονάδα 3<sup>η</sup>.
- 7 : Ηλιακός Υπερθερμαντής.
- 8 : Ατμοπαραγωγός.
- 9 : Ηλιακός Προθερμαντής.
- 10 : Απαρεωτής.
- 11 : Ηλιακός Αναθερμαντής.
- 12 : Δεξαμενή Διαστολής.
- 13 : Προθερμαντής Χαμηλής Πίεσης.
- 14 : Συμπυκνωτής.
- 15 : Ατμοστρόβιλος.

Τέλος, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός υλικού αλλαγής φάσης κατά την διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης.



Σχήμα 4.6 Συμπεριφορά υλικού αλλαγής φάσης κατά την διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης [15]

### 4.1.3 Αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας σε στερεά μέσα

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας πραγματοποιείται με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας ενός υλικού, χωρίς να αλλάζει η φάση στην οποία βρίσκεται.

Έτσι, για ένα υλικό που μεταβαίνει από μια θερμοκρασία  $T_1$  σε μια θερμοκρασία  $T_2$ , η θερμική ενέργεια που συναλλάσσεται (είτε προσδίδεται είτε αφαιρείται από το υλικό) είναι:

$$\Delta Q = m * \int_{T_1}^{T_2} C_p * dT = V * \int_{T_1}^{T_2} (C_p * \rho) * dT \quad (4.2)$$

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

όπου:

$m$  : η μάζα του υλικού σε [Kg].

$C_p$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα, υπό σταθερή πίεση, του υλικού σε [J/KgK].

$V$  : ο όγκος του υλικού σε [m<sup>3</sup>].

$dT$  : η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς Kelvin.

Όπως σημειώθηκε και ανωτέρω, το υλικό αυτό δε θα αλλάζει φάση σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της διαδικασίας. Η ποσότητα  $\Delta Q$  αποτελεί, τελικά, την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα.

Αν και οι τιμές της πυκνότητας  $\rho$  και της ειδικής θερμοχωρητικότητας  $C_p$ , οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά των υλικών αυτών, μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, οι μέσες τιμές αυτών ικανοποιούν τη σχέση  $\Delta Q = C_p \cdot \Delta T$ , ανά μονάδα μάζας. Ένας ακόμη βασικός παράγοντας που χαρακτηρίζει αυτά τα υλικά είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να αποθηκεύσουν ή να εκλύσουν θερμότητα.

Η πυκνότητα ενός υλικού,  $\rho$ , είναι το μέγεθος που δείχνει πόση μάζα καταλαμβάνει το υλικό ανά μονάδα όγκου [Kg/m<sup>3</sup>] και η ειδική θερμοχωρητικότητα αυτού,  $C_p$  [J/KgK], είναι το μέγεθος που δείχνει πόση ενέργεια απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός Kg του υλικού κατά έναν βαθμό Kelvin, υπό σταθερή πίεση.

Από τους παραπάνω ορισμούς διαφαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας μπορεί να αποθηκεύσει. Για αυτό το λόγο, το μέγεθος αυτό αποτελεί βασικό κριτήριο για την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει αισθητή θερμότητα. Παρακάτω, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις ιδιότητες διαφόρων χρησιμοποιούμενων υλικών ως μέσα θερμικής αποθήκευσης, στους 20 °C.

Υλικό	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/KgK]	$C_v$ [MJ/m <sup>3</sup> k]
Πηλός	1458	879	1,28
Τούβλο	1800	837	1,51
Αμμόπετρα	2200	712	1,57
Ξύλο	700	2390	1,67
Σκυρόδεμα	2000	880	1,76
Αλουμίνιο	2710	837	2,27
Σίδηρο	7900	452	3,57
Ατσάλι	7840	465	3,68
Πετρώματα	2050	1840	3,77
Μαγνητίτης	5177	752	3,89
Νερό	988	4182	4,17

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες Υλικών Θερμικής Αποθήκευσης

Για να είναι κατάλληλο ένα υλικό για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής (αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας) πρέπει:



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

- να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα.
- να έχει υψηλή θερμική διάχυση, δηλαδή υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης.
- να έχει υψηλό ειδικό βάρος.
- να είναι δυνατή η χρησιμοποίησή του και σαν θερμικό και σαν ψυκτικό μέσο.
- να έχει θερμική και γεωμετρική σταθερότητα.
- να μην είναι εύφλεκτο, διαβρωτικό ή τοξικό.
- να έχει σχετικά χαμηλό κόστος.
- να έχει ικανοποιητική αντοχή.
- να λειτουργεί σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Η αποθήκευση της θερμότητας βασίζεται σε μια απλή διαδικασία. Η θερμότητα που παράγεται από ένα σύστημα διοχετεύεται σε κάποιο υλικό, το οποίο βρίσκεται σε μια καλά μονωμένη δεξαμενή. Η θερμοκρασία του υλικού ανυψώνεται και έτσι το υλικό «αποθηκεύει» θερμότητα, την οποία και αποδίδει όταν εντός ενός ευλόγου χρονικού διαστήματος η θερμότητα αυτή ζητηθεί.

### 4.1.4 Συνδυασμός λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας σε στερεά μέσα αποθήκευσης

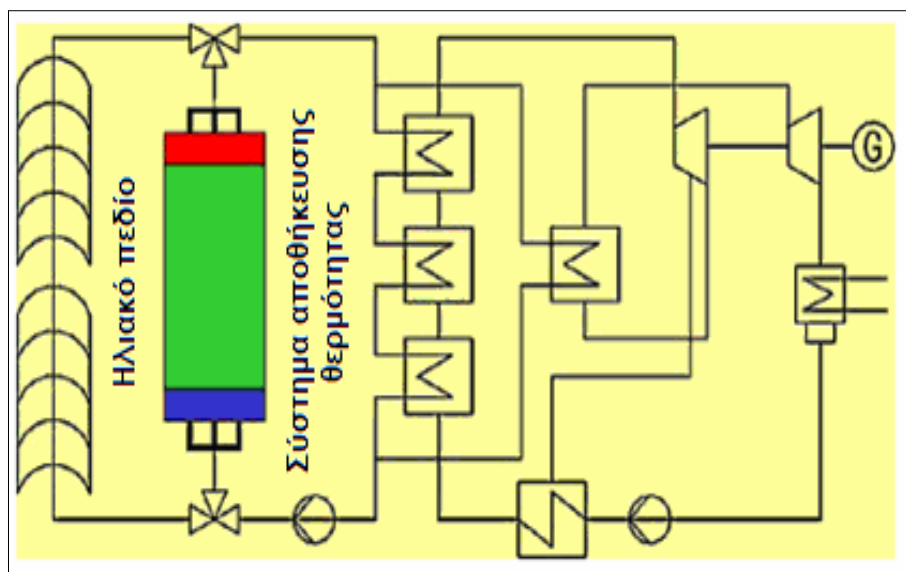
Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποθήκευσης είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού συστημάτων αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, όπως αυτό που προτάθηκε από την DLR – ZSW για Ηλιοθερμικούς σταθμούς (Σχήμα 4.7). Αυτό το πρωτότυπο σύστημα ονομάστηκε υβριδικό σύστημα αποθήκευσης.

Αυτό το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης, το οποίο σχεδιάστηκε από την DLR στη Στουτγάρδη το 1993, ήταν χωρητικότητας 200 MWth, και σχεδιάστηκε για μία διαδικασία φόρτισης 3 ωρών και εκφόρτισης μιας ώρας. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν συνθετικό έλαιο. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τρία υλικά αποθήκευσης: νιτρικό νάτριο ( $\text{NaNO}_3$  με σημείο τήξης  $310^\circ\text{C}$ ), μπετόν και ένα μίγμα  $\text{NaOH/NaCl}$  (με σημείο τήξης τους  $370^\circ\text{C}$ ).

Η πιο καινοτόμος πλευρά αυτής της ιδέας ήταν η πιθανότητα να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος αποθήκευσης, λόγω του συνδυασμού της καλής θερμικής αγωγιμότητας κι της χαμηλής τιμής του μπετόν σε συνδυασμό με τα καλά χαρακτηριστικά αποθήκευσης των υλικών αλλαγής φάσης.



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



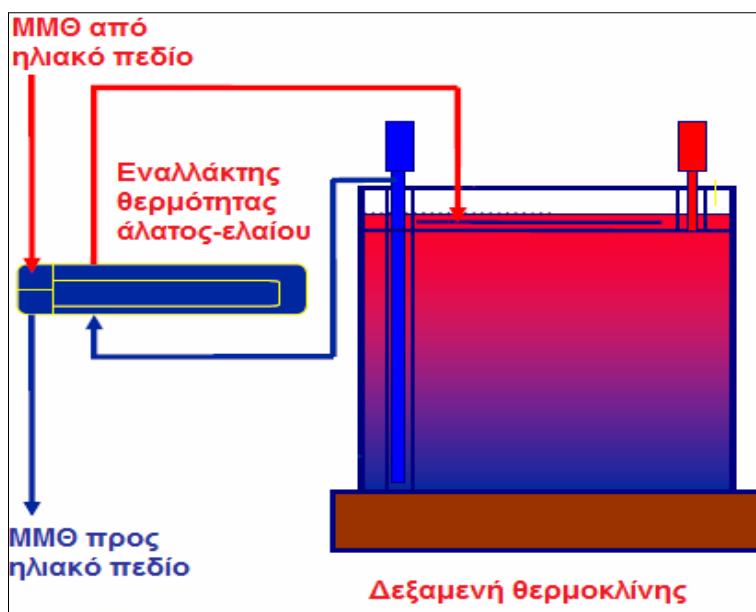
Σχήμα 4.7 Υβριδικό σύστημα αποθήκευσης [15]

### 4.1.5 Σύστημα αποθήκευσης με θερμοκλίνη

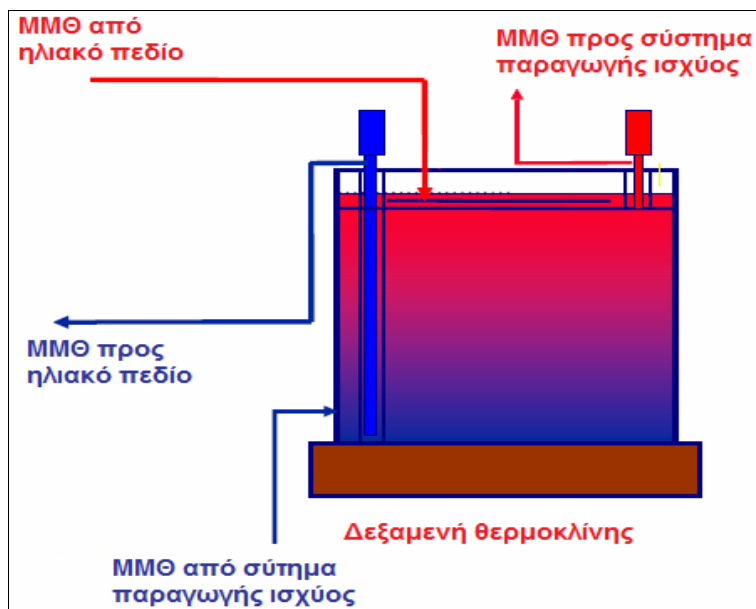
Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε δεξαμενή θερμοκλίνης είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιεί μία δεξαμενή για την αποθήκευση ενέργειας και η θερμική βαθμίδα χωρίζει το ζεστό από το κρύο ρευστό. Συνήθως κάποιο πληρωτικό υλικό χαμηλού κόστους χρησιμοποιείται ως το βασικό μέσο αποθήκευσης ενέργειας, βοηθώντας έτσι στη μείωση κόστους. Το πληρωτικό υλικό όπως και οι δυνάμεις άνωσης συντελούν ώστε να διατηρηθεί η θερμική βαθμίδα. Όταν το σύστημα φορτίζεται, κρύο ρευστό αντλείται από τον πυθμένα της δεξαμενής και θερμαίνεται είτε σε κάποιον εναλλάκτη θερμότητας, έμμεση αποθήκευση, είτε απευθείας στο ηλιακό πεδίο, άμεση αποθήκευση, και επιστρέφει στην κορυφή της δεξαμενής. Κατά την εκφόρτιση της δεξαμενής ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. Θερμό ρευστό αντλείται από την κορυφή της δεξαμενής, ψύχεται προσδίδοντας θερμότητα μέσω κάποιου εναλλάκτη και επιστρέφει στον πυθμένα της δεξαμενής.

Παρακάτω ακολουθούν τα σχήματα που αναπαριστούν την έμμεση και άμεση αποθήκευση θερμότητας μέσω μιας δεξαμενής θερμοκλίνης [16], [17].

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



Σχήμα 4.8 Έμμεσο σύστημα αποθήκευσης θερμοκλίνης



Σχήμα 4.9 Άμεσο σύστημα αποθήκευσης θερμοκλίνης

Το ιδανικό πληρωτικό υλικό θα πρέπει να είναι φθινό και ευρέως διαθέσιμο, να έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα, μικρό λόγο κενού (ώστε να μειωθεί η ποσότητα του ρευστού που απαιτείται), να είναι συμβατό με νιτρικά άλατα και να μην είναι επικίνδυνο. Μεγάλος αριθμός υλικών εξετάστηκε προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό υλικό. Μεταξύ αυτών είναι ο χαλαζίτης, ο τακονίτης, το μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος και η άμμος πυριτίου. Πειράματα έδειξαν ότι ο χαλαζίτης και η άμμος πυριτίου αντέχουν σε περιβάλλον υγροποιημένου άλατος χωρίς σημαντική αλλοίωση, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει την απόδοση και την λειτουργικότητα του συστήματος αποθήκευσης.

Ο πειραματικός σταθμός Solar One, τεχνολογίας ηλιακού πύργου, χρησιμοποιούσε μία θερμοκλίνη ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας είχε χρησιμοποιηθεί το συνθετικό έλαιο Caloria και ως πληρωτικό υλικό άμμος και πέτρα. Οι



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

- 10 : Απαρεωτής.
- 11 : Προθερμαντής χαμηλής πίεσης.
- 12 : Συμπυκνωτής.
- 13 : Ατμοστρόβιλος.

Ο τρόπος φόρτισης της αποθήκης είναι απλός. Κάποιο μέρος του μέσου μεταφοράς θερμότητας που εξέρχεται από το Ηλιακό πεδίο, με θερμοκρασία  $T_{outlet} = 393 \text{ }^{\circ}\text{C}$  περίπου, εκτρέπεται ώστε να περάσει διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας της αποθήκης. Ταυτόχρονα από τον εναλλάκτη διέρχεται υγροποιημένο άλας που έχει αντληθεί από την ψυχρή δεξαμενή, με θερμοκρασία  $T_{cold} = 290^{\circ}\text{C}$ , απορροφώντας θερμότητα από το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Η θερμοκρασία του άλατος αυξάνεται και κατόπιν αποθηκεύεται στην θερμή δεξαμενή με θερμοκρασία  $T_{hot} = 385^{\circ}\text{C}$ .

Η εκφόρτιση της αποθήκης γίνεται με τον αντίστροφο τρόπο. Αλάτι από τη θερμή δεξαμενή οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας της αποθήκης και θερμαίνει το κρύο μέσο μεταφοράς θερμότητας από μία θερμοκρασία  $T_{inlet2} = 283^{\circ}\text{C}$  σε μία θερμοκρασία  $T_{outlet2} = 380^{\circ}\text{C}$  περίπου.

### Βασικά μεγέθη αποθήκης:

Παρακάτω, παρουσιάζονται βασικά μεγέθη που υπολογίστηκαν προκειμένου να προσομοιωθεί το σύστημα αποθήκης του σταθμού. Τα συγκεκριμένα μεγέθη αναφέρονται σε αποθήκη για σταθμό καθαρής παραγωγής ( $W_{net}$ ) 50MW και διάρκειας 7,5 ωρών.

Η θερμοκρασία του άλατος στην θερμή ( $T_{hot}$ ) και στην ψυχρή ( $T_{cold}$ ) δεξαμενή αποθήκευσης αντίστοιχα, είναι:

$$T_{hot} = 385 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.3)$$

$$T_{cold} = 290 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.4)$$

Η θερμοκρασία του ελαίου στην είσοδο ( $T_{outlet}$ ) του εναλλάκτη θερμότητας της αποθήκης, όταν η αποθήκη φορτίζεται, είναι:

$$T_{outlet} = 393 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.5)$$

Η θερμοκρασία του ελαίου στην είσοδο ( $T_{inlet2}$ ) και στην έξοδο ( $T_{outlet2}$ ) του εναλλάκτη θερμότητας της αποθήκης, όταν η αποθήκη εκφορτίζεται, είναι:

$$T_{inlet2} = 283 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.6)$$

$$T_{outlet2} = 380 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.7)$$

Η ονομαστική παροχή μάζας ελαίου στον κύκλο ισχύος, κατά τη λειτουργία του σταθμού μόνο από την αποθήκη, είναι:

$$m_{HTFtes} = 620 \quad [\text{Kg/sec}]$$

Η ονομαστική θερμική ισχύς που απορροφά το λάδι, μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, από το αλάτι όταν ο σταθμός λειτουργεί μόνο από την αποθήκη, είναι:

#### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

$$Q_{htffromstorageONLY} = 146930 \quad [\text{KWth}]$$

##### Σημείωση:

Παρατηρείται ότι η θερμική ισχύς του ελαίου που καταλήγει στον κύκλο ισχύος όταν ο σταθμός λειτουργεί μόνο από την αποθήκη ( $Q_{htffromstorageONLY}$ ) είναι μικρότερη σε σύγκριση με την θερμική ισχύς που προέρχεται μόνο από το Ηλιακό πεδίο ( $Q_{sfNom}$ ). Αυτό συμβαίνει διότι στην πρώτη περίπτωση, η θερμοκρασία του ελαίου στην είσοδο του εναλλάκτη ισχύος είναι  $380^{\circ}\text{C}$ , ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι  $393^{\circ}\text{C}$ . Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι η ενθαλπία του ελαίου είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, προκύπτει ότι για σταθερή ροή μάζας ελαίου η παραγόμενη θερμική ισχύς εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του ελαίου.

$$Q_{thermal} = m * \Delta h(T) \quad (4.8)$$

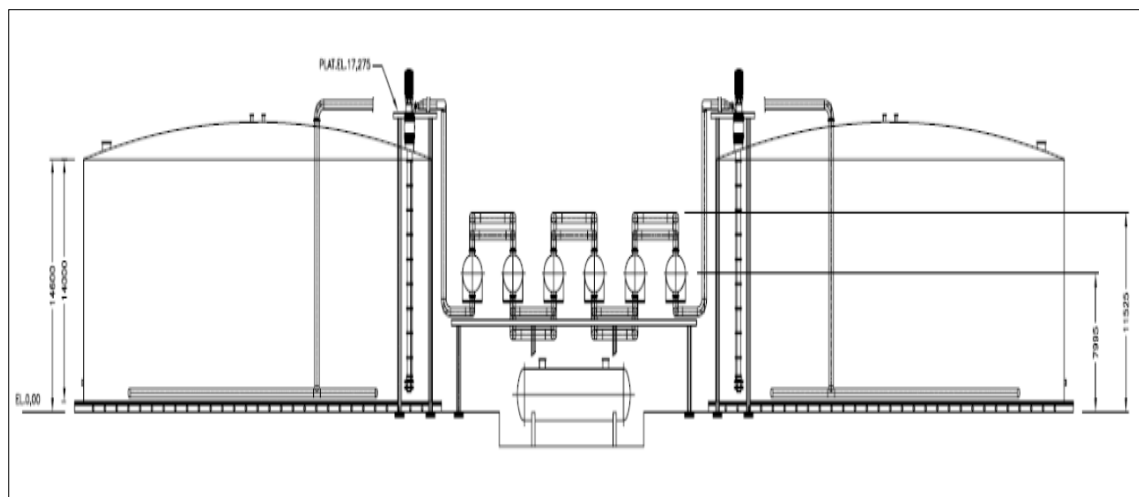
Η συνολική μάζα αλάτων που χρησιμοποιείται στο σύστημα αποθήκης, είναι:

$$TotalMass_{MS} = 28829 \quad [\text{ton}]$$

Η μέγιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια στα άλατα, είναι:

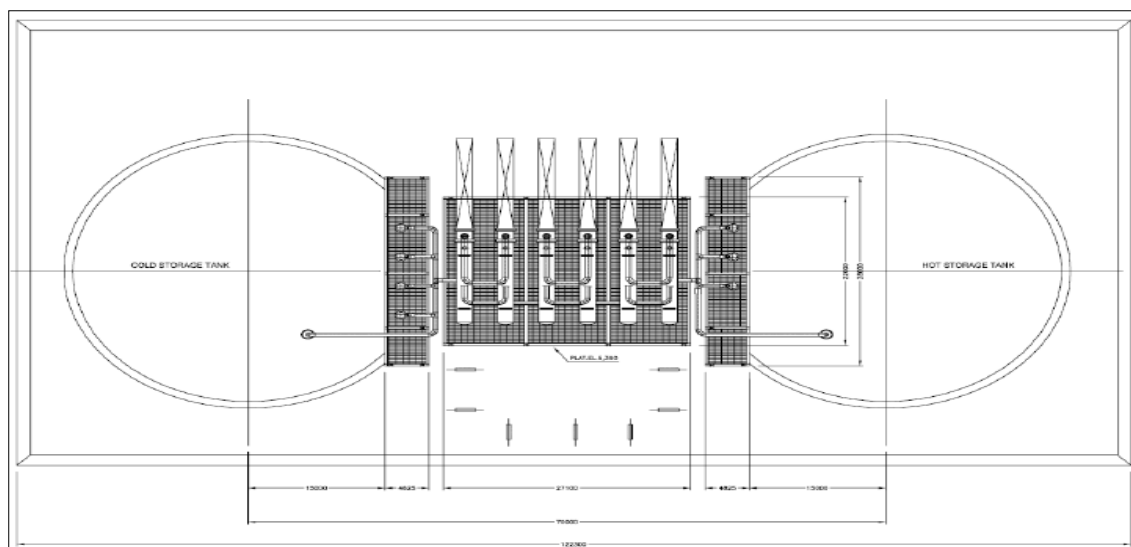
$$MaxEnergyStored = 1110000 \quad [\text{KWth}]$$

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται η πρόσοψη, η κάτοψη και η τρισδιάστατη όψη των δεξαμενών αποθήκευσης ενέργειας.

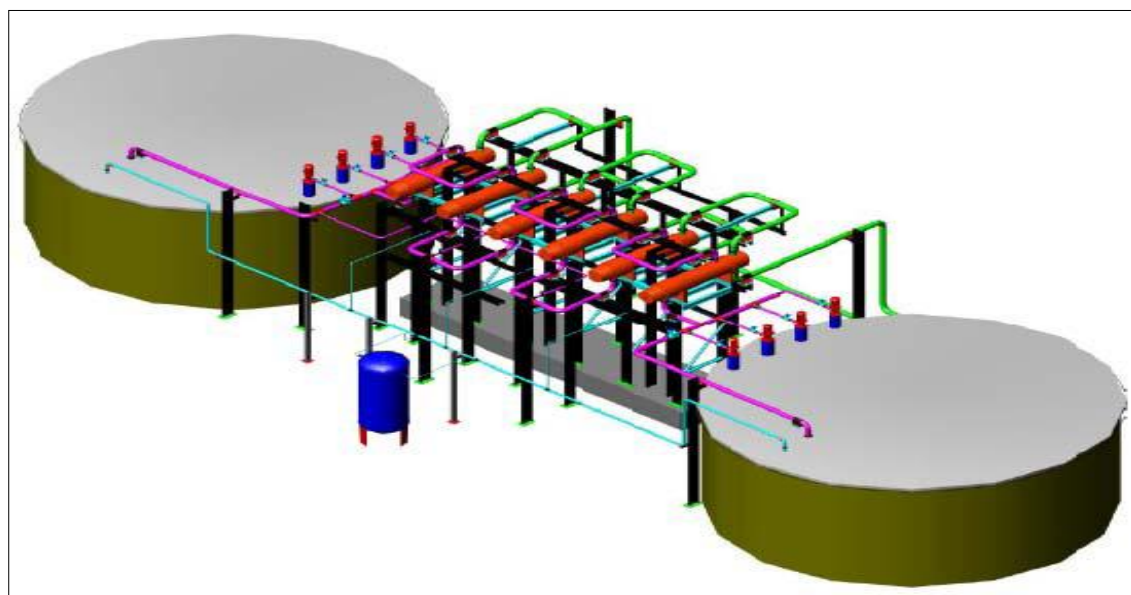


Σχήμα 4.11 Δεξαμενές Αποθήκευσης Ενέργειας (πρόσοψη) [19]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



Σχήμα 4.12 Δεξαμενές Αποθήκευσης Ενέργειας (κάτοψη) [19]

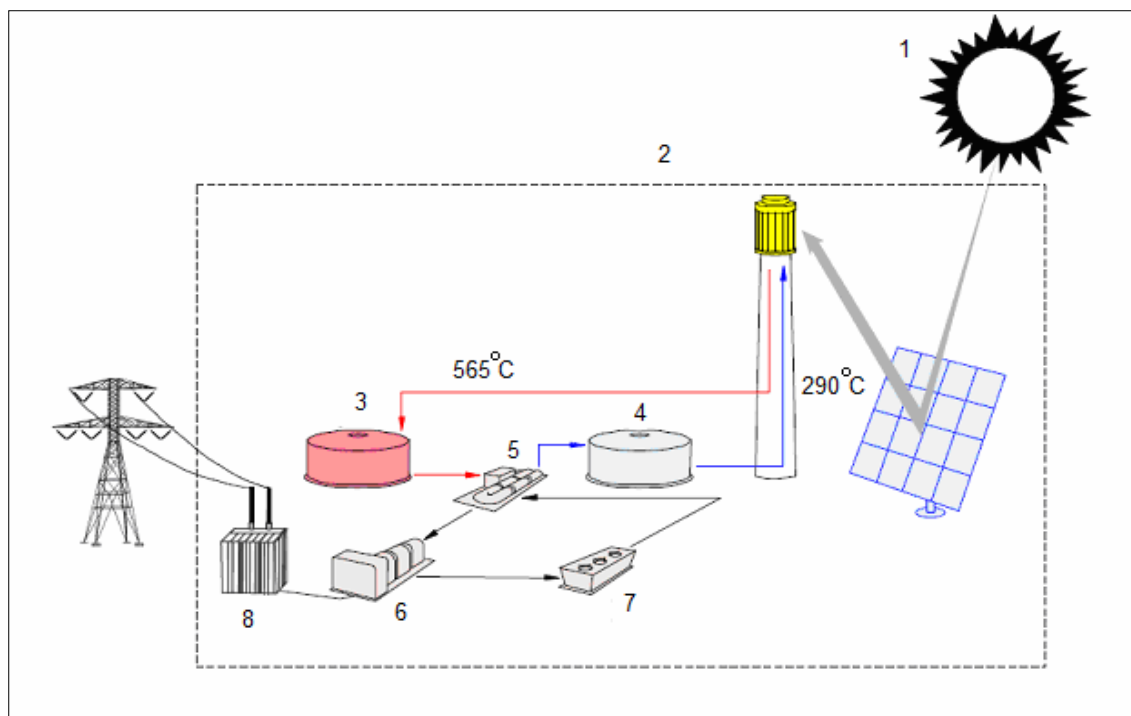


Σχήμα 4.13 Δεξαμενές Αποθήκευσης Ενέργειας (τρισδιάστατα) [20]

### 4.1.6.2 Άμεση αποθήκευση ενέργειας

Στη περίπτωση της άμεσης αποθήκευσης θερμότητας με δύο δεξαμενές το μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται και ως μέσο αποθήκευσης. Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



*Σχήμα 4.14 Αναπαράσταση Ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού πύργου με σύστημα αποθήκευσης δύο δεξαμενών (Άμεση Αποθήκευση)*

όπου:

- 1 : Ηλιακή Ακτινοβολία.
- 2 : Όρια συστήματος.
- 3 : Θερμή δεξαμενή αποθήκευσης.
- 4 : Ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης.
- 5 : Ατμοπαραγωγός.
- 6 : Ατμοστρόβιλος.
- 7 : Συμπυκνωτής.
- 8 : Υποσταθμός.

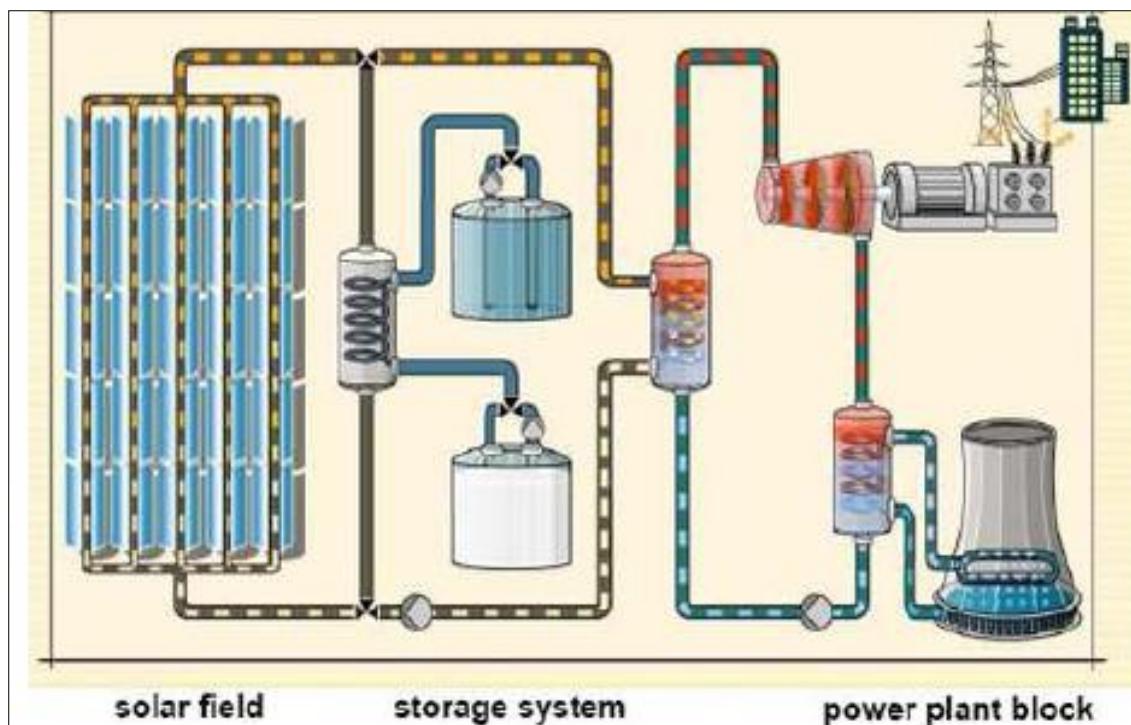
### 4.1.7 Αναπαράσταση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού σταθμού με αποθήκη θερμότητας δύο δεξαμενών

Παρακάτω ακολουθούν σχήματα τα οποία δείχνουν τον τρόπο λειτουργία ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (όταν ο σταθμός λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος). Παρόμοια, είναι και η λειτουργία του σταθμού όταν λειτουργεί με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος.

Τις πρωινές ώρες, μέχρι να «πιάσει» ο σταθμός την ονομαστική του ισχύς, όλη η θερμική ενέργεια που παράγεται από το Ηλιακό πεδίο οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας του κύκλου ισχύος.

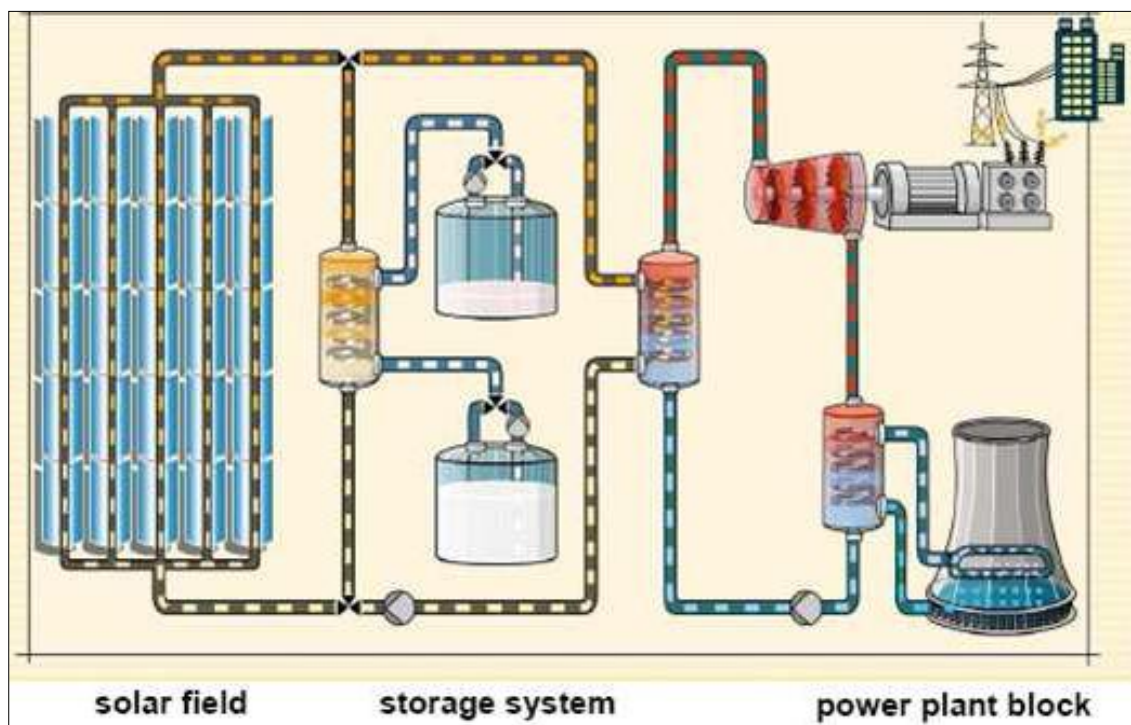


#### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



Σχήμα 4.15 Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού κατά τις πρωινές ώρες (δεν έχει «πιάσει» ακόμα την ονομαστική του ισχύ) [21]

Όταν ο σταθμός «πιάσει» την ονομαστική του ισχύς, ένα μέρος της θερμικής ενέργειας που παράγεται στο Ηλιακό πεδίο οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας της αποθήκης ώστε να θερμάνει το υγροποιημένο άλας και να φορτίσει η αποθήκη.

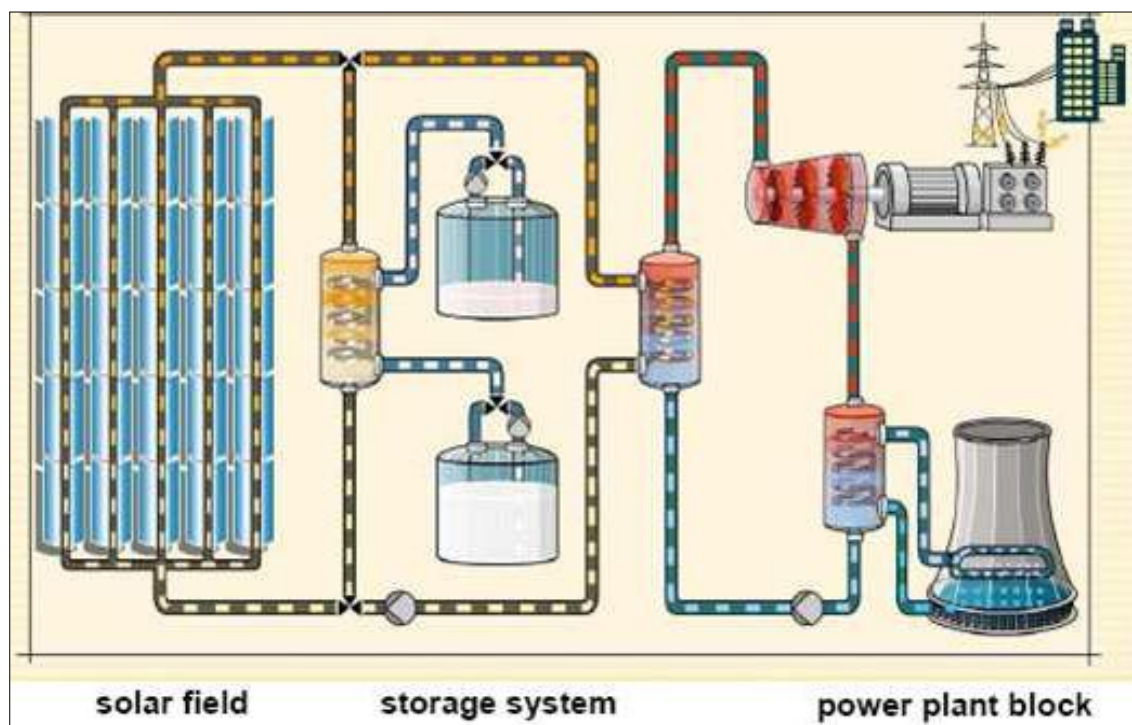


Σχήμα 4.16 Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού το μεσημέρι (όταν ο σταθμός έχει «πιάσει» την ονομαστική του ισχύ) [21]



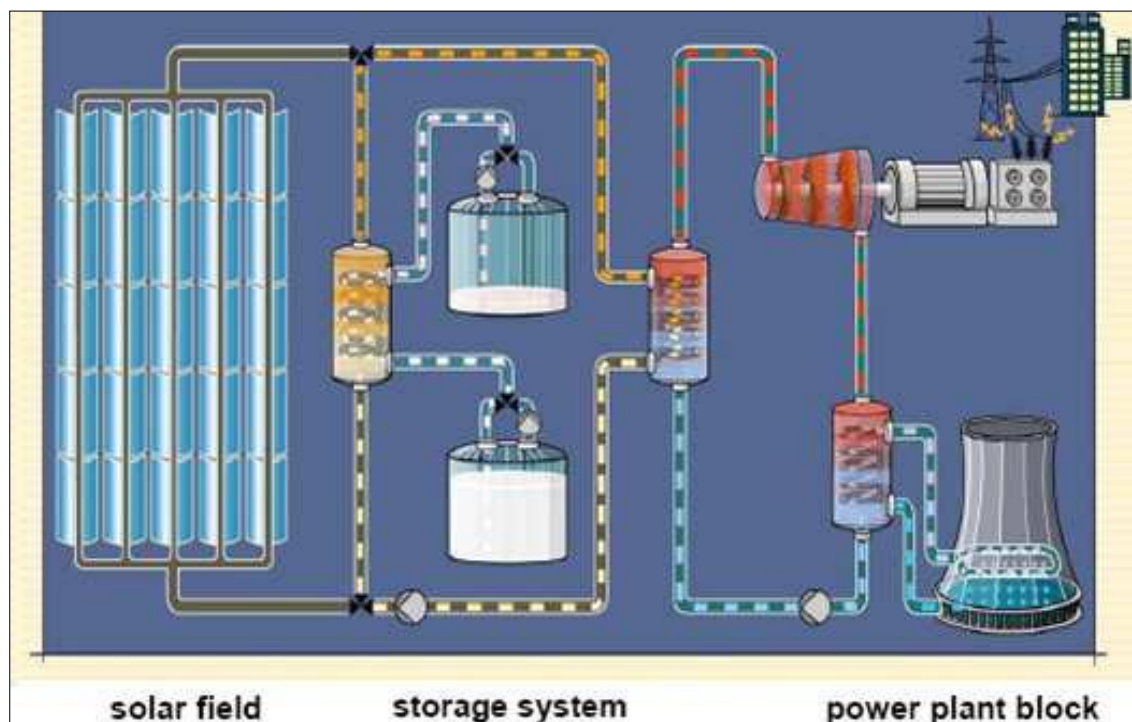
#### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Νωρίς το απόγευμα ή σε περιόδους συννεφιάς όπου η ακτινοβολία είναι περιορισμένη και ο σταθμός δεν «πιάνει» την ονομαστική του ισχύς η αποθήκη εκφορτίζεται.



Σχήμα 4.17 Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού νωρίς το απόγευμα ή σε περιόδους συννεφιάς [21]

Τέλος, τις ώρες που ο ήλιος έχει δύσει, ο σταθμός παράγει ενέργεια χρησιμοποιώντας μόνο την αποθήκη, εφ' όσον βέβαια είναι φορτισμένη.



Σχήμα 4.18 Αναπαράσταση λειτουργίας του σταθμού μετά την δύση του Ήλιου [21]

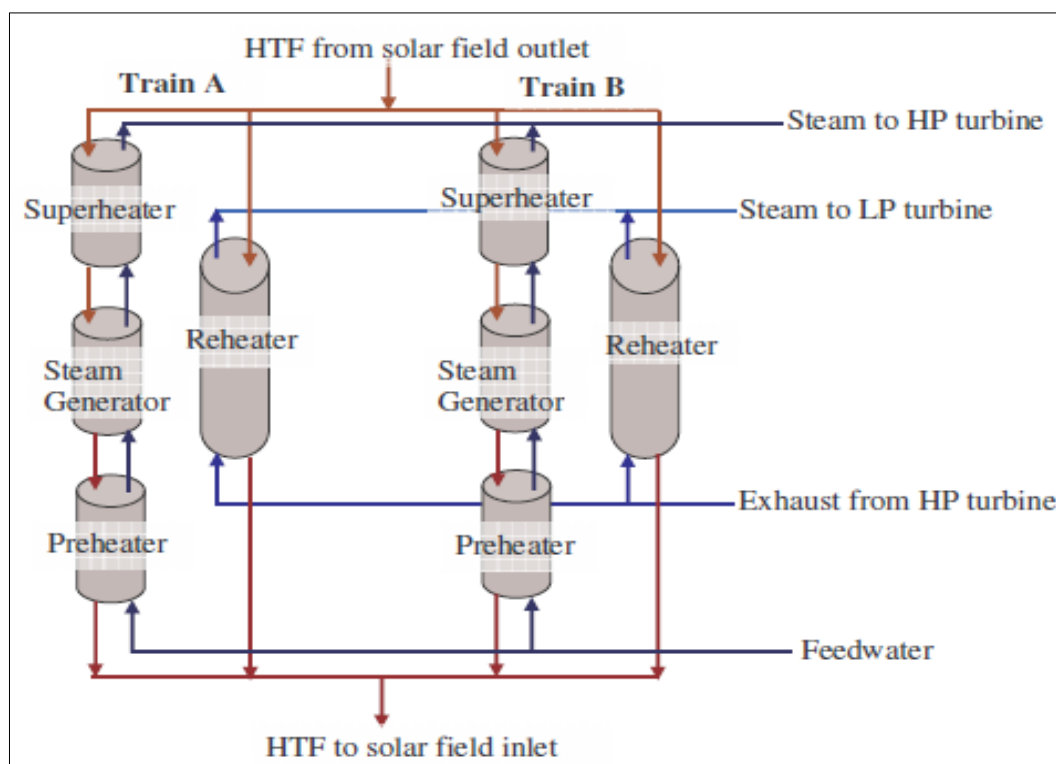
## 4.2 Ανάλυση κύκλου Ισχύος

### 4.2.1 Εισαγωγή

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμική ενέργεια που συλλέχθηκε από το Ηλιακό πεδίο πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική με τη βοήθεια ενός κατάλληλου κύκλου ισχύος. Ο κύκλος ισχύος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική είναι ένας παραδοσιακός κύκλος Rankine. Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφονται ο κύκλος ισχύος Rankine καθώς επίσης και βασικά μεγέθη του.

Ο κύκλος ισχύος ξεκινάει συλλέγοντας το ΜΜΘ, που επιστρέφει από το Ηλιακό πεδίο, σε ένα δοχείο διαστολής. Το δοχείο αυτό χρησιμεύει για να αντισταθμίσει την μεταβολή του όγκου του ΜΜΘ κατά τη διάρκεια της ημέρας, αφού ο ειδικός όγκος του ΜΜΘ εξαρτάται από την θερμοκρασία. Το ΜΜΘ αντλείται από το δοχείο διαστολής και οδηγείται σε δύο παράλληλα «τρένα» εναλλακτών θερμότητας (Train A και Train B) ως πηγή ενέργειας για τον κύκλο ισχύος [24], [25].

Το επόμενο σχήμα, αναπαριστά τη ροή του ΜΜΘ διαμέσου των εναλλακτών θερμότητας.

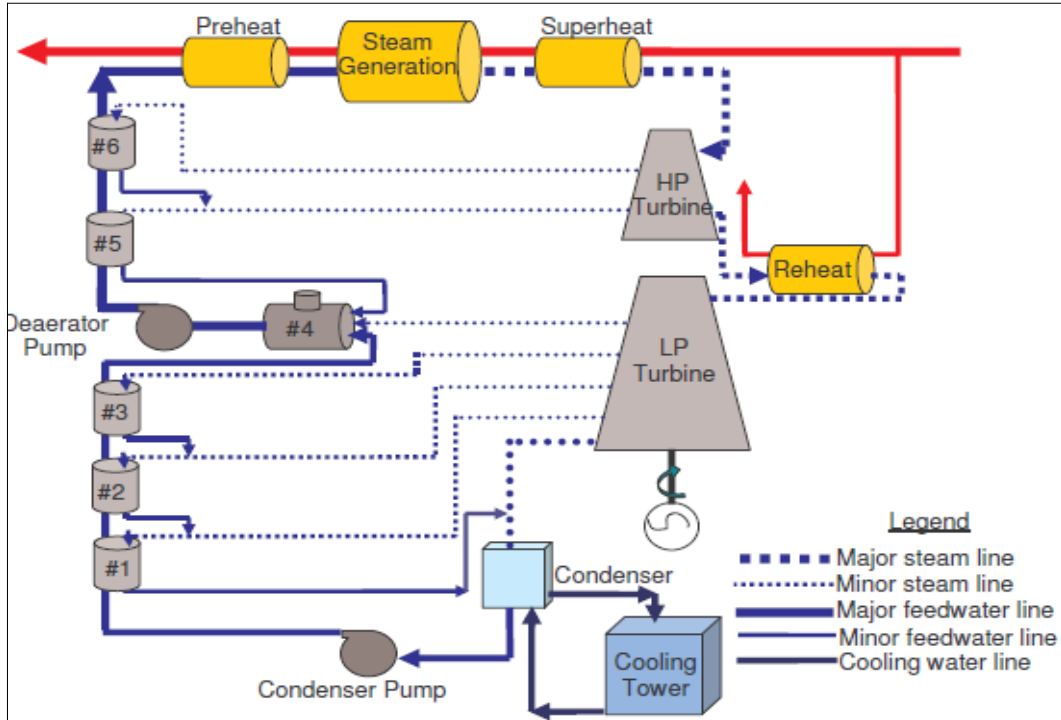


Σχήμα 4.19 Διάγραμμα ροής του ΜΜΘ διαμέσου των εναλλακτών θερμότητας [12]

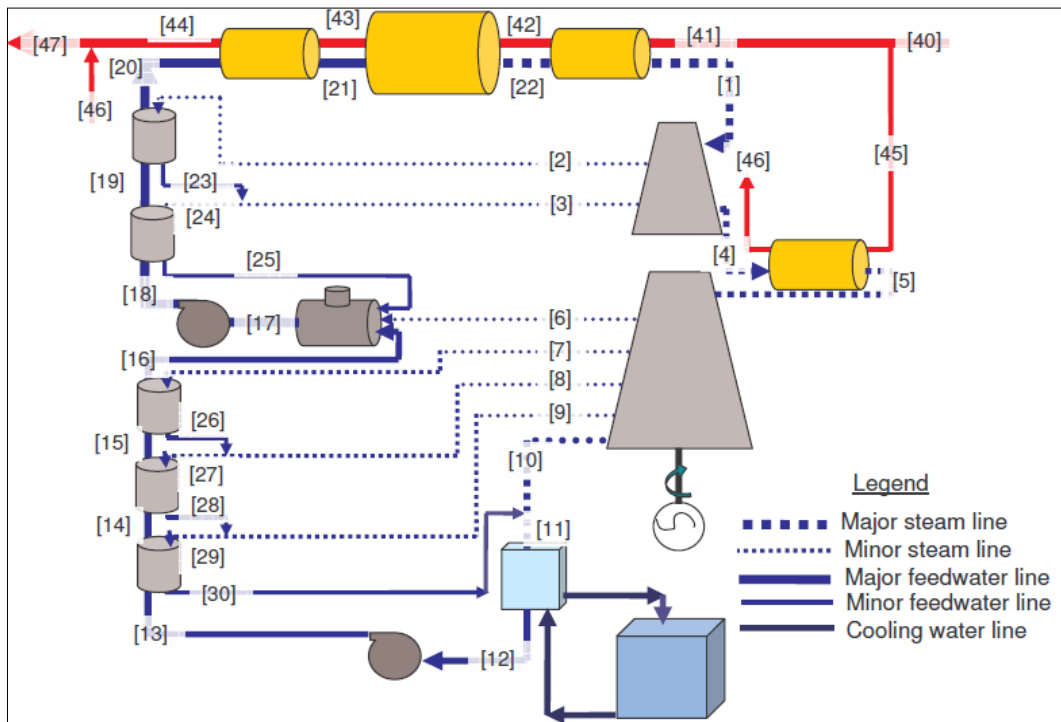
Για απλότητα, τα δύο παράλληλα «τρένα» εναλλακτών θερμότητας, μοντελοποιούνται ως ένα και μόνο «τρένο».

### 4.2.2 Κύκλος Rankine

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει το διάγραμμα ροής του κύκλου Rankine, ενώ το μεθεπόμενο διάγραμμα είναι ακριβώς το ίδιο, μόνο που έχει αριθμημένα κάποια στάδια του κύκλου ισχύος.



Σχήμα 4.20 Διάγραμμα ροής του κύκλου ισχύος [12]



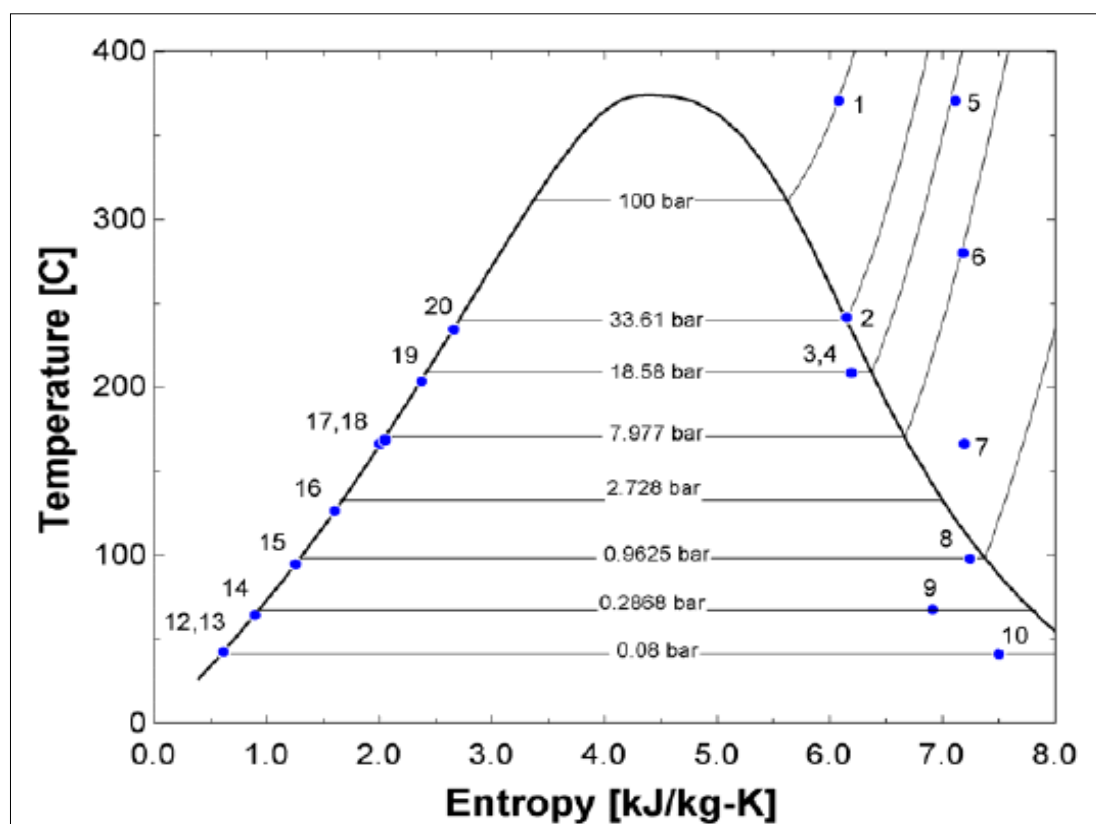
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα ροής του κύκλου ισχύος με αριθμημένα διάφορα στάδια του [12]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Το ΜΜΘ μετατρέπει, προθερμασμένο νερό σε ξηρό ατμό, με θερμοκρασία  $T=370^{\circ}\text{C}$  και πίεση  $p=100\text{ bar}$  (σε ονομαστικές συνθήκες), μέσω της ανταλλαγής θερμότητας που γίνεται στον προθερμαντή (στάδια [20], [21]), στον ατμοπαραγωγό ([21], [22]) και στον υπερθερμαντή ([22], [1]). Ο υπέρθερμος ατμός αρχικά, οδηγείται στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης ([1]) όπου εκτονώνεται και ωθεί τα πτερύγια της τουρμπίνας. Δύο απομαστεύσεις ([2], [3]) λαμβάνονται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και οδηγούνται σε δύο θερμοαντήρες νερού (#5 και #6) που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του νερού ([18], [19], [20]). Κατά την έξοδο του από το στρόβιλο υψηλής πίεσης, ο ατμός κατευθύνεται μέσω ενός αναθερμαντήρα ([4], [5]), στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης ([5]) με θερμοκρασία περίπου ίση με  $T=370^{\circ}\text{C}$  και πίεση περίπου ίση με  $p=17,5\text{ bar}$  (σε ονομαστικές συνθήκες). Ο υπέρθερμος ατμός, περνώντας μέσα από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, εκτονώνεται πάλι και ωθεί τα πτερύγια της τουρμπίνας. Τέσσερις απομαστεύσεις ([6], [7], [8], [9]) λαμβάνονται από την τουρμπίνα χαμηλής πίεσης και οδηγούνται στον εξαερωτήρα (#4) και σε τρεις ακόμη θερμοαντήρες νερού (#1, #2, #3). Ο ατμός που εξέρχεται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης ([10]) συμπυκνώνεται στον ψυκτήρα ([11]) με επιφανειακή ανταλλαγή θερμότητας μέσω νερού. Τέλος, ο συμπυκνωμένος ατμός ([13]) αντλείται σε μία αρκετά υψηλή πίεση  $p=15\text{ bar}$ , ώστε να μπορέσει να περάσει μέσα από τους θερμοαντήρες νερού [26], [27].

### 4.2.3 Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας

Παρακάτω, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας με σημειωμένα όλα τα στάδια του κύκλου Rankine.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας [12]

#### 4.2.4 Βασικά Μεγέθη κύκλου Ισχύος

Στη παράγραφο αυτή, παρατίθενται βασικά μεγέθη που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση ενός σταθμού 56 MW.

Όπως είδαμε στην παράγραφο 3.5 η ονομαστική θερμική ισχύς που καταλήγει στον κύκλο ισχύος είναι  $Q_{sfNom}$  και λαμβάνοντας υπ' όψιν την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας του κύκλου ισχύος, προκύπτει η ονομαστική θερμική ισχύς που εισέρχεται στον κύκλο ισχύος (θερμική ισχύς ατμού):

$$Q_{inNom} = nHX * Q_{sfNom} \quad [KWth] \quad (4.9)$$

Παρακάτω ακολουθούν βασικά μεγέθη του κύκλου ισχύος, για σταθμό με  $W_{gross}=56$  MW, για ονομαστική λειτουργία.

Ονομαστική λειτουργία του σταθμού:

Η ονομαστική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (ακαθάριστη) του σταθμού, είναι:

$$W_{grossnom} = 56000 \quad [KW]$$

Άρα, η ονομαστική απόδοση του κύκλου ισχύος, θα είναι:

$$nPCnom = \frac{W_{grossnom}}{Q_{inNom}} \quad (4.10)$$

δηλαδή:

$$nPCnom = 0,38$$

Η ονομαστική απόδοση της γεννήτριας, είναι:

$$n_{GenNom} = 0,98 \quad [12] \quad (4.11)$$

Επομένως, η ονομαστική ισχύς στον στρόβιλο, θα είναι:

$$W_{turbnom} = \frac{W_{grossnom}}{n_{GenNom}} \quad [KW] \quad (4.12)$$

δηλαδή:

$$W_{turbnom} = 57143 \quad [KW]$$

Ο ονομαστικός βαθμός εσωτερικής απόδοσης, μέσω όλων των υποτιθέμενων σταδίων του στρόβιλου, για τις ενθαλπίες που έχουν χρησιμοποιηθεί εδώ, είναι:

$$TurbInEffNom = \frac{h_1 - h_{2nom}}{h_1 - h_{2s}} \quad (4.13)$$

όπου:

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

$h_1$  = η ενθαλπία του ατμού στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας ( $T=370^\circ\text{C}$ ,  $p=100$  bar) του κύκλου ισχύος.

$h_{2nom}$  = η ενθαλπία του ατμού στην έξοδο του αμοστροβίλου, για ονομαστική λειτουργία ( $T=41^\circ\text{C}$ ,  $p=0.08$  bar).

$h_{2s}$  = Η ενθαλπία του ατμού στην έξοδο του αμοστροβίλου, υποθέτοντας ισεντροπική εκτόνωση στον στρόβιλο (σε όλα τα υποτιθέμενα στάδια του στρόβιλου).

Η ονομαστική ροή μάζας ατμού, είναι:

$$m_{StNom} = \frac{W_{turbnom}}{h_1 - h_{2nom}} \quad [\text{Kg/sec}] \quad (4.14)$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας του νερού/ατμού από την είσοδο στην έξοδο του εναλλάκτη, είναι:

$$Dh_{HX} = \frac{Q_{inNom}}{m_{StNom}} \quad [\text{KJ/Kg}] \quad (4.15)$$

### 4.3 Σύστημα Ψύξης

Παρακάτω αναλύονται διάφορα ψυκτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές μονάδες ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή εγκατάστασης αυτών (επάρκεια νερού, συνθήκες περιβάλλοντος κλπ).

Τα ψυκτικά συστήματα του νερού κυκλοφορίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Ανοικτά συστήματα ψύξης
- Κλειστά συστήματα ψύξης

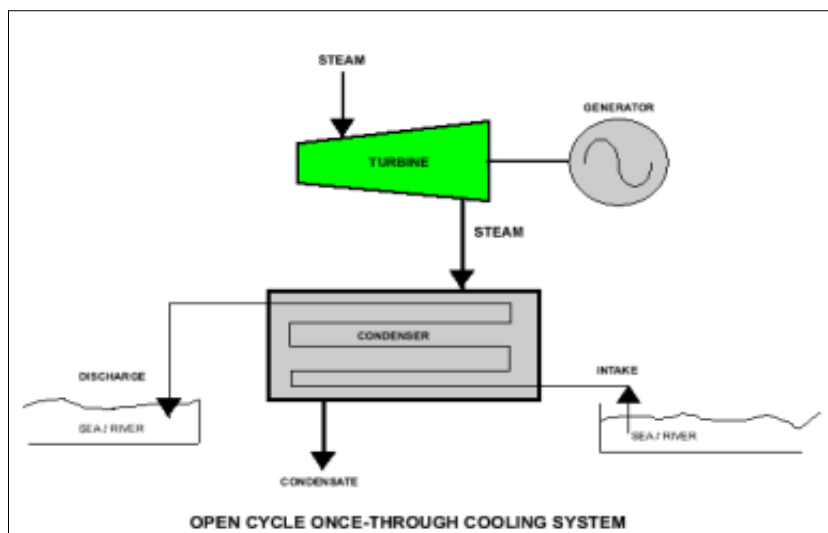
Τα **ανοικτά συστήματα ψύξης** χωρίζονται σε 2 υποκατηγορίες, την ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας και την ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας και περαιτέρω ψύξη αυτού με πύργο ψύξης.

#### 4.3.1 Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα ανοικτό ψυκτικό σύστημα χωρίς πύργο ψύξης:



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού



Σχήμα 4.23 Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας [28]

Ο ατμός εξερχόμενος από τον στρόβιλο εισέρχεται σε ένα επιφανειακό συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται με τη βοήθεια νερού ψύξης που προέρχεται από ποταμό ή από θάλασσα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.23.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- Απλή στη κατασκευή και στη λειτουργία της.
- Στη θάλασσα επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες και άρα επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός απόδοσης.
- Δεν είναι δαπανηρή.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

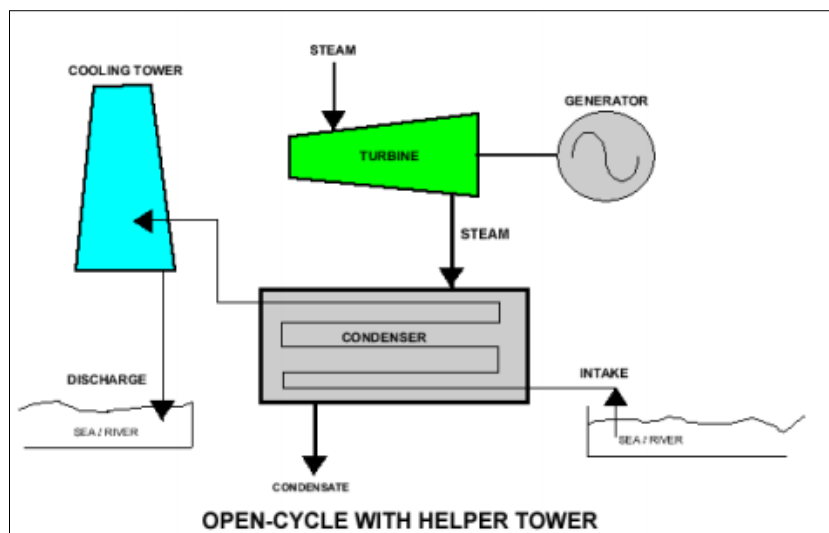
- Οι ποσότητες νερού που διατίθενται συνήθως για αυτό το σκοπό είναι περιορισμένες.
- Η δυνατότητα φόρτισης των υδάτων είναι περιορισμένη.
- Ο θερμικός σταθμός επιβάλλεται να γίνει εκεί που υπάρχει το ψυκτικό νερό.
- Υπάρχει ο κίνδυνος επικαθήσεων και διαβρώσεων στο ψυκτικό κύκλωμα.

Ακόμα, επειδή το νερό που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία και αποβάλλεται στη θάλασσα ή στον ποταμό, αποτελεί κίνδυνο για τους οργανισμούς που ζούνε στη θάλασσα. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται περιβαλλοντική μελέτη για να λαμβάνονται υπ' όψη τα όρια που επιβάλλονται σε κάθε περιοχή. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοσθεί η δεύτερη μέθοδος.

### 4.3.2 Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας και περαιτέρω ψύξη με τη βοήθεια πύργου ψύξης

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα ανοικτό ψυκτικό σύστημα με πύργο ψύξης.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

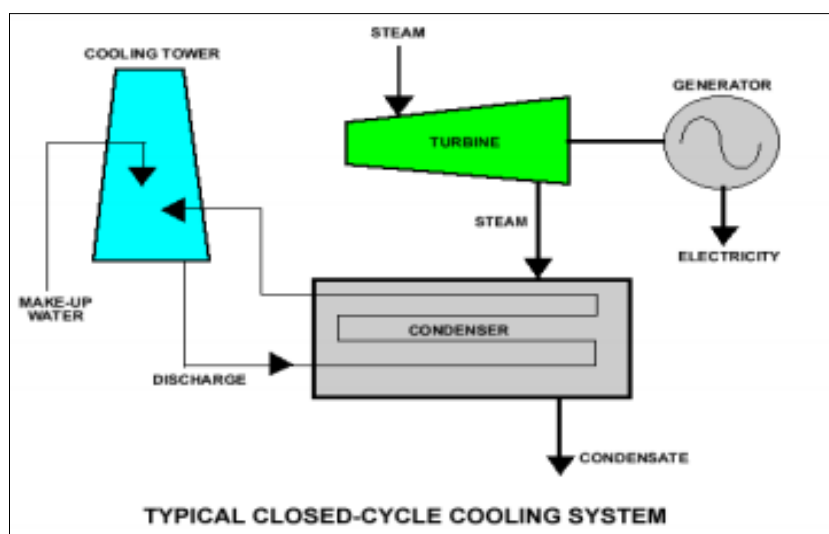


Σχήμα 4.24 Ψύξη με νερό ποταμού ή θάλασσας και με τη βοήθεια πύργου ψύξης [28]

Η μέθοδος αυτή είναι ίδια με πριν, απλά το νερό που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή, πριν καταλήξει στη θάλασσα, στη λίμνη ή στο ποταμό, διέρχεται από τον πύργο ψύξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το θερμικό φορτίο που προέρχεται από τους σταθμούς να αποβάλλεται κατά ένα μέρος στη θάλασσα και κατά ένα μέρος στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Στα **κλειστά ψυκτικά συστήματα** έχουμε τους υγρούς πύργους ψύξης που παρουσιάζονται παρακάτω και τα αεροψυγεία με τα οποία δεν θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα. Στα αεροψυγεία δεν απαιτείται καθόλου ψυκτικό νερό, η θερμοκρασία συμπύκνωσης όμως είναι αισθητά υψηλότερη ιδίως το καλοκαίρι, που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Στα κλειστά ψυκτικά συστήματα με πύργους ψύξης το θερμικό φορτίο των θερμοηλεκτρικών σταθμών καταλήγει στην ατμόσφαιρα. Επίσης η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στα ανοικτά ψυκτικά συστήματα.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα κλειστό σύστημα με πύργο ψύξης.



Σχήμα 4.25 Κλειστό σύστημα ψύξης με πύργο ψύξης [28]



### 4.3.3 Υγροί πύργοι Ψύξης

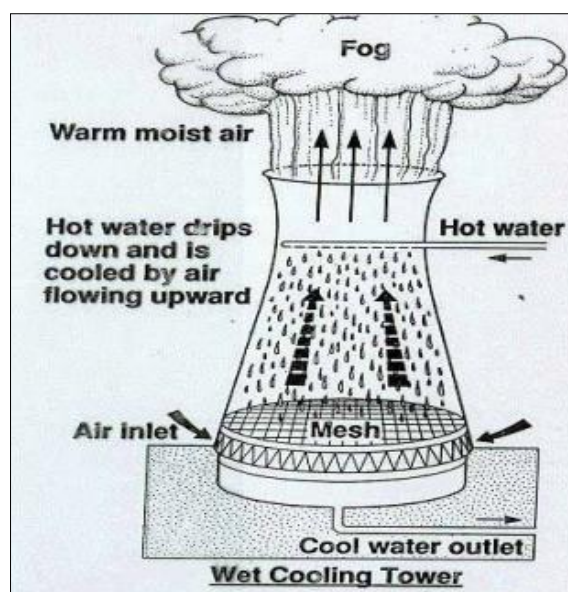
#### 4.3.3.1 Εισαγωγή

Ο ατμός που εξέρχεται από το στρόβιλο συμπυκνώνεται με τη βοήθεια ψυκτικού νερού σε επιφανειακό συμπυκνωτή. Το νερό ψύξης στη συνέχεια ψύχεται σε έναν υγρό πύργο ψύξης.



Σχήμα 4.26 Αναπαράσταση υγρού πύργου Ψύξης [29]

Ο υγρός πύργος ψύξης υψώνεται πάνω από μία δεξαμενή νερού σχήματος τετραγωνικού ή τις περισσότερες φορές κυλινδρικού. Είναι μία κυλινδρική ή τετράπλευρη κατασκευή επί της οποίας υπάρχει το σύστημα κατανομής και ψύξης του νερού. Το νερό κατανέμεται σε μεγάλο αριθμό καναλιών, απ' όπου με μικρές οπές πέφτει σε πιατάκια διασκορπισμού και κυλιέται σε κυματοειδείς επιφάνειες, ερχόμενο σε άμεση επαφή με τον από κάτω προς τα άνω προσαγόμενο αέρα όπου και ψύχεται.



Σχήμα 4.27 Λειτουργία υγρού πύργου Ψύξης φυσικού ελκυσμού [30]

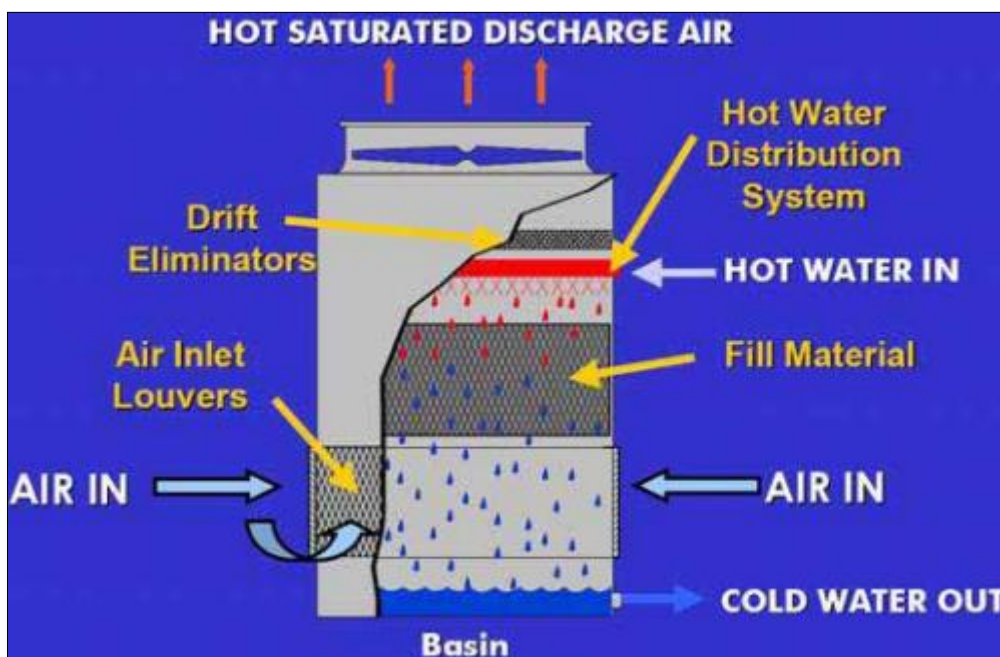
#### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Σαν υλικά για το υδραυλικό τμήμα κατανομής του νερού χρησιμοποιούνται ξύλο ή PVC. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αμιαντοτσιμέντο, το οποίο έχει σχεδόν απεριόριστη διάρκεια ζωής εφόσον το νερό ψύξης έχει υποστεί την κατάλληλη χημική κατεργασία. Τον τελευταίο καιρό χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο πλαστικά υλικά, αφού έχει γίνει πλέον γνωστή η επίδραση της σκόνης αμιάντου στους ανθρώπινους οργανισμούς. Το ξύλο έχει το πλεονέκτημα των χαμηλών εξόδων εγκατάστασης, υστερεί όμως στη διάρκεια ζωής έναντι του αμιαντοτσιμέντου. Η διάβρωση παρεμποδίζεται προσθέτοντας χρωμικά άλατα στο νερό. Τονίζεται ότι ο σχηματισμός αποθέσεων αλάτων αποφεύγεται ελέγχοντας το pH του νερού.

Ο αέρας εισάγεται κάτω από την επιφάνεια κατανομής και ψύξης του νερού από ανοίγματα στην περιφέρεια του πύργου και διαρρέει την επιφάνεια του, είτε σε αντιρροή, είτε με διασταυρούμενη ροή, είτε με καθαρά διασταυρούμενη ροή.

Η κυκλοφορία του αέρα γίνεται είτε φυσικά (πύργοι ψύξης φυσικού ελκυσμού) είτε με την χρήση ανεμιστήρων (πύργοι ψύξης βεβιασμένης κυκλοφορίας αέρα).

Συνήθως σε εγκαταστάσεις μικρού και μεσαίου μεγέθους (παραγωγή ισχύος < 150 MW) χρησιμοποιείται μηχανικός αερισμός είτε έχουμε αντιρροή των ρευμάτων είτε διασταυρούμενη ροή.



Σχήμα 4.28 Λειτουργία πύργου Ψύξης μηχανικής ροής αέρα [29]

Η πλειονότητα των πύργων ψύξης με πληρωτικά υλικά κατασκευάζονται από fiberglass (το περίβλημα), πλαστικό (το πληρωτικό υλικό) και ανοξείδωτο χάλυβα (τα στηρίγματα).

Σε πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις ψύξης νερού, δηλαδή σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που μας ενδιαφέρει, χρησιμοποιούνται συνήθως πύργοι φυσικού ελκυσμού και βεβιασμένης κυκλοφορίας. Οι πύργοι φυσικού ελκυσμού έχουν μεγάλο όγκο (π.χ. διάμετρος 60 m και ύψος 100 m), οπότε δεν πρέπει να έχουμε περιορισμό ύψους για την εγκατάσταση. Επίσης αυτού τους είδους οι πύργοι είναι κατάλληλοι για χώρες με εύκρατο κλίμα όπως είναι η Ελλάδα.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Ο αέρας που εξέρχεται από τους πύργους ψύξης περιέχει νερό κυκλοφορίας υπό μορφή σταγονιδίων. Οι σταγόνες μέχρι περίπου 10 μm κατατάσσονται στην ομίχλη και στον υπερκεκορεσμένο αέρα, ενώ οι σταγόνες με διάμετρο > 10 μm στο μηχανικά παρασυρόμενο νερό το οποίο δεν συγκροτείται από τον εξοπλισμό διαχωρισμού του νερού και αέρα του πύργου ψύξης. Ένα μέρος από τα εκπεμπόμενα σταγονίδια εξατμίζεται και το υπόλοιπο συμπυκνώνεται και πέφτει σαν βροχή στο έδαφος.

Σύγχρονες μελέτες έχουν αποδείξει ότι δεν επηρεάζεται το τοπικό κλίμα από τους πύργους ψύξης.

Έτσι συνοψίζοντας, τα κυριότερα λειτουργικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κλειστών πύργων ψύξης είναι:

### Πλεονεκτήματα:

1. Αποφυγή της θερμικής φόρτισης
2. Υπάρχει μικρή εξάρτηση του τόπου κατασκευής του σταθμού από τον τόπο όπου υπάρχει το ψυκτικό νερό (νερό προσθήκης όσο περίπου και η ατμοπαραγωγή). Αυτό συμβαίνει γιατί απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού μόνο για εξατμισμό και blowdown (Ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χρησιμοποιείται περίπου 1,5–3% του ψυκτικού νερού κυκλοφορίας όταν χρησιμοποιείται γλυκό νερό σαν ψυκτικό και 4-8% για θαλασσινό νερό).

### Μειονεκτήματα:

1. Υψηλά έξοδα εγκατάστασης.
2. Υψηλά έξοδα λειτουργίας γιατί συνεχώς πρέπει να προστίθεται νέο νερό στο κύκλωμα.
3. Υπάρχουν κίνδυνοι διαβρώσεων.
4. Υψηλότερο θερμοκρασιακό επίπεδο ψύξης.

### *4.3.3.2 Αρχή λειτουργίας*

Η αρχή λειτουργίας του πύργου ψύξης είναι:

Το κατιονιζόμενο νερό έρχεται σε επαφή με τον εισαγόμενο ατμοσφαιρικό αέρα στον πύργο ψύξης. Κατά τη διάρκεια παραμονής του αέρα μέσα στον πύργο παρατηρούνται δύο φαινόμενα:

A) Το νερό ψύχεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας με τους κλασικούς κανόνες της συναγωγής.

B) Ένα μέρος του νερού εξατμίζεται. Το νερό σε μορφή υδρατμών περιέρχεται στον αέρα ο οποίος λόγω της αυξανόμενης θερμοκρασίας και του χαμηλότερου βαθμού κορεσμού είναι σε θέση να το απορροφήσει. Η απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα λαμβάνεται από το υπόλοιπο νερό το οποίο συνεχώς ψύχεται.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Με αυτόν τον τρόπο απομακρύνεται κατά μέσο όρο το 80 % της αποβαλλόμενης θερμότητας, ενώ το υπόλοιπο 20% αποβάλλεται με συναγωγή.

Επειδή ο αέρας που βγαίνει είναι περίπου κορεσμένος και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την στιγμή που εξέρχεται από τον πύργο ψύξης ψύχεται και αποβάλλει μέρος από την θερμοκρασία που έχει απορροφήσει. Έτσι εμφανίζεται ένα σύννεφο υδρατμών πάνω από τους πύργους ψύξης.

Στο μοντέλο σταθμού που προσομοιώνεται στη παρούσα διπλωματική έχει χρησιμοποιηθεί υδρόψυκτο σύστημα. Το απαιτούμενο νερό προέρχεται από γεώτρηση.

### 4.4 Ιδιοκαταναλώσεις σταθμού

Στη παράγραφο αυτή θα αναφερθούν οι παρασιτικές καταναλώσεις που λαμβάνουν χώρα σε έναν Ηλιοθερμικό σταθμό.

#### 4.4.1 Ιδιοκαταναλώσεις στο Ηλιακό Πεδίο

Οι ιδιοκαταναλώσεις του Ηλιακού Πεδίου αφορούν δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις καταναλώσεις ισχύος που υφίστανται στις αντλίες ελαίου ( $W_{HTFPump}$ ) ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορά τις καταναλώσεις ισχύος που απαιτούνται για την κίνηση και τον έλεγχο των καθρεφτών ( $W_{bop}$ ).

#### 4.4.2 Ιδιοκαταναλώσεις στο σύστημα αποθήκευσης

Οι ιδιοκαταναλώσεις στο σύστημα αποθήκευσης λαμβάνουν χώρα κατά την φόρτιση και εκφόρτιση της αποθήκης. Συγκεκριμένα, αποτελούν τις καταναλώσεις ισχύος που συμβαίνουν στις αντλίες άλατος ( $W_{MSPump}$ ).

#### 4.4.3 Ιδιοκαταναλώσεις στον κύκλο ισχύος

Οι ιδιοκαταναλώσεις στον κύκλο ισχύος αφορούν τις καταναλώσεις που συμβαίνουν στους στροβίλους, στον προθερμαντή, στον αναθερμαντή και στον υπερθερμαντή ( $W_{pcparasitics}$ ) καθώς επίσης και στις αντλίες νερού/ατμού ( $W_{waterPump}$ ).

#### 4.4.4 Ιδιοκαταναλώσεις στο σύστημα ψύξης

Τέλος, υπάρχουν και οι ιδιοκαταναλώσεις του συστήματος ψύξης ( $W_{cooling}$ ).

#### 4.4.5 Συνολικές Ιδιοκαταναλώσεις σταθμού

Οι συνολικές παρασιτικές καταναλώσεις ( $Q_{totalLoss}$ ) ενός σταθμού, είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω καταναλώσεων που μόλις αναφέρθηκαν:

$$Q_{totalLoss} = W_{HTFPump} + W_{bop} + W_{MSPump} + W_{pcparasitics} + W_{waterPump} + W_{cooling} \quad [KW] \quad (4.16)$$

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Στους περισσότερους Ηλιοθερμικούς σταθμούς (όπως και σε αυτόν που προσομοιώνεται στην παρούσα διπλωματική) οι παρασιτικές καταναλώσεις αποτελούν το 12 -15% της συνολικής ακαθάριστης παραγωγής του σταθμού.

### 4.5 Καθαρή παραγωγή ενέργειας του σταθμού ( $W_{net}$ )

Η καθαρή παραγωγή ενέργειας ( $W_{net}$ ) του σταθμού υπολογίζεται, αν από τη συνολική παραγωγή ενέργειας ( $W_{gross}$ ) του σταθμού αφαιρέσουμε τις παρασιτικές καταναλώσεις ( $Q_{totalLoss}$ ):

$$W_{net} = W_{gross} - Q_{totalLoss} \quad [KW] \quad (4.17)$$

ή

$$W_{net} = W_{gross} - (W_{bop} + W_{pcparasitics} + W_{HTFPump} + W_{cooling} + W_{waterPump} + W_{MSPump}) \quad (4.18)$$

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ανάλυση Συστήματος Αποθήκης, Κύκλου Ισχύος και Ψύξης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

---

### Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού 50MW, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς, αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Ακόμη, παρουσιάζονται ορισμένα γραφήματα που θα βοηθήσουν στη κατανόηση της λειτουργίας του.

#### 5.1 «Πολιτική» λειτουργίας του Ηλιοθερμικού Σταθμού χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

Αρχικά, γίνεται μια πρόβλεψη της Ηλιακής Ακτινοβολίας για την επόμενη ημέρα. Συγκεκριμένα, προβλέπεται το άθροισμα της Ηλιακής Ακτινοβολίας για την επόμενη ημέρα και με τη βοήθεια ωριαίων συντελεστών, χαρακτηριστικών για κάθε μήνα (που έχουν προκύψει βάσει ιστορικών δεδομένων), προκύπτει η Ηλιακή Ακτινοβολία ανά ώρα για μία «τέλεια» ημέρα. Τέλος, της προστίθεται και ένα σφάλμα (που ακολουθεί κανονική κατανομή) της τάξης του 10% και έτσι προκύπτει η τελική Ηλιακή Ακτινοβολία που έχει προβλεφτεί για την επόμενη ημέρα.

Στη συνέχεια, με βάση αυτή την Ηλιακή Ακτινοβολία γίνεται ένας προγραμματισμός λειτουργίας του σταθμού για την επόμενη ημέρα. Συγκεκριμένα, ο σταθμός ξεκινάει να λειτουργεί εφ' όσον μπορεί να παράγει το 25% της ονομαστικής θερμικής ισχύος του και ταυτόχρονα μπορεί να λειτουργήσει για τουλάχιστον τρεις συνεχόμενες ώρες πάνω από το 20% της ονομαστικής θερμικής ισχύος του, μέσα στην ημέρα. Δηλαδή, τα τεχνικά ελάχιστα του σταθμού είναι 25% για την έναρξη λειτουργίας και 20% κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τώρα, εφ' όσον ο σταθμός πρόκειται να λειτουργήσει, δίνει στο δίκτυο ότι ισχύς παράγει (με άνω όριο την ονομαστική ισχύς του και κάτω όριο το 20% αυτής). Σε περίπτωση που υπάρχει πλεόνασμα θερμικής ισχύος (δηλαδή μεγαλύτερη από την ονομαστική θερμική ισχύς), αυτή προβλέπεται να «πάει» στην αποθήκη. Αν η αποθήκη είναι γεμάτη ή αν δεν χωράει ολόκληρη τη θερμική ισχύς που προορίζεται για αυτήν τότε βγαίνουν «εκτός λειτουργίας» κάποιοι καθρέφτες (ουσιαστικά απεστιάζονται από τον ήλιο, οπότε δεν συνεισφέρουν στη θέρμανση του λαδιού και κατά συνέπεια στην παραγωγή θερμικής ισχύος). Κατ' αυτόν τον τρόπο, παράγεται τόση θερμική ισχύς που να είναι ίση με την ονομαστική αν η αποθήκη είναι ήδη



γεμάτη, ή τόσο ώστε να είναι ίση με την ονομαστική συν όση χωράει στην αποθήκη αν αυτή δεν είναι πλήρως γεμάτη. Τέλος, όταν η αποθήκη είναι «φορτισμένη» και η ισχύς που παράγεται από το ηλιακό πεδίο είναι μικρότερη της ονομαστικής τότε η αποθήκη δίνει όση ισχύ απαιτείται προκειμένου ο σταθμός να δουλεύει στις ονομαστικές του τιμές. Η αποθήκη συνεχίζει να εκφορτίζεται (ανεξαρτήτως ηλιακού πεδίου) μέχρις ότου να μην μπορεί να παράγει το 20% της ονομαστικής ενέργειας του σταθμού.

Πέρα από τα παραπάνω, υπάρχει περίπτωση να παρατηρηθεί βύθιση ισχύος για κάποιες ώρες. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το γεγονός, η βύθιση αυτή καλύπτεται είτε από την αποθήκη, αν αυτή περιέχει αρκετή ενέργεια, είτε από τον καυστήρα, αν η αποθήκη είναι άδεια.

Αυτός λοιπόν είναι ο προγραμματισμός λειτουργίας του σταθμού για την επόμενη ημέρα με βάση την ακτινοβολία πρόβλεψης. Αυτό είναι το πρόγραμμα λειτουργίας που δίνεται στον διαχειριστή και στο οποίο καλείται να ανταποκριθεί ο σταθμός με βάση την πραγματική ακτινοβολία.

Προκειμένου να ακολουθηθεί αυτό το πρόγραμμα, ο σταθμός θα έχει να αντιμετωπίσει δύο «προβλήματα»: 1) την περίπτωση να υπάρχει πλεόνασμα και 2) την περίπτωση να υπάρχει έλλειμμα θερμικής ισχύος σε σύγκριση με αυτό της πρόβλεψης. Παρακάτω εξηγείται πως αντιμετωπίζεται το κάθε ένα «πρόβλημα».

### Πλεόνασμα Θερμικής Ισχύος:

Όταν υπάρχει πλεόνασμα θερμικής ισχύος, ο σταθμός δουλεύει ως εξής:

1. Αν το πλεόνασμα μπορεί να αποθηκευτεί εξ' ολοκλήρου στην αποθήκη, τότε απλώς αποθηκεύεται.
2. Αν το πλεόνασμα δεν μπορεί να αποθηκευτεί εξ' ολοκλήρου στην αποθήκη, τότε απεστιάζονται όσοι καθρέφτες απαιτούνται ώστε η παραγόμενη θερμική ισχύς να μειωθεί και να γίνει ίση με την ονομαστική θερμική ισχύς συν όση απαιτείται για να γεμίσει η αποθήκη.
3. Αν η αποθήκη είναι γεμάτη, τότε πάλι απεστιάζονται όσοι καθρέφτες απαιτούνται ώστε η παραγόμενη θερμική ισχύς να γίνει ίση με την ονομαστική.

### Έλλειμμα Θερμικής Ισχύος:

Όταν υπάρχει έλλειμμα θερμικής ισχύος, ο σταθμός δουλεύει ως εξής:

1. Αν αυτό το έλλειμμα μπορεί να το «δώσει» όλο η αποθήκη, τότε απλώς εκφορτίζεται η αποθήκη δίνοντας όση θερμική ισχύ χρειάζεται για να καλυφθεί το έλλειμμα.
2. Αν αυτό το έλλειμμα δεν μπορεί να το «δώσει» όλο η αποθήκη, τότε εκφορτίζεται πλήρως η αποθήκη καλύπτοντας όσο έλλειμμα μπορεί και το υπόλοιπο καλύπτεται με την χρήση καυστήρα.
3. Αν η αποθήκη είναι άδεια, τότε το έλλειμμα αυτό καλύπτεται εξ' ολοκλήρου με την χρήση καυστήρα.



Ακόμα, υπάρχει περίπτωση στο τέλος μιας ημέρας, και ενώ ο σταθμός έχει ανταποκριθεί κανονικά στο πρόγραμμα λειτουργίας βάσει της πρόβλεψης, να έχει περισσέψει ενέργεια στην αποθήκη. Αν αυτή η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το 20% της ονομαστικής που παράγει ο σταθμός, τότε χρησιμοποιείται την επόμενη ημέρα το πρωί ώστε να ξεκινήσει ο σταθμός μία ώρα νωρίτερα απ' ό τι θα ξεκινούσε κανονικά.

Με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω πραγματοποιείται ο προγραμματισμός και η λειτουργία ενός σταθμού. Παρακάτω, ακολουθεί η προσομοίωση ενός τέτοιου Ηλιοθερμικού Σταθμού.

### 5.2 Προσομοίωση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού (χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος)

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν γραφήματα και συνοπτικοί πίνακες με διάφορα μεγέθη από την προσομοίωση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού. Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να αναφερθούν κάποια κύρια χαρακτηριστικά του σταθμού. Αυτά φαίνονται συγκεντρωμένα στον επόμενο πίνακα.

Χαρακτηριστικά Σταθμού	
Ετήσια Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία που φθάνει στη γη	2135 KWh/m <sup>2</sup>
Ονομαστική Ηλεκτρική Ισχύς (W <sub>gross</sub> )	56MW
Ονομαστική Ηλεκτρική Ισχύς αφαιρώντας τις ιδιοκαταναλώσεις (W <sub>net</sub> )	50MW
Ονομαστική Θερμική Ισχύς	150,8MW <sub>th</sub>
Έκταση Γης	2048 στρέμματα
Loops	169
Καθρέφτες (4 ανά loop)	676
Ωρες Αποθήκης	7,5
Χωρητικότητα Αποθήκης	1110MW <sub>hth</sub>
Θερμική Ισχύς Καυστήρα	150,8MW <sub>th</sub>
Ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για την έναρξη λειτουργίας του σταθμού	25%
Τεχνικό Ελάχιστο κατά την λειτουργία του σταθμού (Q <sub>sfmin</sub> )	20%

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά Σταθμού

Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί για μία καλοκαιρινή και μία χειμωνιάτικη εβδομάδα, ούτως ώστε να έχουμε μία πιο σαφή εικόνα.

#### 5.2.1 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 1 – 7 Αυγούστου

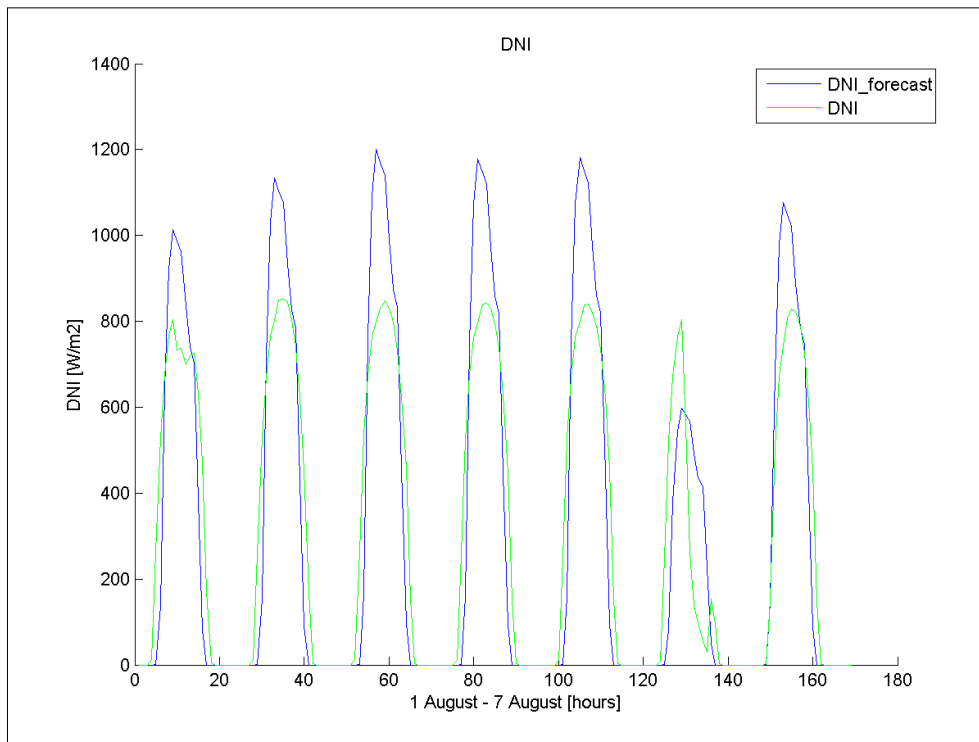
Η καλοκαιρινή εβδομάδα θα είναι από τις 1 έως τις 7 Αυγούστου.

Αρχικά παρουσιάζεται σε γράφημα (Γράφημα 5.1) η προβλεπόμενη Ηλιακή Ακτινοβολία (DNI<sub>forecast</sub>) που υπολογίστηκε με τον τρόπο που προαναφέρθηκε καθώς επίσης και η πραγματική ακτινοβολία (DNI).

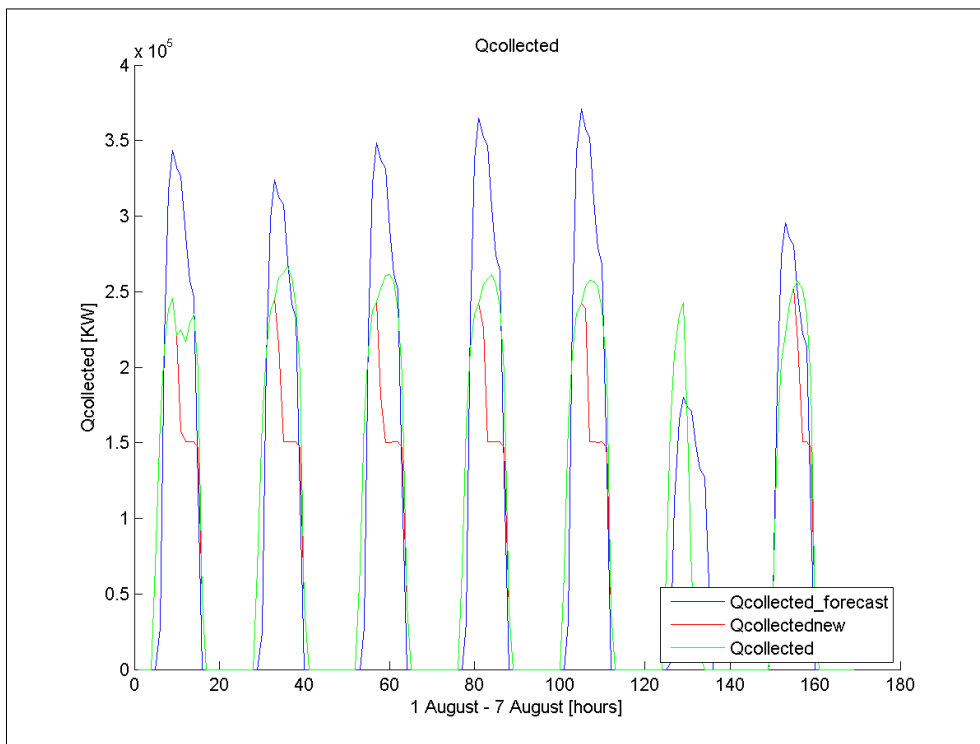
Έπειτα στο Γράφημα 5.2 παρουσιάζεται η συλλεγόμενη Θερμική Ισχύς από το Ηλιακό Πεδίο, τόσο για την προβλεπόμενη ακτινοβολία (Q<sub>collectedforecast</sub>) όσο και για την πραγματική

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής

ακτινοβολία ( $Q_{\text{collected}}$ ). Τέλος, παρουσιάζεται και η Θερμική Ισχύς ( $Q_{\text{collectednew}}$ ) που προκύπτει εφ' όσον τεθούν, για την ομαλή λειτουργία του σταθμού, κάποιοι καθρέφτες εκτός λειτουργίας (π.χ. επειδή η αποθήκη έχει γεμίσει).

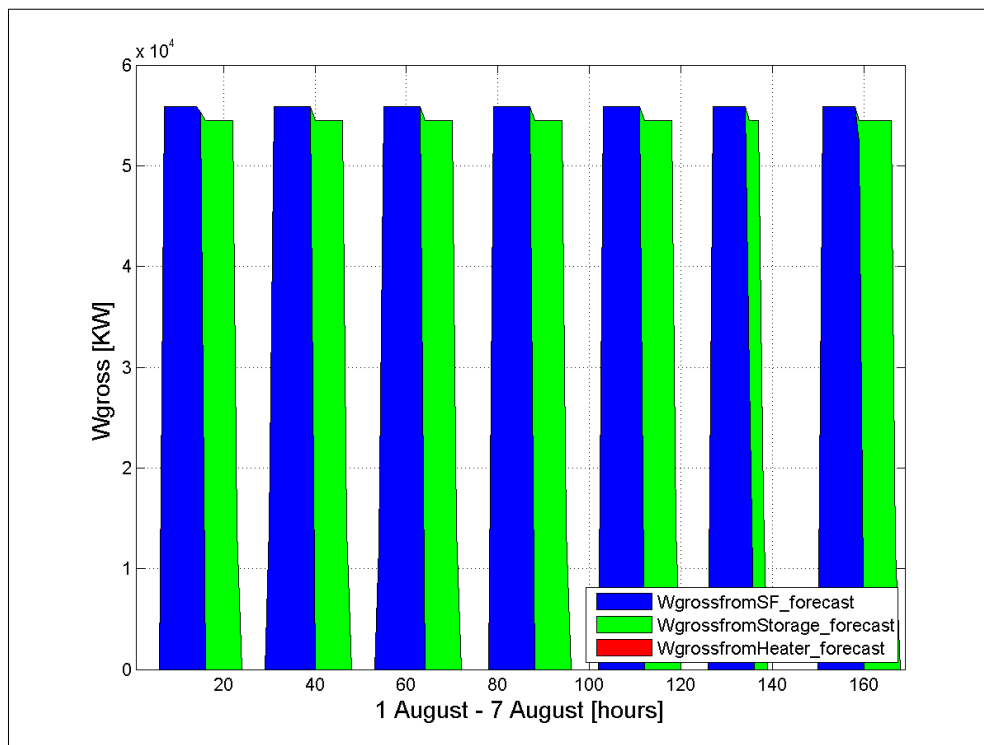


Γράφημα 5.1 Αναπαράσταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας



Γράφημα 5.2 Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο

Με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία υπολογίζεται η ενέργεια που θα παράγει και θα δώσει στο δίκτυο ο σταθμός, την επόμενη ημέρα. Στο επόμενο γράφημα (Γράφημα 5.3) απεικονίζεται η ενέργεια αυτή καθώς και από πού προέρχεται. Η ενέργεια αυτή μπορεί να προέρχεται είτε απευθείας από το Ηλιακό Πεδίο ( $W_{\text{grossfromSF\_forecast}}$ ), είτε από την αποθήκη ( $W_{\text{grossfromStorage\_forecast}}$ ), είτε από τον καυστήρα ( $W_{\text{grossfromHeater\_forecast}}$ ).



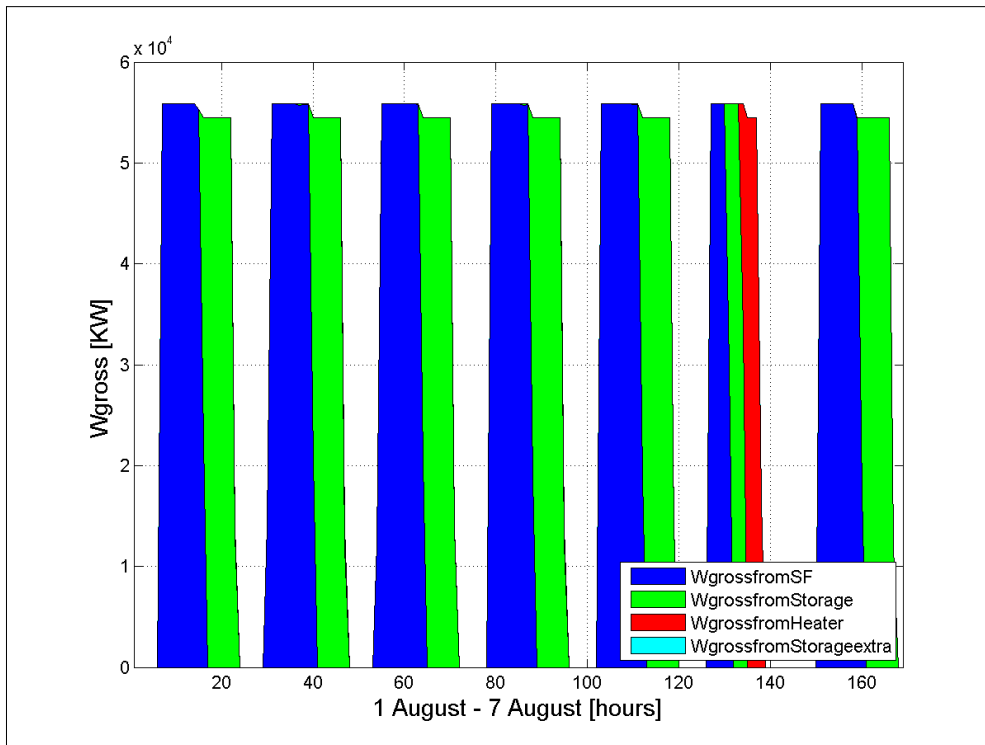
Γράφημα 5.3 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία

Τώρα, με βάση την πραγματική ακτινοβολία, ο σταθμός καλείται να παράγει και να δώσει στο δίκτυο τόση ενέργεια ανά ώρα όση είχε υπολογιστεί ότι θα έδινε με βάση την πρόβλεψη. Στο Γράφημα 5.4 απεικονίζεται η ενέργεια αυτή καθώς και από πού προέρχεται. Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.1 υπάρχει περίπτωση στο τέλος της ημέρας, και ενώ ο σταθμός έχει ανταποκριθεί στην παραγωγή ενέργειας που είχε δηλωθεί στον διαχειριστή, να έχει περισσέψει ενέργεια στην αποθήκη. Αν αυτή η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το 20% της ονομαστικής που μπορεί να παράγει ο σταθμός, τότε την επόμενη ημέρα ο σταθμός ξεκινάει τη λειτουργία του μία ώρα νωρίτερα, απ' ό,τι θα ξεκινούσε με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία, χρησιμοποιώντας την ενέργεια αυτή ( $W_{\text{grossfromStorageextra}}$ ). Στο Γράφημα 5.5 φαίνεται η καθαρή παραγωγή ενέργειας του σταθμού ( $W_{\text{net}}$ ), δηλαδή η ενέργεια που καταλήγει στο δίκτυο, καθώς επίσης και οι παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού ( $Q_{\text{totalloss}}$ ).

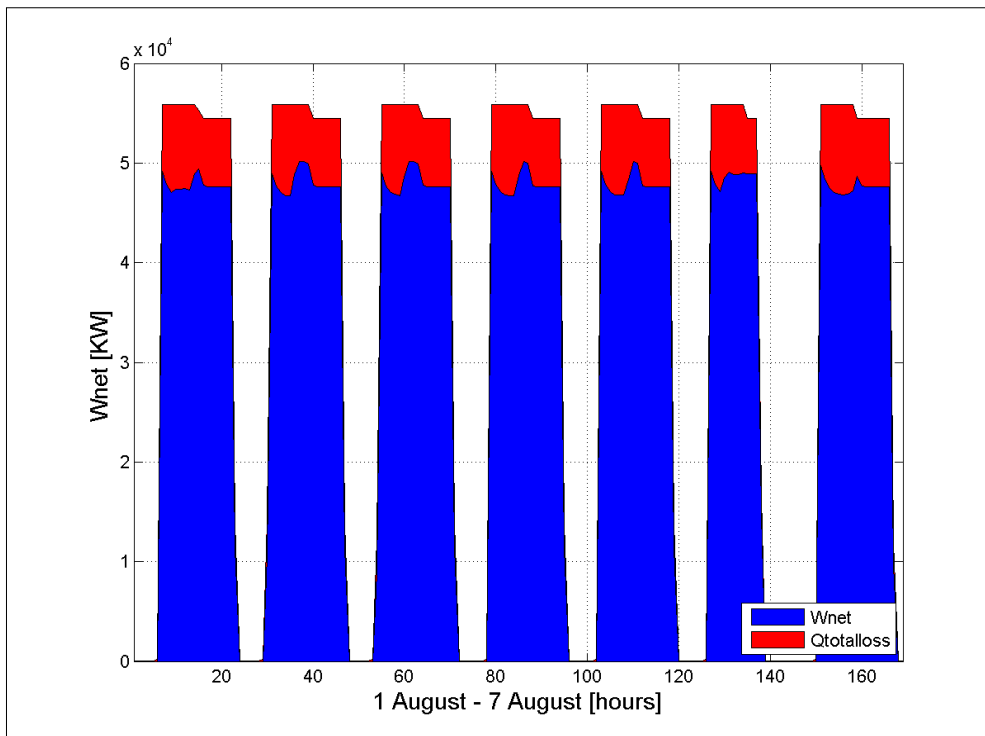
Στο Γράφημα 5.6 παρουσιάζεται η κατάσταση της αποθήκης του σταθμού ανά ώρα. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η αποθήκη μπορεί να προσφέρει ενέργεια ίση την ονομαστική ισχύς του σταθμού το πολύ για 7,5 ώρες. Συνολικά η αποθήκη μπορεί να αποθηκεύσει μέχρι 1110 MWh θερμικής ισχύος.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής

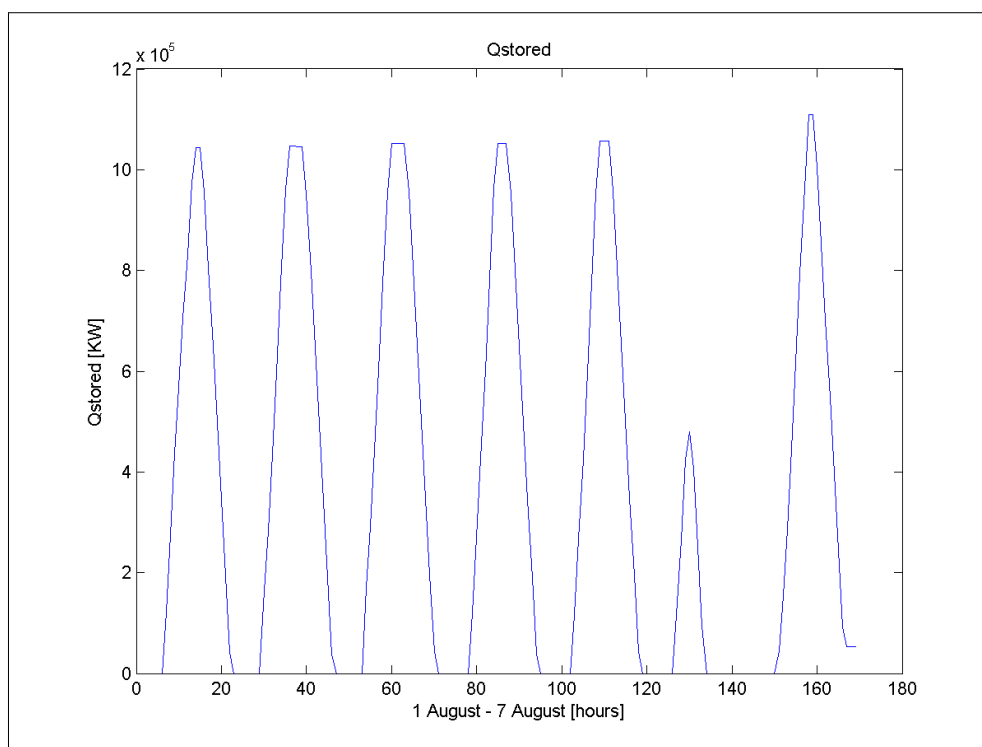
Στο Γράφημα 5.7 απεικονίζεται η ενέργεια που θα έπρεπε να απορριφθεί, αν ο σταθμός λειτουργούσε με όλους τους καθρέφτες σε «εστίαση», επειδή η αποθήκη είχε γεμίσει. Στο Γράφημα 5.8 φαίνεται ο αριθμός των καθρεφτών που εστιάζουν ανά ώρα ώστε να μην χρειαστεί να απορριφθεί ενέργεια.



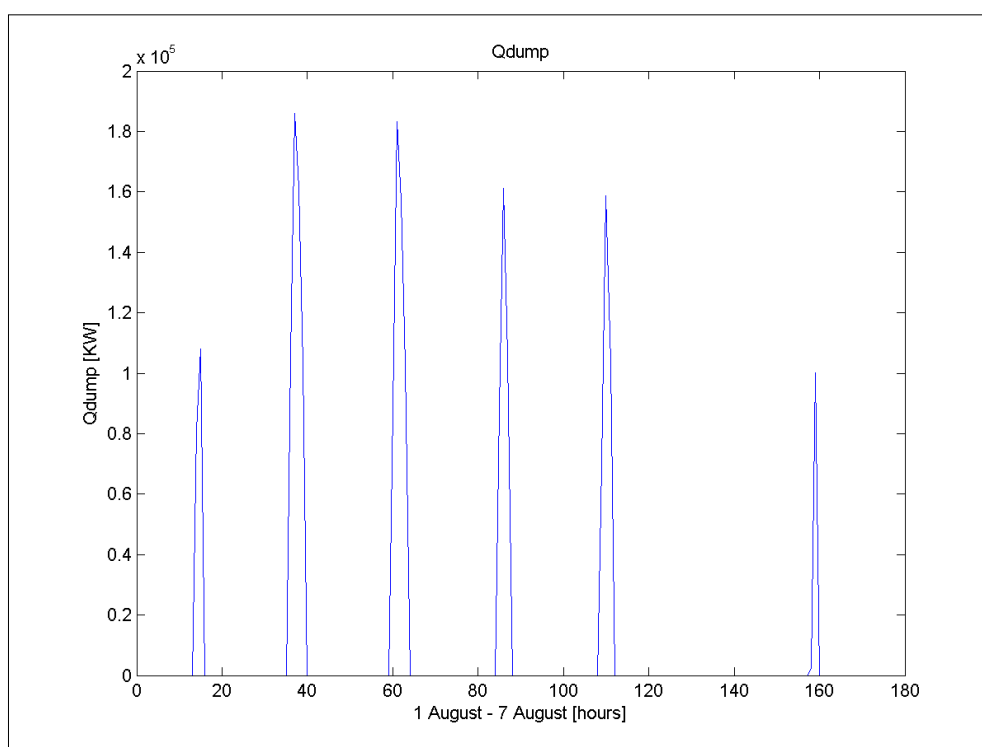
Γράφημα 5.4 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία



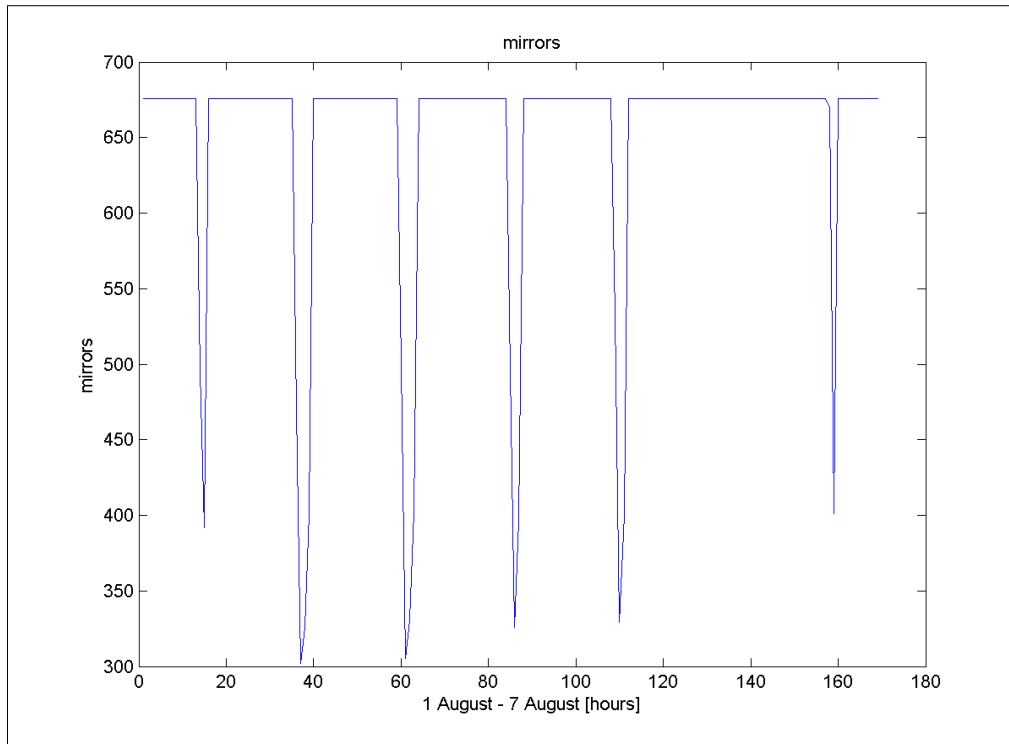
Γράφημα 5.5 Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία



Γράφημα 5.6 Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης

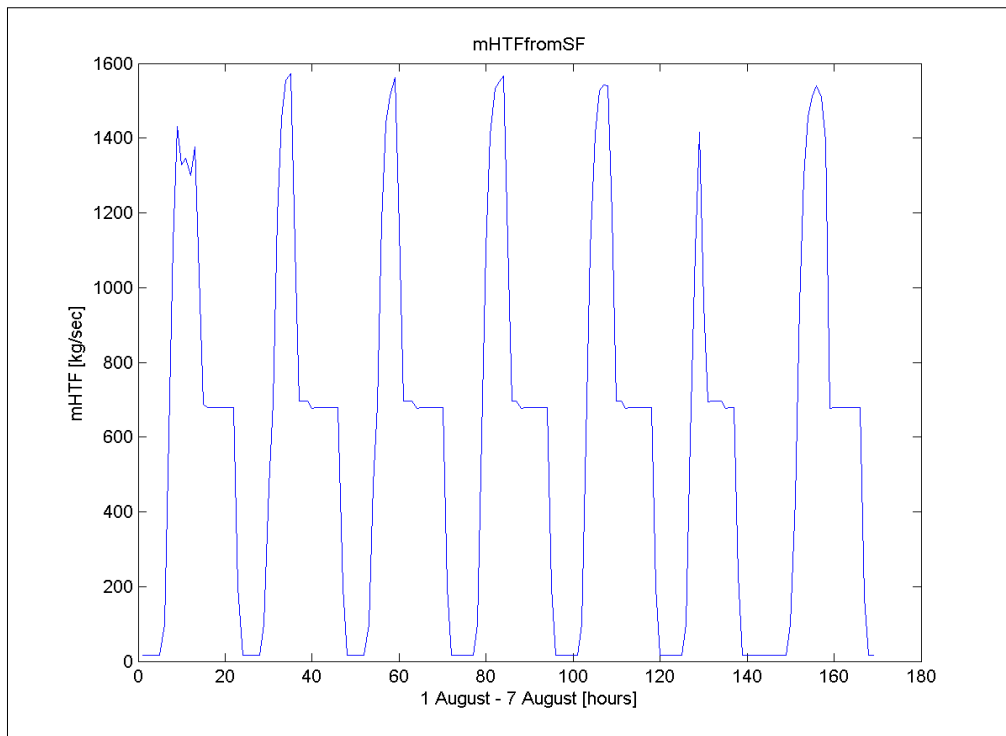


Γράφημα 5.7 Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης



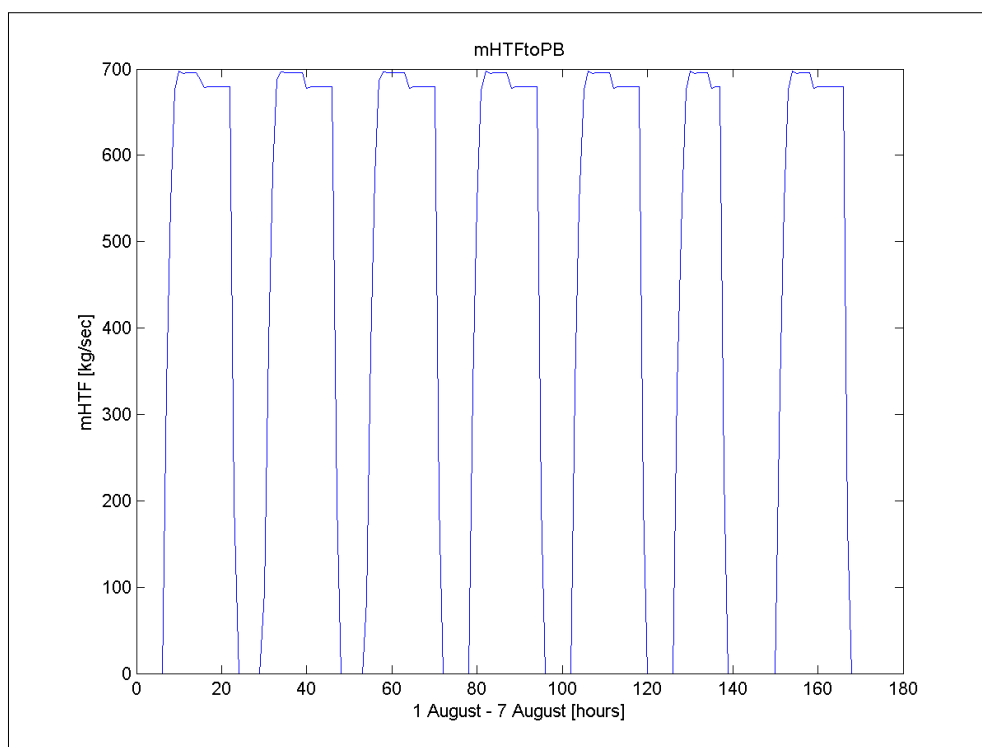
Γράφημα 5.8 Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα

Στα επόμενα τρία γραφήματα απεικονίζονται η ροή μάζας λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο (mHTFfromSF), η ροή μάζας λαδιού που εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας του κύκλου ισχύος (mHTFtoPB) και η ροή μάζας λαδιού που εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας της αποθήκης (mHTFtoStorage).

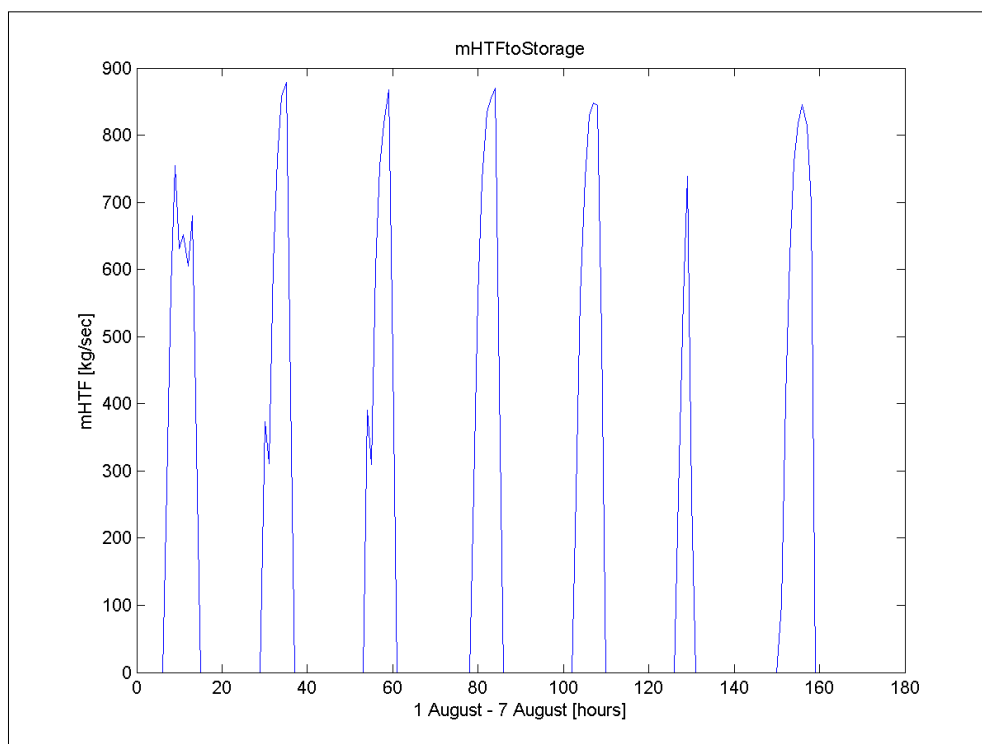


Γράφημα 5.9 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



Γράφημα 5.10 Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος

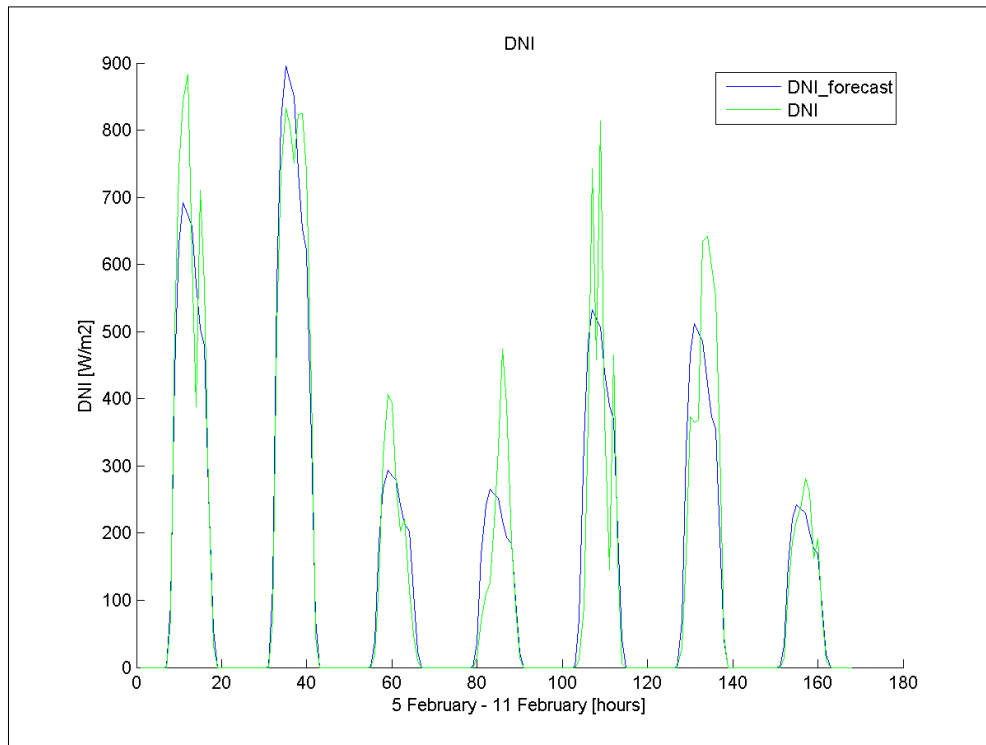


Γράφημα 5.11 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης

### 5.2.2 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 5 -11 Φεβρουαρίου

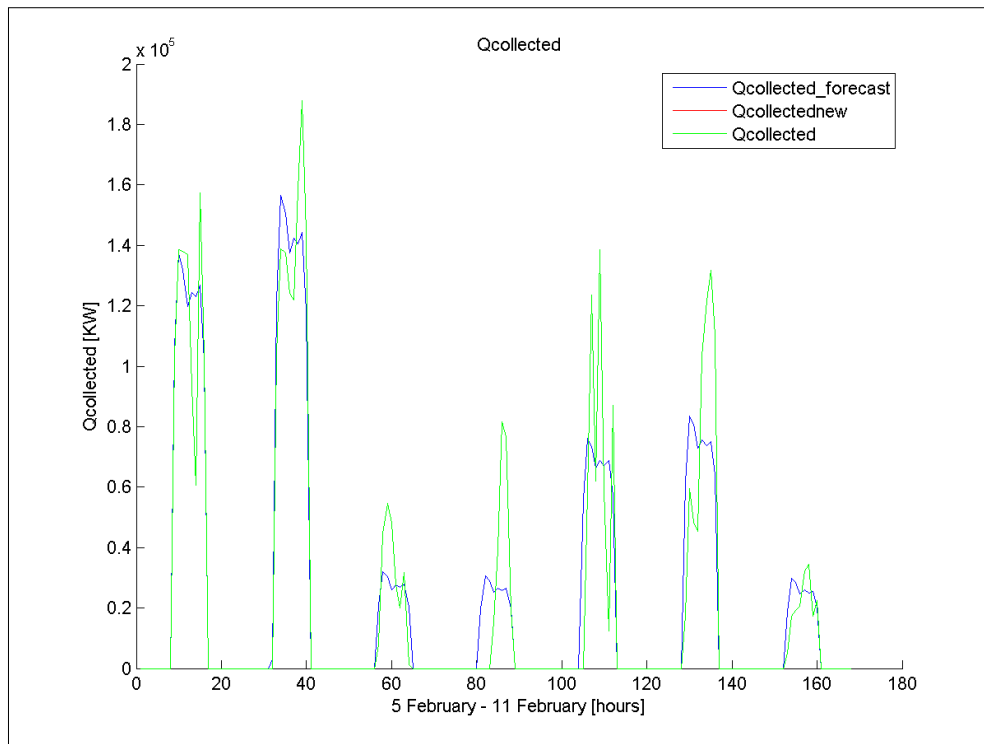
Μετά την προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για μία καλοκαιρινή εβδομάδα ακολουθεί εκείνη της χειμωνιάτικης. Η χειμωνιάτικη εβδομάδα θα είναι από τις 5 έως τις 11 Φεβρουαρίου.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν είναι όμοια με αυτά που περιγράφηκαν στην υποενότητα 5.2.1, αναφερόμενα όμως σε μία χειμωνιάτικη εβδομάδα.

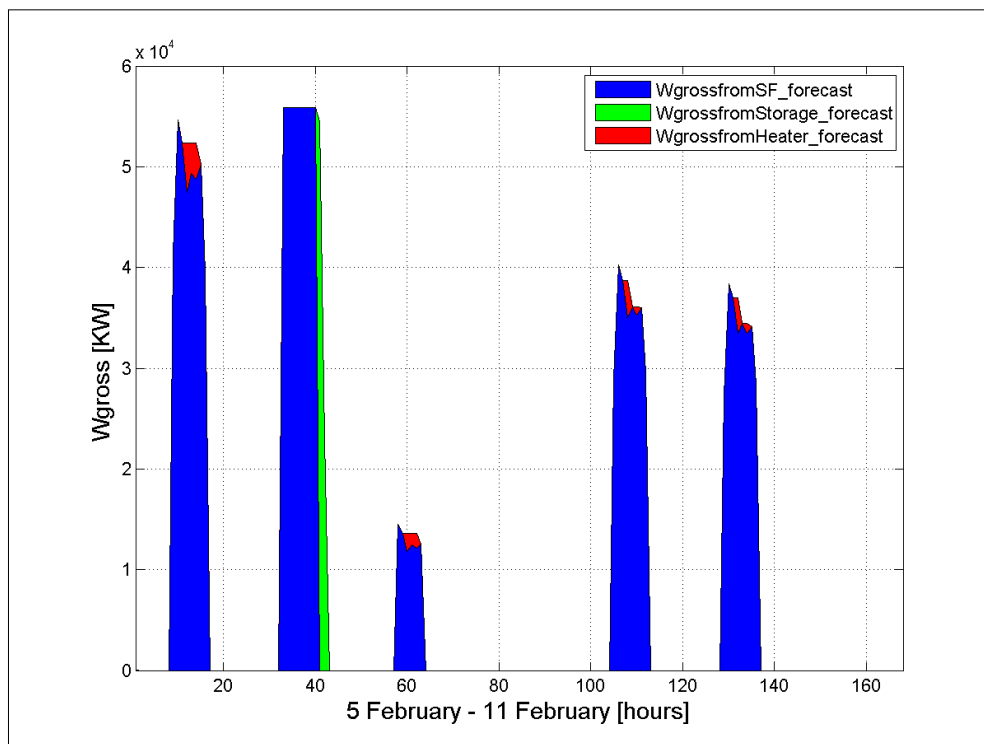


Γράφημα 5.12 Αναπαράσταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας



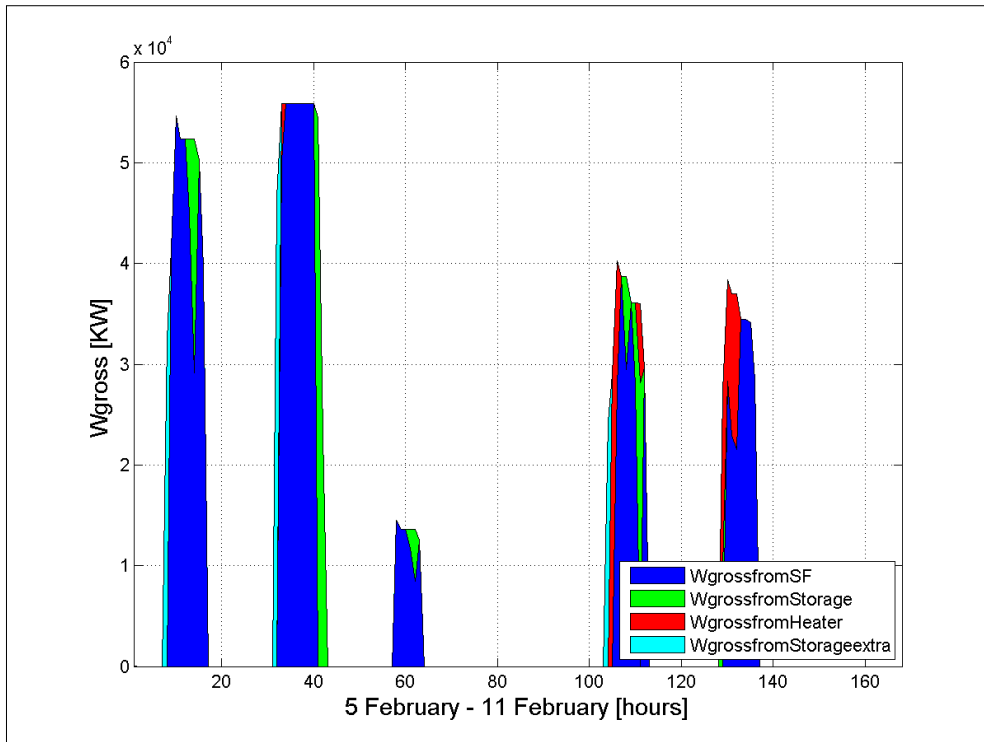


Γράφημα 5.13 Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο

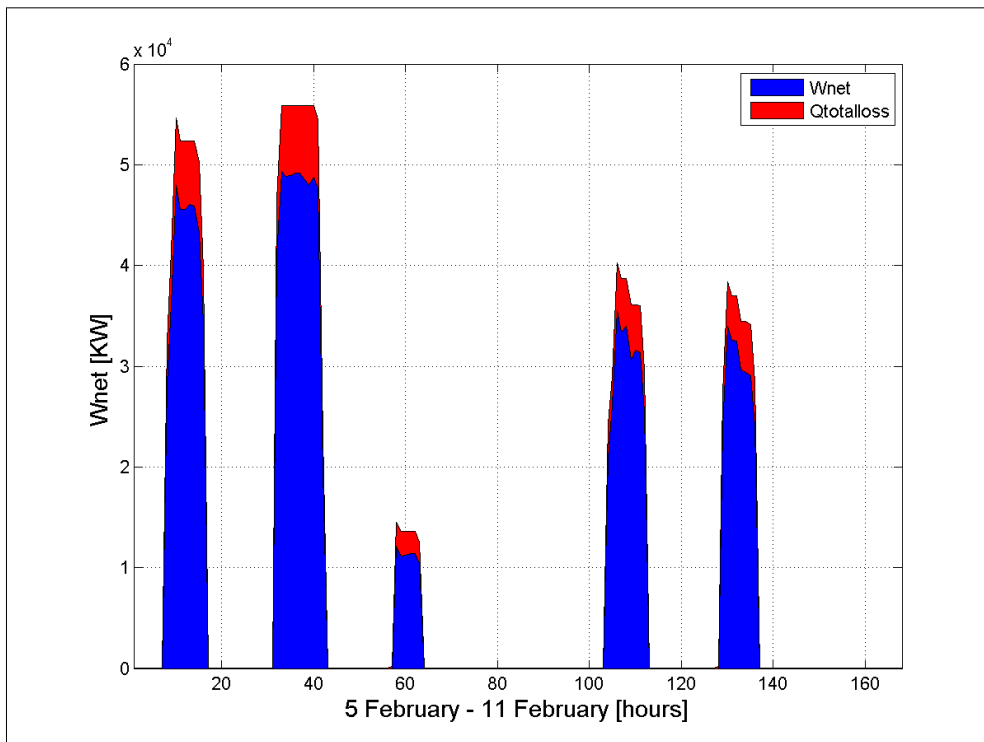


Γράφημα 5.14 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία

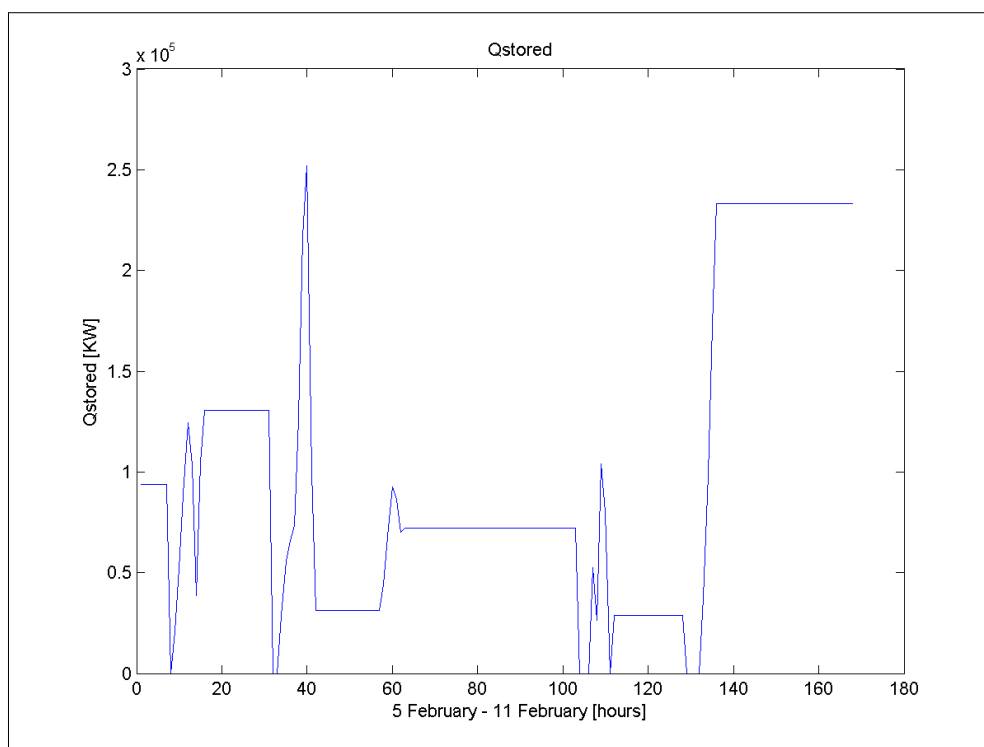
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



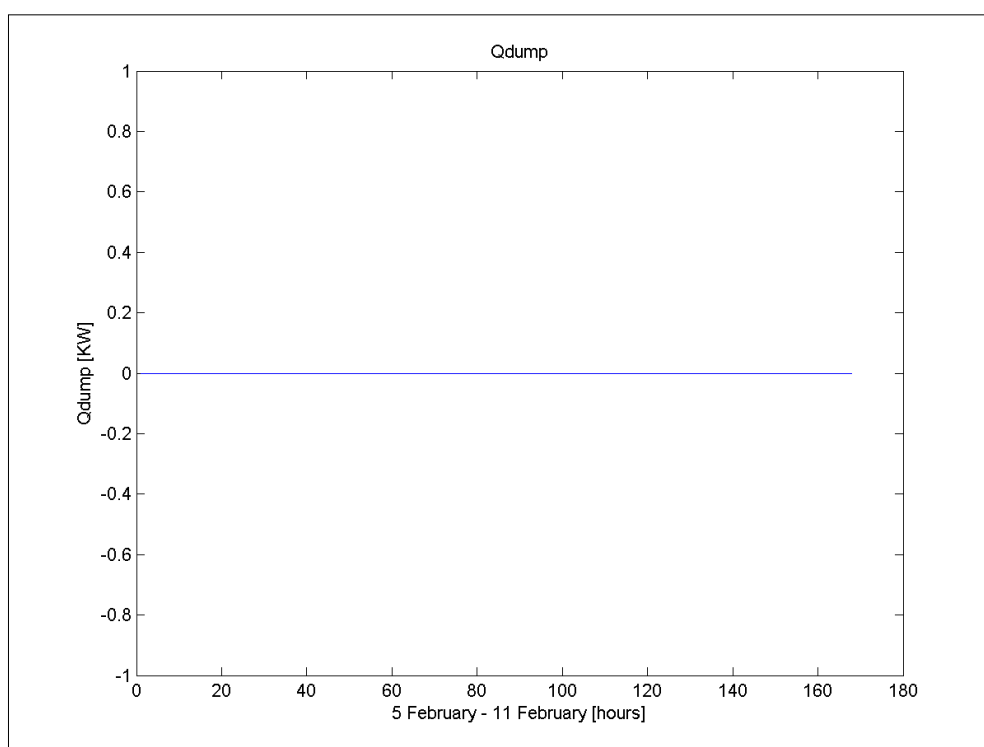
Γράφημα 5.15 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία



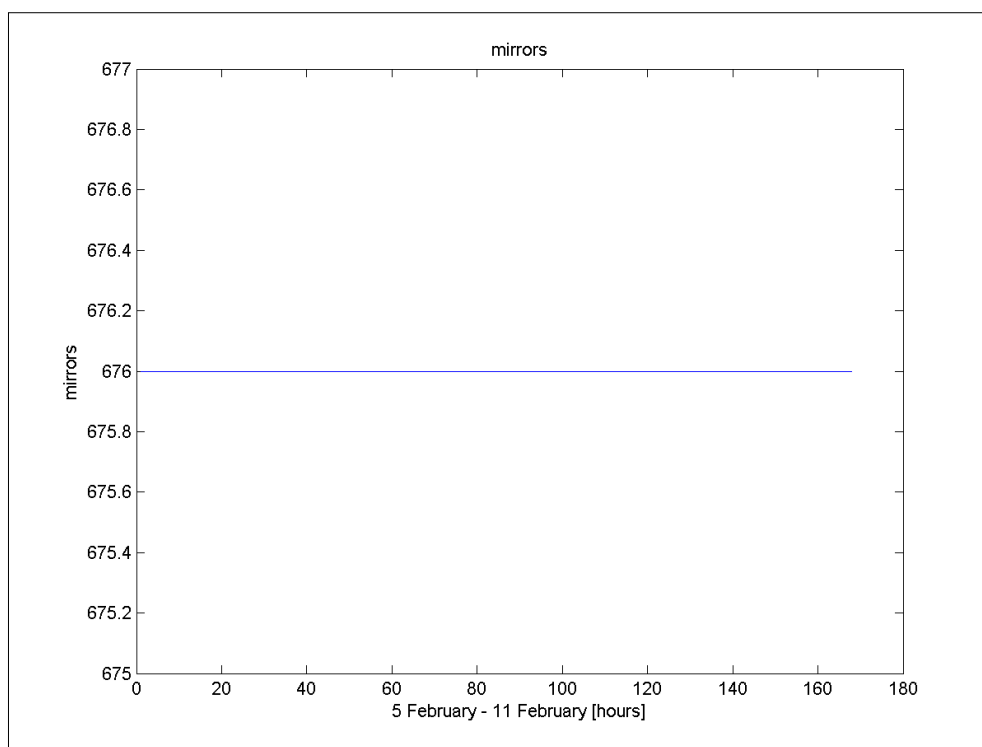
Γράφημα 5.16 Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία



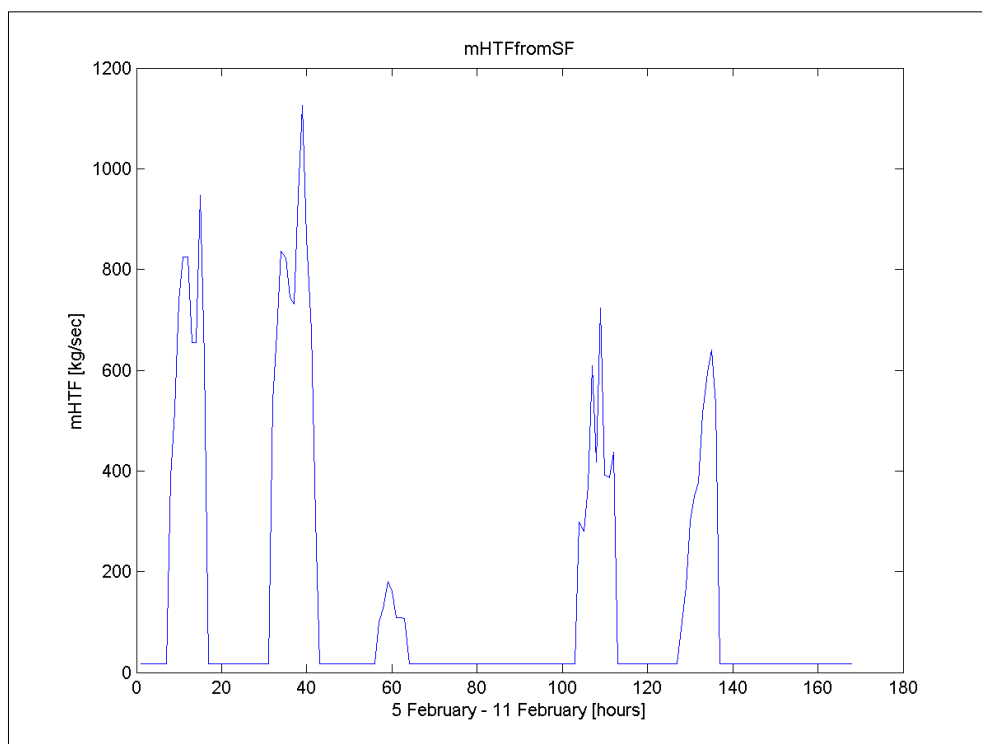
Γράφημα 5.17 Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης



Γράφημα 5.18 Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης

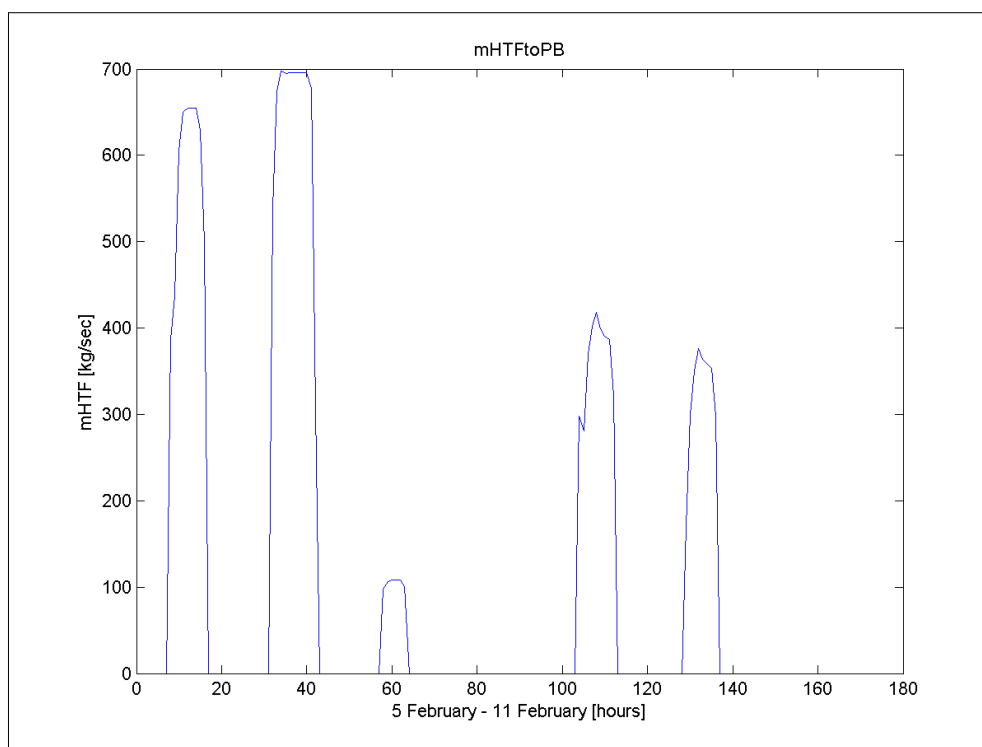


Γράφημα 5.19 Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα

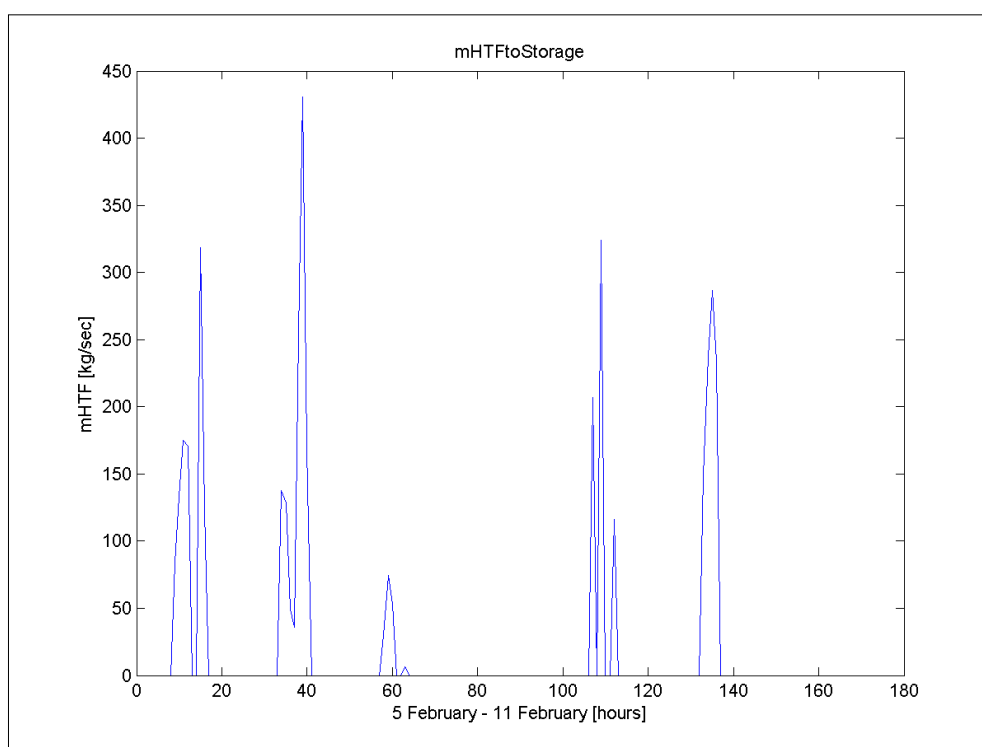


Γράφημα 5.20 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



Γράφημα 5.21 Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος



Γράφημα 5.22 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης

### 5.3 «Πολιτική» λειτουργίας του Σταθμού με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

Στην ενότητα 5.1 εξετάστηκε η πολιτική λειτουργίας του σταθμού όταν αυτός λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας του σταθμού όταν αυτός λειτουργεί με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος.

Γενικά, ο τρόπος σκέψης είναι ίδιος με αυτόν που υιοθετήθηκε όταν ο σταθμός λειτουργούσε χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Αρχικά, γίνεται πάλι μία πρόβλεψη της Ηλιακής ακτινοβολίας για την επόμενη ημέρα. Στη συνέχεια, με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία, γίνεται εκτίμηση της ενέργειας που θα παράγει ο σταθμός την επόμενη ημέρα όπως ακριβώς και στην ενότητα 5.1 με την μόνη διαφορά ότι ο σταθμός μέχρι τις 18:00 το απόγευμα επιτρέπεται να δίνει στο δίκτυο μέχρι το 50% της ονομαστικής του ισχύος. Από τις 18:00 και μετά μπορεί να λειτουργεί στις ονομαστικές του τιμές, εφ' όσον έχει αυτή τη δυνατότητα.

Συγκεντρωτικά, από το πρωί μέχρι τις 18:00 το απόγευμα ο σταθμός επιτρέπεται να δίνει στο δίκτυο ενέργεια με άνω φράγμα το 50% της ονομαστικής ισχύος του και κάτω φράγμα το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού, που είναι ίσο με το 20% της ονομαστικής του ισχύος. Από τις 18:00 και μετά ο σταθμός μπορεί να δίνει στο δίκτυο μέχρι και την ονομαστική του ενέργεια.

Από εκεί και έπειτα, ο σταθμός θα λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση που δεν υπήρχαν περιορισμοί διείσδυσης ισχύος. Με βάση την πραγματική ακτινοβολία, θα καλείται να δώσει στο δίκτυο την ενέργεια που είχε προβλεφτεί να δώσει με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία. Για να γίνει αυτό ακολουθούνται οι ίδιοι χειρισμοί με αυτούς που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.1. Ακόμη, αν στο τέλος της ημέρας, και ενώ ο σταθμός έχει ανταποκριθεί στο πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας βάσει της προβλεπόμενης ακτινοβολίας, έχει περισσέψει ενέργεια στην αποθήκη που είναι μεγαλύτερη από το 20% της ονομαστικής τότε ο σταθμός χρησιμοποιεί την ενέργεια αυτή προκειμένου να ξεκινήσει τη λειτουργία του μία ώρα νωρίτερα την επομένη το πρωί.

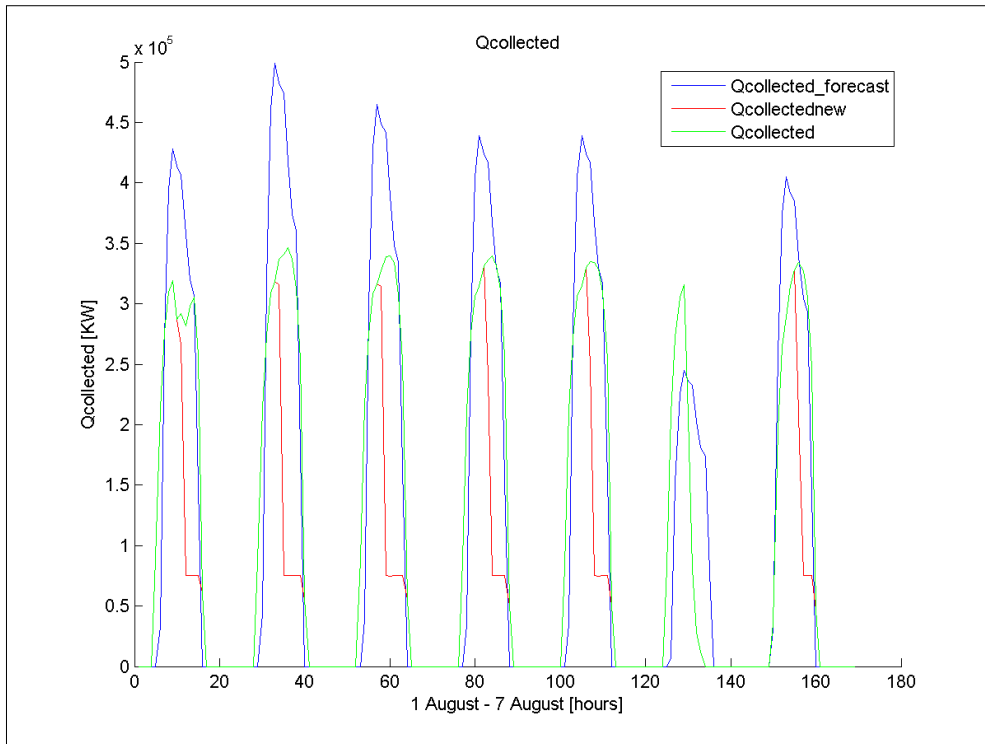
### 5.4 Προσομοίωση λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού (με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος)

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί η προσομοίωση της λειτουργίας του σταθμού, όταν αυτός λειτουργεί με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Ο σταθμός που θα εξεταστεί, έχει ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτόν που περιγράφηκε στον πίνακα 5.1.

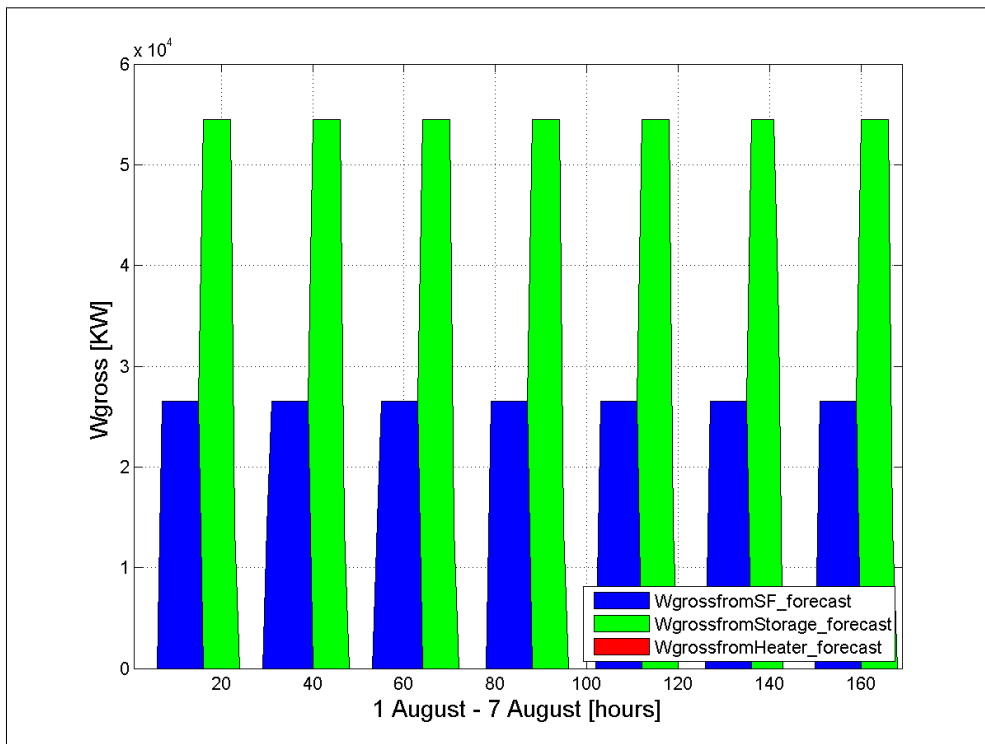
#### 5.4.1 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 1 – 7 Αυγούστου

Η καλοκαιρινή εβδομάδα, και σε αυτή την περίπτωση, θα είναι από τις 1 έως τις 7 Αυγούστου ώστε να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των δύο πολιτικών λειτουργίας του σταθμού. Τα γραφήματα που εξηγούν τον τρόπο λειτουργίας του σταθμού είναι όμοια με εκείνα της υποενότητας 5.2.1. Προφανώς οι ακτινοβολίες, τόσο η προβλεπόμενη όσο και η πραγματική, είναι ίδιες με αυτές που φαίνονται στο γράφημα 5.1 οπότε δεν χρειάζεται να ξαναπαρουσιαστούν και εδώ.

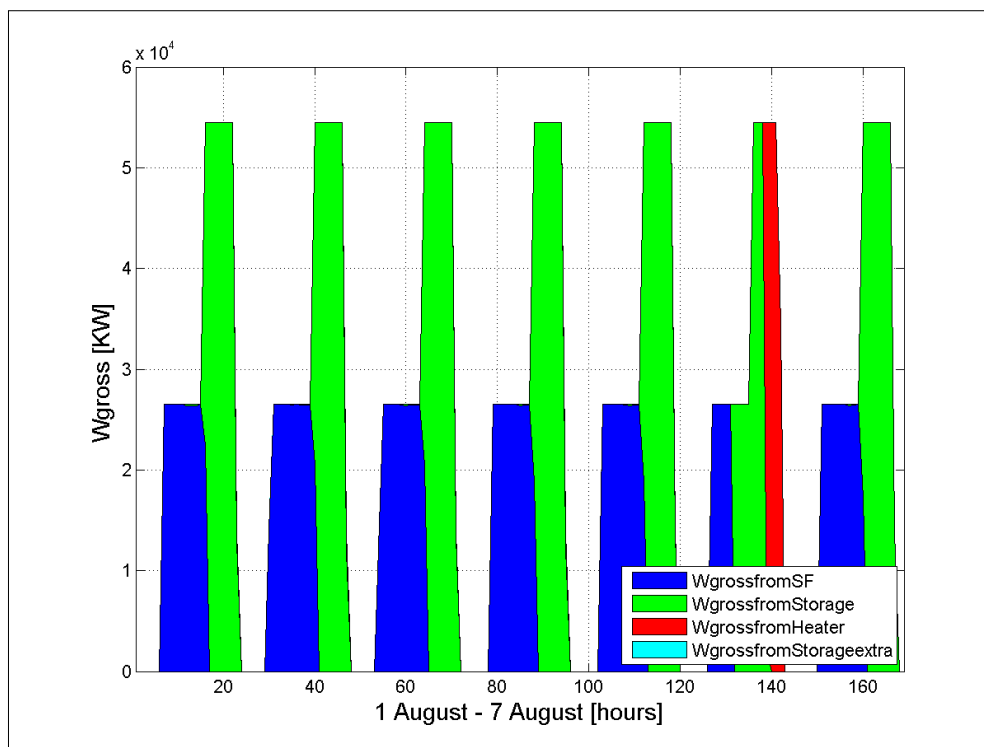
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



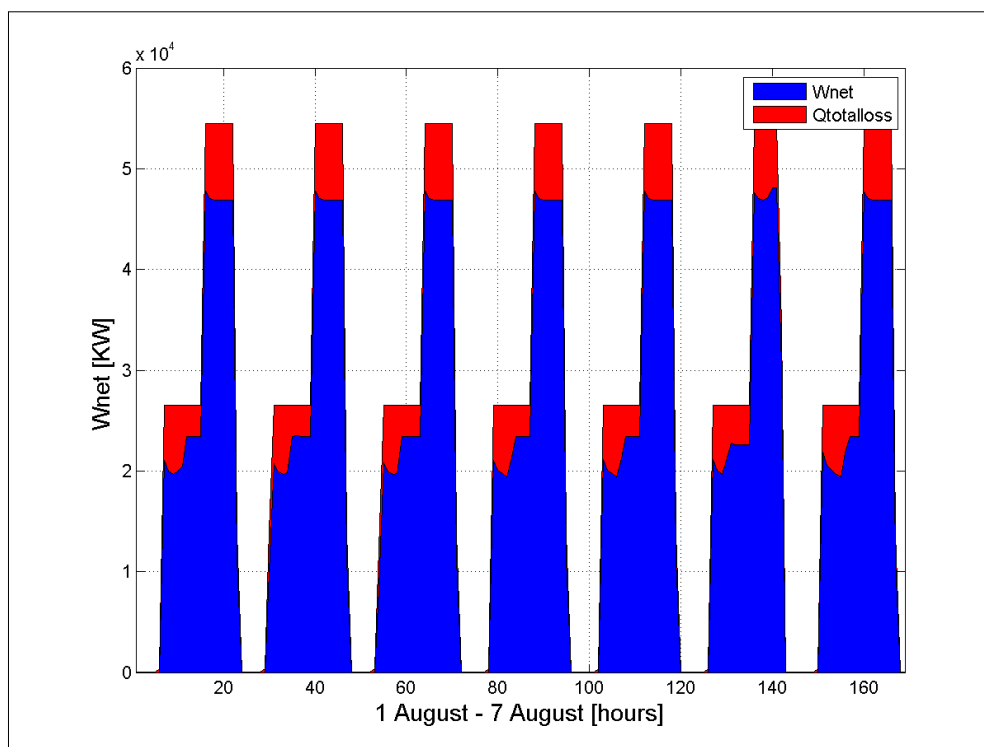
Γράφημα 5.23 Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο



Γράφημα 5.24 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία

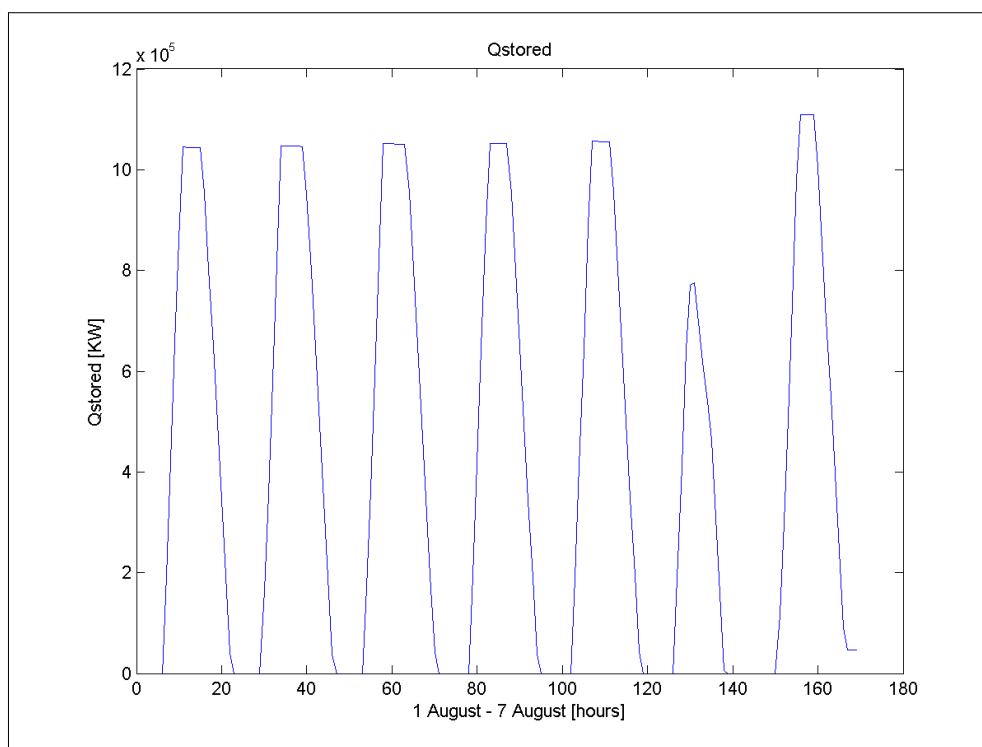


Γράφημα 5.25 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία

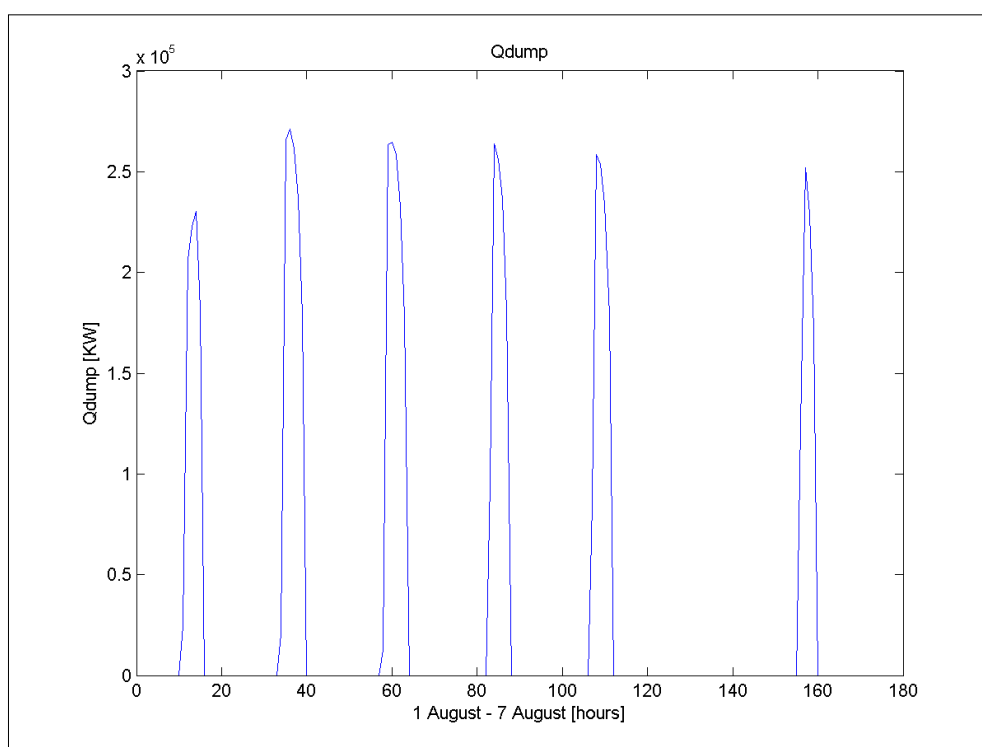


Γράφημα 5.26 Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία

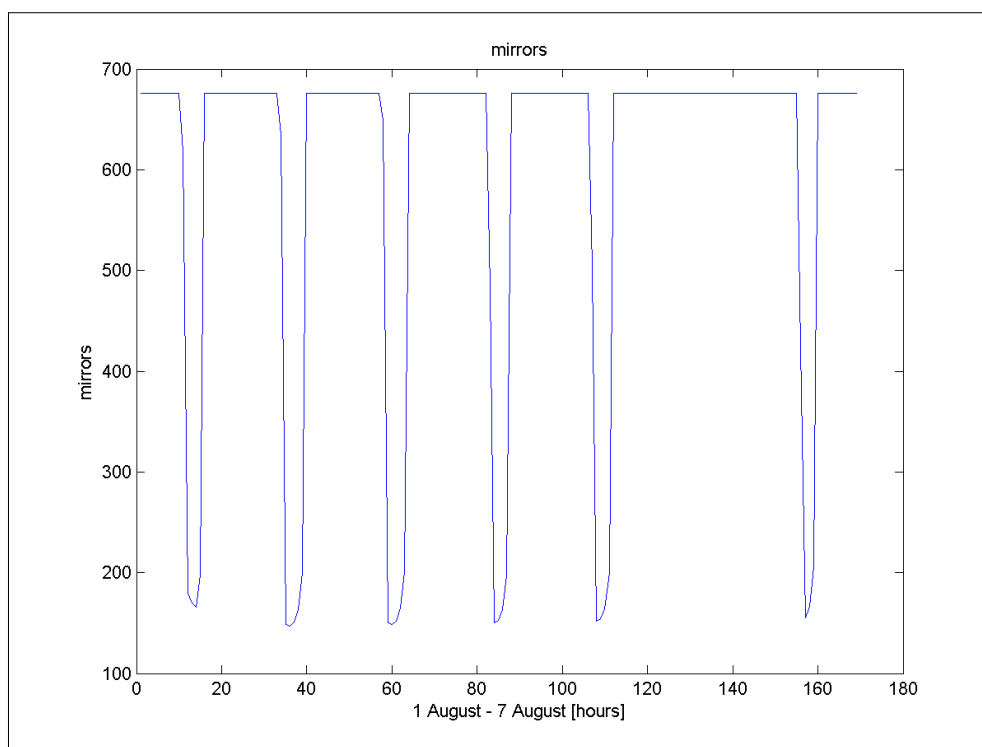




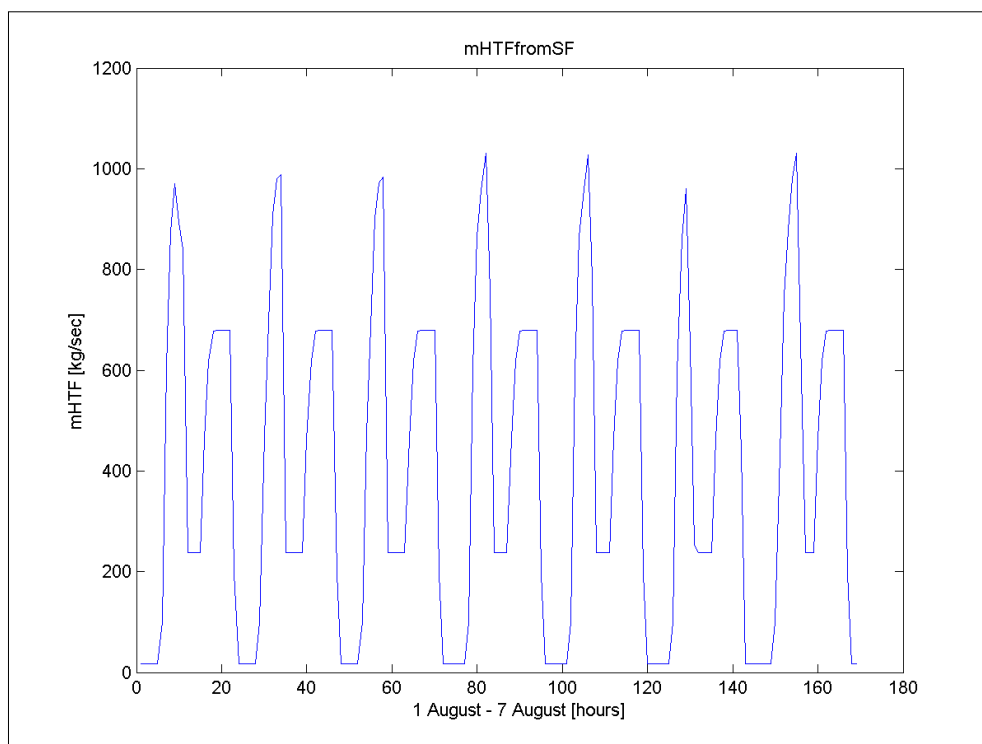
Γράφημα 5.27 Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης



Γράφημα 5.28 Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης

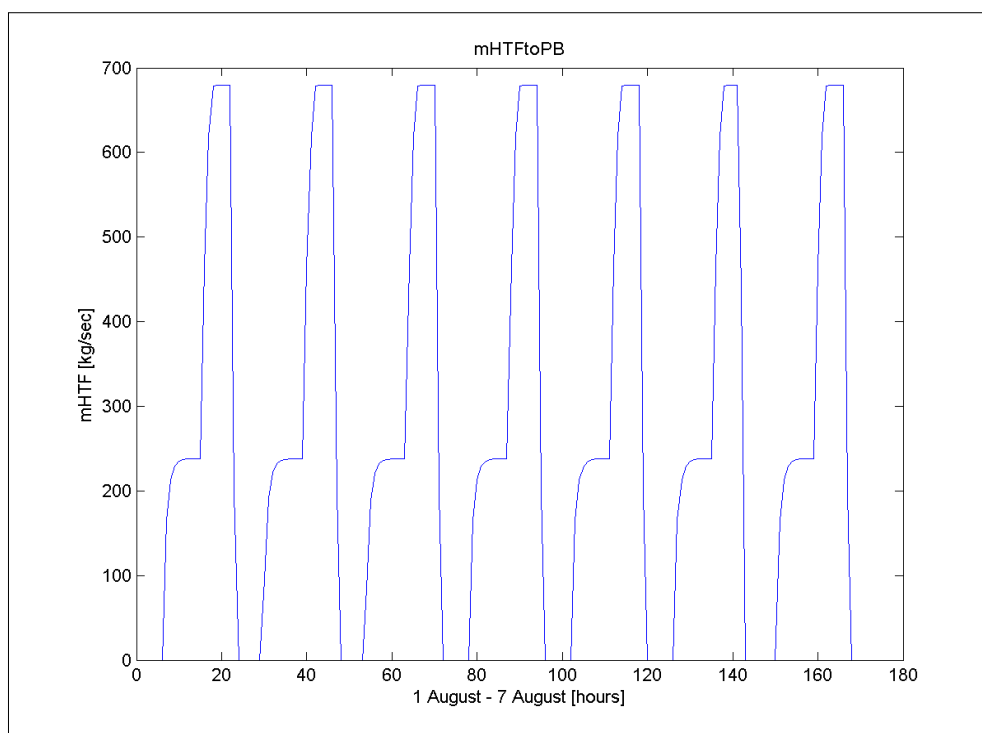


Γράφημα 5.29 Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα

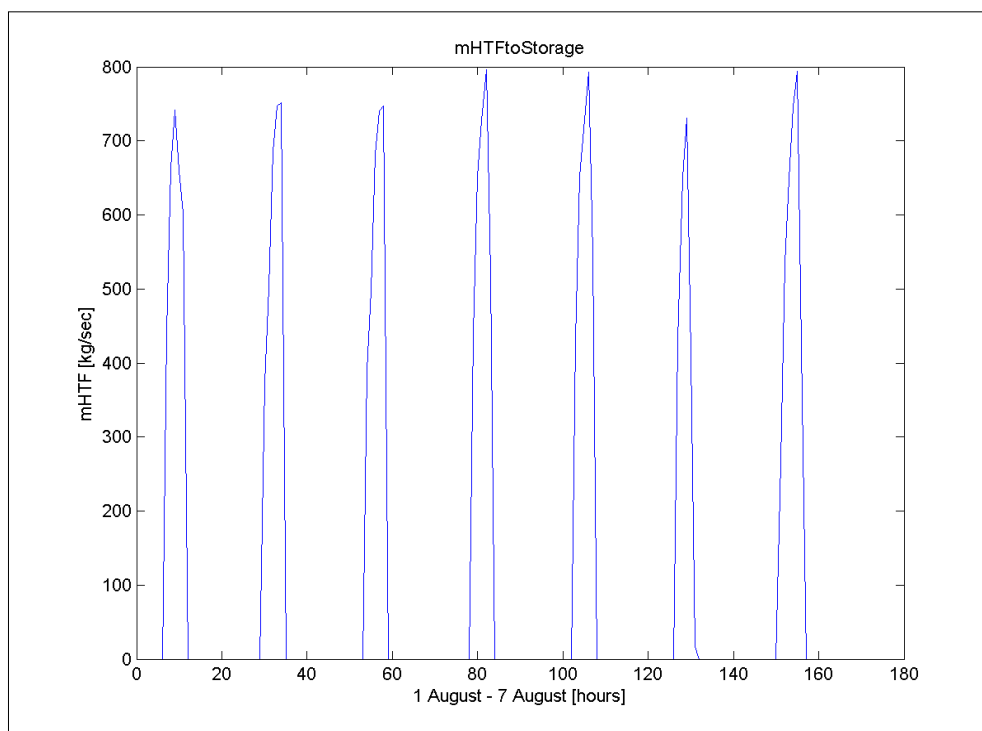


Γράφημα 5.30 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



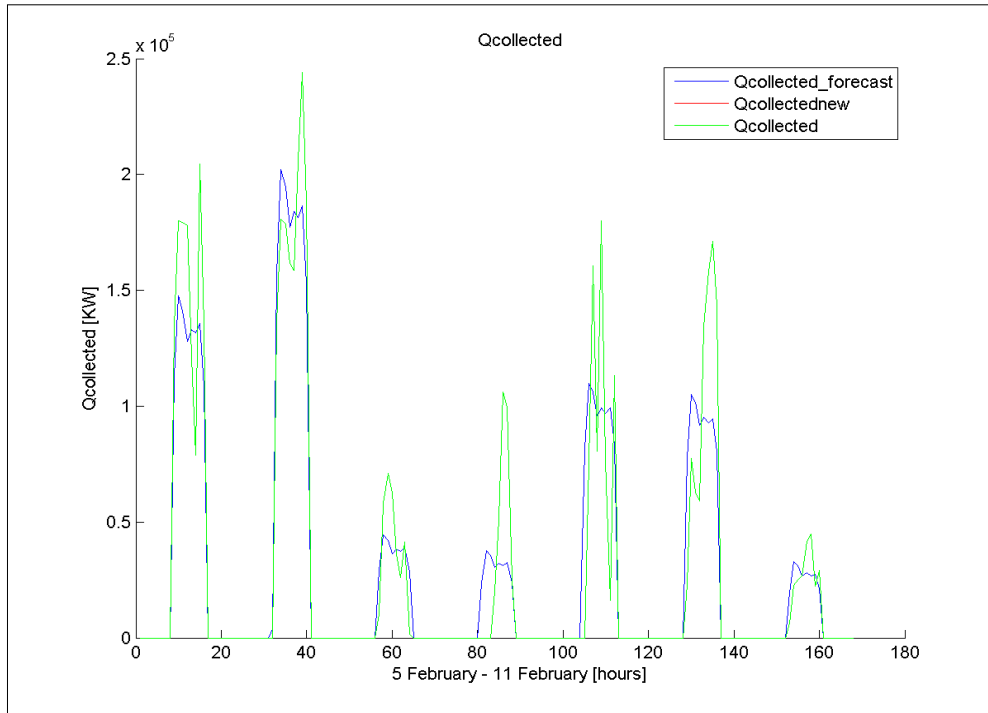
Γράφημα 5.31 Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος



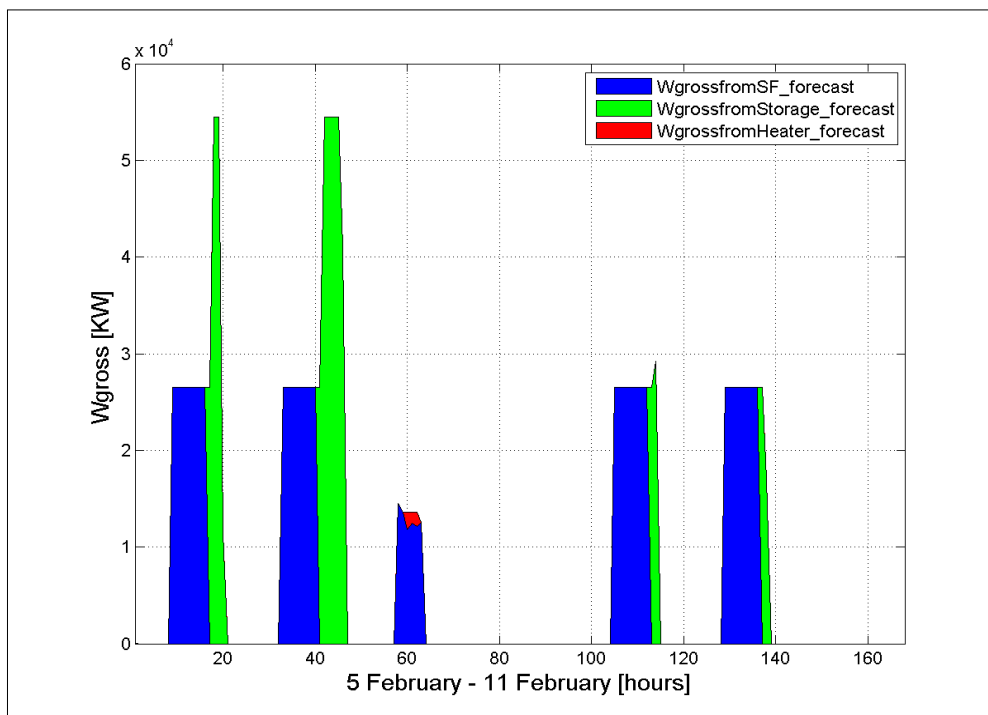
Γράφημα 5.32 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης

### 5.4.2 Προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού για την εβδομάδα 5 – 11 Φεβρουαρίου

Με την ίδια λογική, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα για την εβδομάδα 5 – 11 Φεβρουαρίου όταν ο σταθμός λειτουργεί με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος.

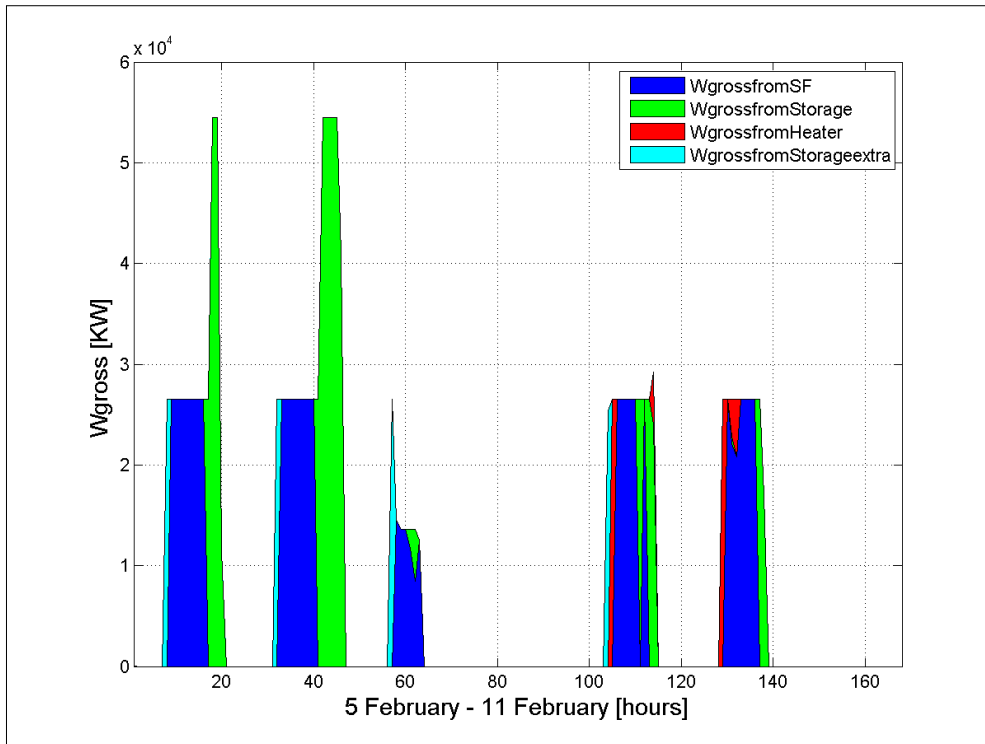


Γράφημα 5.33 Αναπαράσταση της συλλεγόμενης Θερμικής Ισχύος από το Ηλιακό Πεδίο

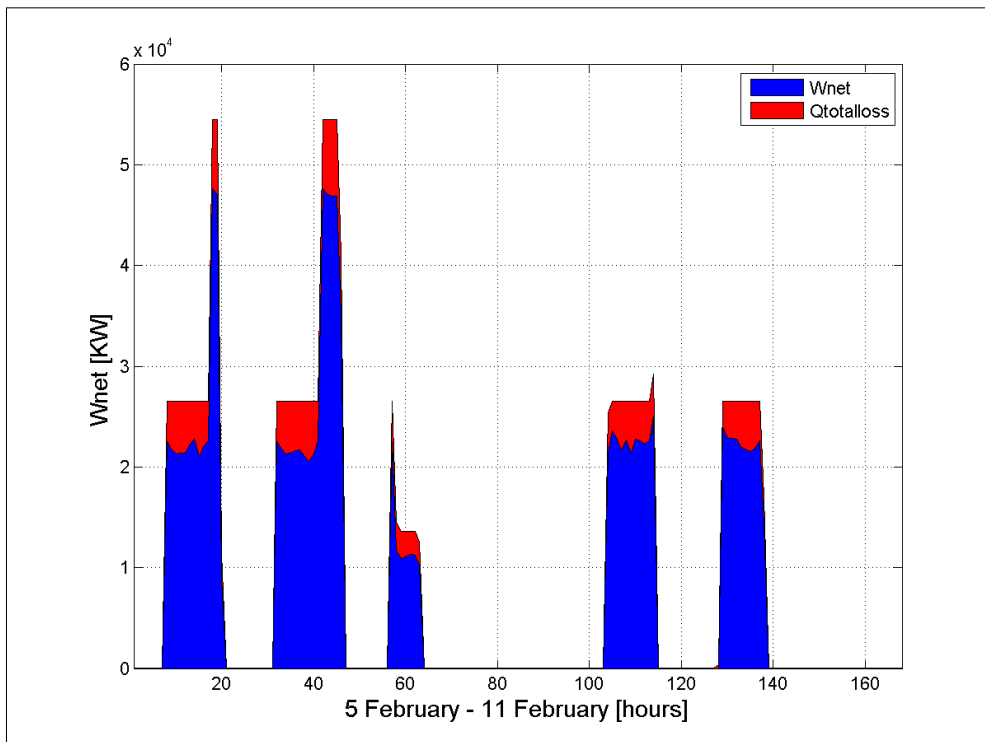


Γράφημα 5.34 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την προβλεπόμενη ακτινοβολία

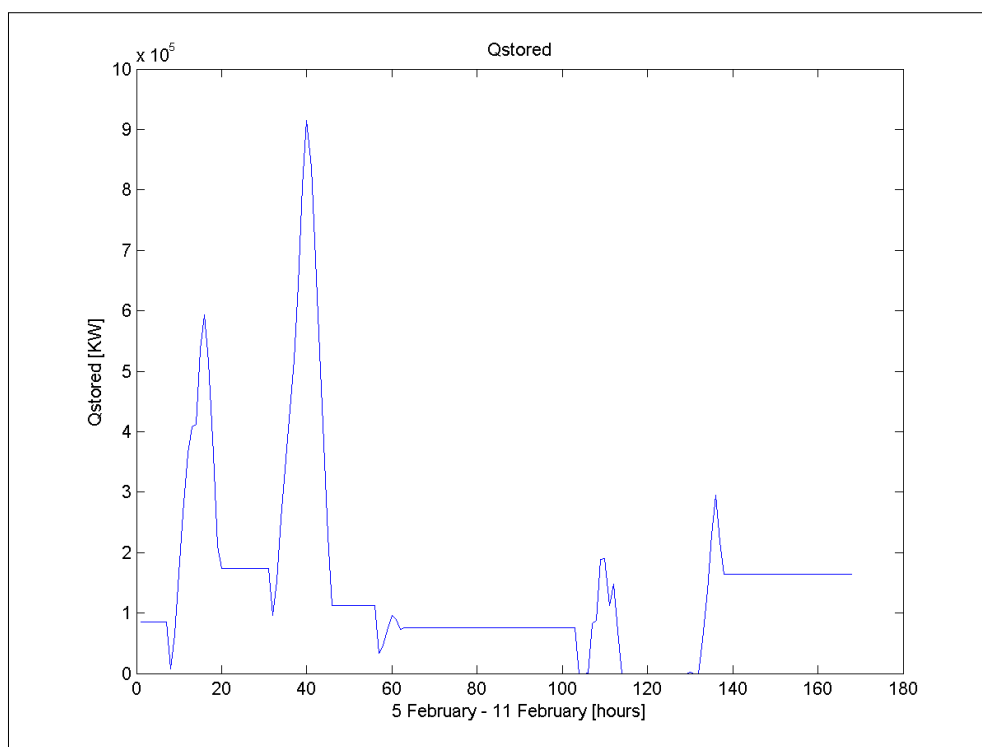
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



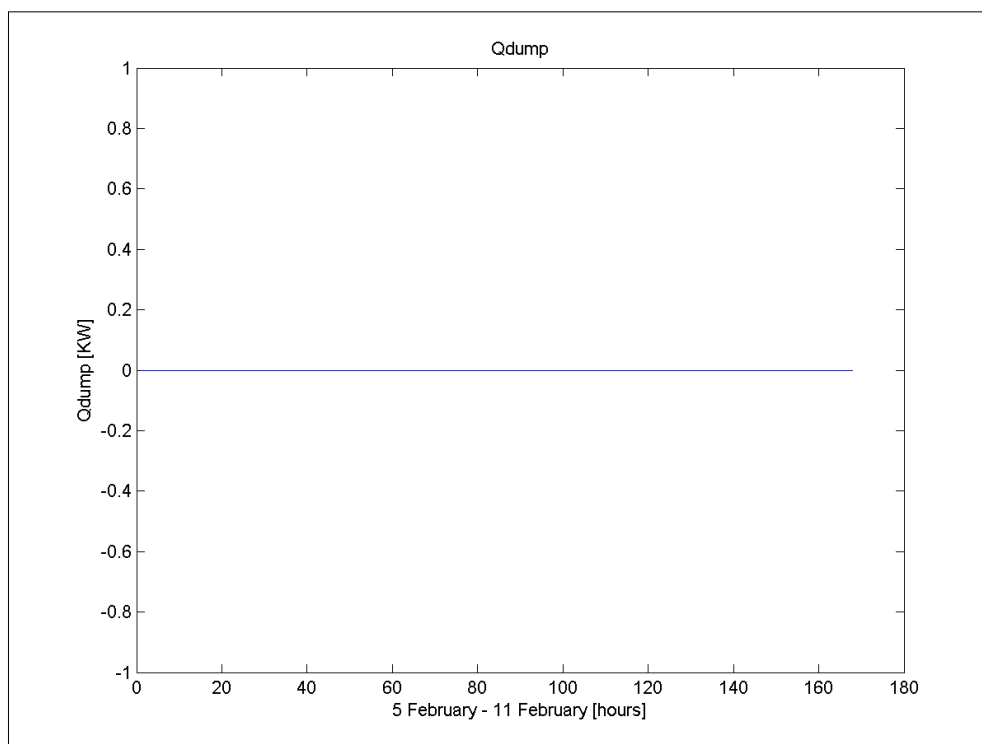
Γράφημα 5.35 Αναπαράσταση της παραγόμενης Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία



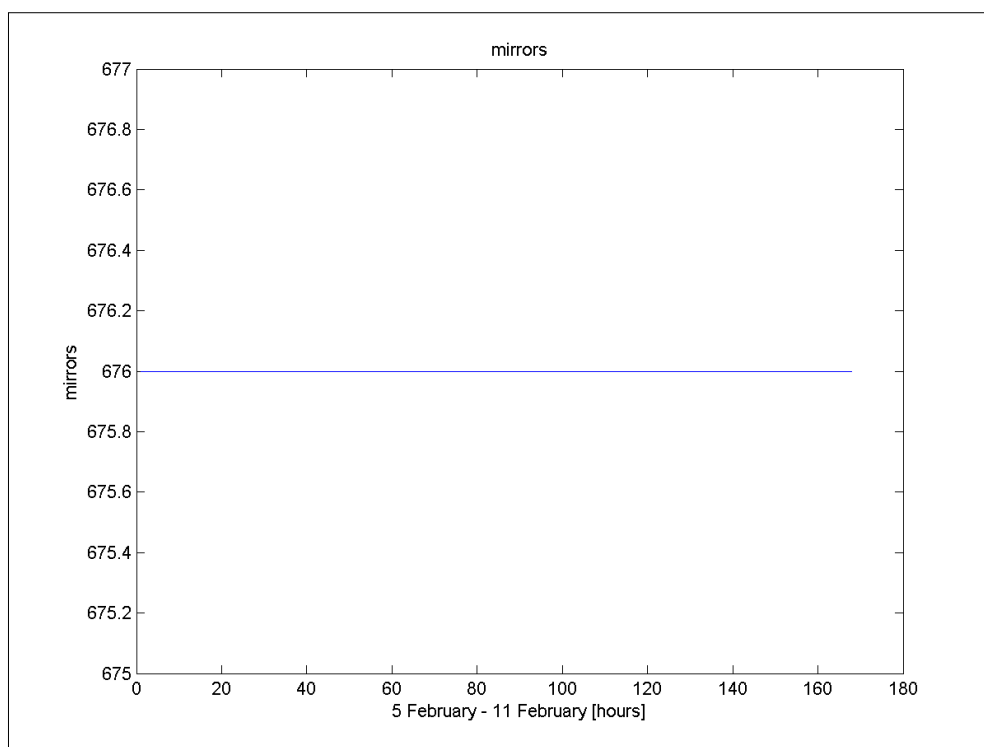
Γράφημα 5.36 Αναπαράσταση της παραγόμενης καθαρής Ενέργειας με βάση την πραγματική ακτινοβολία



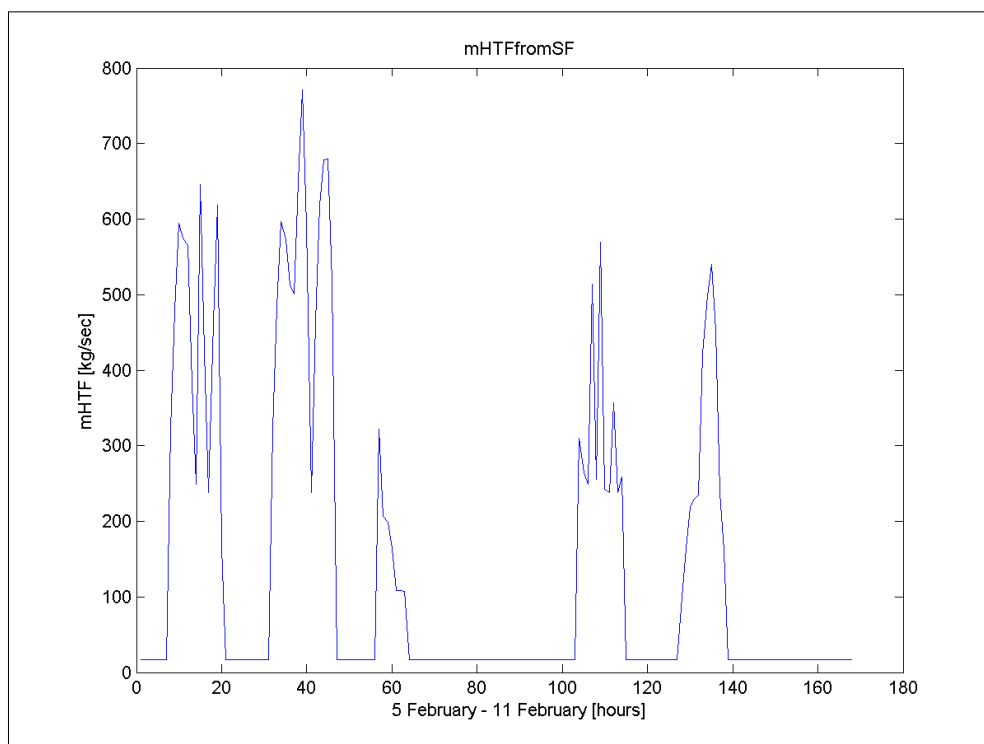
Γράφημα 5.37 Αναπαράσταση της κατάστασης της αποθήκης



Γράφημα 5.38 Αναπαράσταση της ενέργειας που απορρίπτεται λόγω πληρότητας της αποθήκης

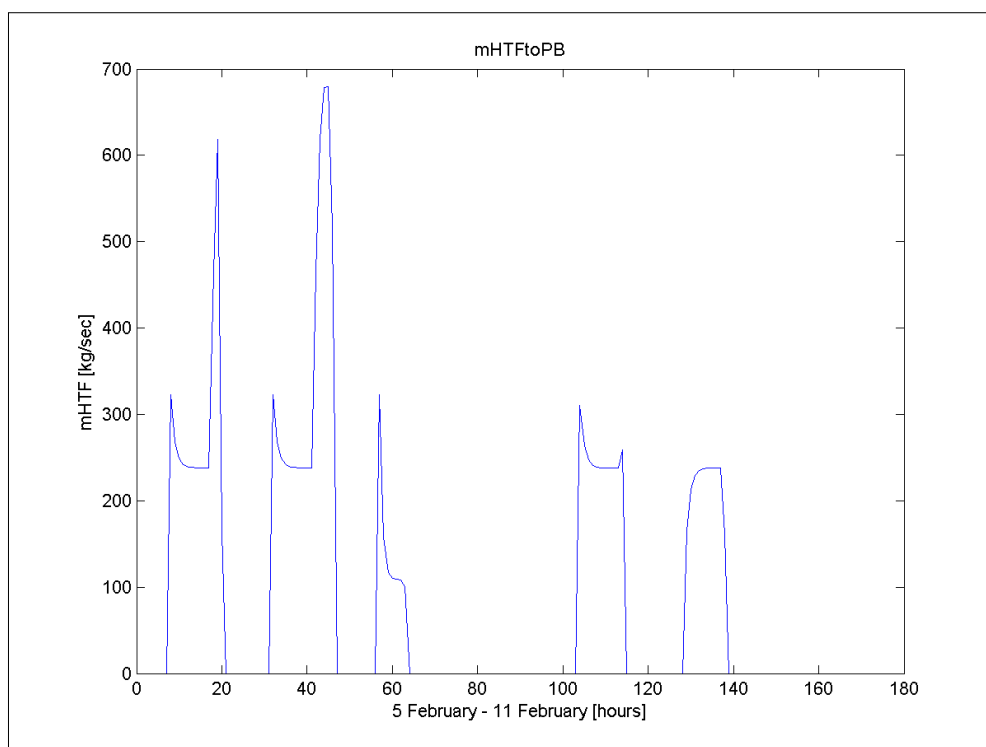


Γράφημα 5.39 Αναπαράσταση των καθρεφτών που λειτουργούν ανά ώρα

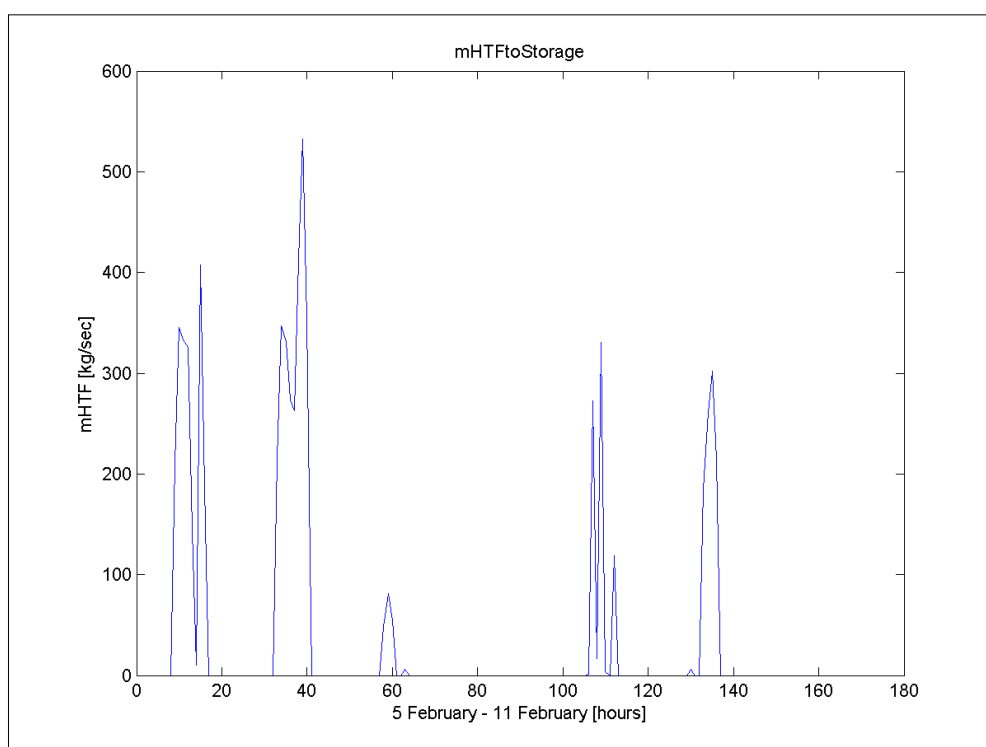


Γράφημα 5.40 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που εξέρχεται από το Ηλιακό Πεδίο

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Προσομοίωση λειτουργίας ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής



Γράφημα 5.41 Αναπαράσταση της Ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος



Γράφημα 5.42 Αναπαράσταση της ροής μάζας του λαδιού που κατευθύνεται στον εναλλάκτη της αποθήκης



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

---

### Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

Στο Κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα γίνει μια εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους και ανάλυση του τρόπου λειτουργίας τους. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν οι αλγόριθμοι αυτοί για να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του Ηλιοθερμικού σταθμού ως προς τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) της επένδυσης. Αυτή η βελτιστοποίηση, θα πραγματοποιηθεί αφ' ενός για σταθερή έκταση γης και αφ' ετέρου για σταθερή ονομαστική ισχύς του σταθμού. Τέλος, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν καθώς και σχολιασμός αυτών.

#### 6.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι (Γ.Α.) ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών και αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικό πρόβλημα. Είναι χρήσιμοι σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους/διαστάσεις και δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος που να μπορεί να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές ώστε το υπό εξέταση σύστημα να αντιδρά με όσο το δυνατόν με το θεμιτό τρόπο.

##### 6.1.1 Εισαγωγή

Η πρώτη εμφάνιση των Γ.Α. χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της Βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γ.Α. είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που απαντώνται στη φύση. Ας πάρουμε, για παράδειγμα, τους λαγούς και τον τρόπο που αναπαράγονται και εξελίσσονται από γενιά σε γενιά. Έστω ότι αρχίζουμε να παρατηρούμε ένα συγκεκριμένο πληθυσμό από λαγούς σε ένα οικοσύστημα. Όπως είναι φυσικό, κάποιοι από αυτούς θα είναι πιο γρήγοροι και πιο εύστροφοι από άλλους. Αυτοί οι

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

λαγοί έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιβιώσουν στο φυσικό τους περιβάλλον (δηλαδή να εξασφαλίζουν τροφή και να ξεφεύγουν από τα διάφορα αρπακτικά που τους καταδιώκουν) από ότι κάποιοι πιο αργοί ή λιγότερο έξυπνοι λαγοί. Φυσικά δεν είναι λίγοι οι αργοί ή οι λιγότερο έξυπνοι λαγοί που καταφέρνουν να επιβιώνουν εξαιτίας της τύχης ή άλλων παραγόντων. Όλοι αυτοί οι λαγοί, που καταφέρνουν να επιβιώσουν, θα αρχίσουν την παραγωγή της επόμενης γενιάς τους, μιας γενιάς που θα συνδυάζει με διάφορους τρόπους όλα τα χαρακτηριστικά των μελών της προηγούμενης. Έτσι, μερικοί λαγοί θα αναμειχθούν με κάποιους γρήγορους, κάποιοι γρήγοροι με άλλους γρήγορους, κάποιοι εύστροφοι λαγοί με κάποιους μη εύστροφους και ούτω καθεξής, δημιουργώντας έτσι σταδιακά έναν πληθυσμό που απαρτίζεται από λαγούς που κατά μέσο όρο είναι έξυπνότεροι και ταχύτεροι από τους προγόνους τους. Ευτυχώς όμως, για τη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας, και τα αρπακτικά υφίστανται την ίδια διαδικασία εξέλιξης από γενιά σε γενιά, διαφορετικά οι λαγοί θα γίνονταν υπερβολικά γρήγοροι και έξυπνοι για να μπορούν να τους πιάσουν.

Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενότυπους (genotypes) μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Στους Γ.Α. αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος που καλούνται loci. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα των μαλλιών) έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται alleles (τιμές του χαρακτηριστικού γνωρίσματος).

Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το «αποκωδικοποιημένο» περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype) (π.χ. ένας ζωντανός οργανισμός είναι ο φαινότυπος των χρωμοσωμάτων του). Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε ένα πληθυσμό αντιστοιχεί σε ένα εκτενές ψάξιμο στο χώρο των πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και της διατήρησης των καλύτερων λύσεων, και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος.

Οι Γ.Α. διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, του προβλήματος που μας ενδιαφέρει, πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Έτσι ένας Γ.Α. πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μία προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά «καλές» λύσεις αναπαράγονται ενώ οι σχετικά «κακές» απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός.

### 6.1.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση Γ.Α. για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής:[31]

- 1) Μπορούν να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α. είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από Γ.Α. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους Γ.Α. δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- 2) Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι Γ.Α. προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδιάσή τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.
- 3) Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Οι Γ.Α. δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των Γ.Α. που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά αναγκαίες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- 4) Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των Γ.Α. είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος Γ.Α. με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των Γ.Α.
- 5) Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, Γ.Α. μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
- 6) Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις συναρτήσεις» κ.τ.λ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους Γ.Α. πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- 7) Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη επικοινωνία του Γ.Α. με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από την σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους Γ.Α. Όπου όμως δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

- 8) Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Οι Γ.Α. σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως  $O(n^3)$ , δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- 9) Είναι μια μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα με το hill-climbing γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι Γ.Α. επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.
- 10) Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι Γ.Α. μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.

### 6.1.3 Μειονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων

Εκτός από τα πολλά πλεονεκτήματα, οι Γ.Α. εμφανίζουν και ορισμένα μειονεκτήματα που ίσως θα μπορούσαν να σταθούν εμπόδιο στην εξάπλωσή τους. Αυτά είναι τα εξής:[31]

- 1) Προβλήματα εξοικείωσης με τη Γενετική. Για τους περισσότερους, που ασχολούνται με την Επιστήμη των Υπολογιστών, οι έννοιες της Εξέλιξης και της Φυσικής Επιλογής μπορεί να μην ηχούν παράξενα, αλλά δεν είναι και από τις πιο οικείες. Η Βιολογία δεν έχει άμεση σχέση με τους υπολογιστές, γι' αυτό και οι γνώσεις σχεδόν όλων είναι σε πολύ γενικό επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, δεν απαιτούνται γνώσεις Γενετικής και Βιολογίας. Εκείνο που συμβαίνει με τους Γ.Α. είναι ότι μιμούνται με αφαιρετικό τρόπο κάποιες διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση, χωρίς να ενδιαφέρει σε μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας η λειτουργία τους και χωρίς να είναι απαραίτητο το γνωστικό υπόβαθρο που έχουν οι βιολόγοι για να μελετήσουν αυτά τα φαινόμενα. Οι όροι είναι δανεισμένοι από τη Βιολογία με σκοπό την καλύτερη εισαγωγή και κατανόηση του θέματος και όχι την παραπομπή του μελετητή στα άγνωστα πεδία μιας ξένης επιστήμης και, τελικά, τη σύγχυσή του. Θα μπορούσε ίσως να παραλειφθεί η αναφορά στη Γενετική και να γίνει μια παρουσίαση των Γ.Α. ως «προσωπικές διαδικασίες για αναζήτηση και βελτιστοποίηση», αυτό όμως μάλλον θα έκανε τα πράγματα δυσκολότερα. Εξάλλου, είναι συνηθισμένο το φαινόμενο, θεωρίες που είναι δανεισμένες από άλλες επιστήμες να διατηρούν την αυθεντική τους ορολογία (π.χ. στα Νευρωνικά δίκτυα: νευρώνες, συνάψεις, κ.τ.λ.). Επιπλέον, το μέλλον και η εξέλιξη των Γ.Α. δεν εξαρτώνται σε καμία περίπτωση από τις αντίστοιχες θεωρίες της Βιολογίας. Το αρχικό μοντέλο είναι δανεισμένο από εκεί, όμως η εφαρμογή του στα Τεχνητά Συστήματα έγινε με πλήθος διαφοροποιήσεων, προσαρμοσέων και παρεκτροπών με στόχο πάντα την βελτίωση της απόδοσης.

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

Πλέον, μπορούμε να μιλάμε για εξέλιξη και απογόνους των πρώτων Γ.Α. και για μια πορεία τους στο χρόνο που είναι ανεξάρτητη και αυτοδύναμη.

- 2) Το πρόβλημα του χρόνου. Στη φύση ως γνωστό, η εξέλιξη λειτουργεί με ρυθμούς πολύ αργούς. Χρειάζονται να περάσουν χιλιάδες γενιές, άρα και αρκετός χρόνος, για να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά των ειδών και να διαφοροποιηθούν οι ικανότητες και η συμπεριφορά τους. Θέτουν έτσι ορισμένοι το ερώτημα: πως είναι δυνατόν ένα μοντέλο αναζήτησης λύσεων να έχει καλές επιδόσεις χρόνου, όταν είναι εμπνευσμένο από μια φυσική διαδικασία που εξελίσσεται με ρυθμούς απίστευτα αργούς; Η απάντηση εδώ είναι απλή. Κατ' αρχήν, ακόμη και στη φύση, η εξέλιξη δεν είναι από μόνη της μια αργή διαδικασία. Εξέλιξη των ειδών συμβαίνει όταν αλλάζει το περιβάλλον τους και πρέπει να προσαρμοστούν στα καινούργια δεδομένα, ώστε να επιβιώσουν. Αλλαγές όμως του περιβάλλοντος γίνονται με πολύ αργούς ρυθμούς και κατά συνεπεία και η εξέλιξη ακολουθεί αυτούς τους ρυθμούς. Αν οι αλλαγές του περιβάλλοντος γίνονται με γρηγορότερο τρόπο, τότε επιταχύνεται και η εξέλιξη. Αυτό άλλωστε παρατηρείται και στα βιολογικά εργαστήρια, όπου μικροοργανισμοί αλλάζουν τη συμπεριφορά τους αμέσως, όταν τοποθετούνται σε νέες συνθήκες. Επιπλέον, στο πεδίο των υπολογιστών τα άτομα κωδικοποιούνται συνήθως ως συμβολοσειρές και οι συνθήκες του περιβάλλοντος μοντελοποιούνται με απλές μαθηματικές σχέσεις. Έτσι, το μοντέλο με το οποίο δουλεύει ο υπολογιστής δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο υπολογιστικό φόρτο, συγκρινόμενο πάντα με αντίστοιχες μεθόδους. Το πλήθος των ατόμων που κάθε φορά εξετάζεται είναι από λίγες δεκάδες έως μερικές χιλιάδες, δηλαδή αρκετές τάξεις μεγέθους κάτω από το πλήθος των γονιδίων των χρωμοσωμάτων μιας έμβιας οντότητας. Ο ρυθμός που μπορούν να ζευγαρώνουν τα άτομα στους πιο γρήγορους υπολογιστές μπορεί να φτάσει το ένα εκατομμύριο ανά δευτερόλεπτο. Όσο μεγάλος και αν είναι ο χώρος που καλείται ο αλγόριθμος να ψάξει, η επεξεργασία μερικών μόνο ατόμων αρκεί, γιατί, όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω, τα άτομα αυτά θεωρούνται αντιπρόσωποι ολόκληρων κλάσεων. Έτσι λοιπόν, οι ταχύτητες που μπορούν να επιτύχουν οι Γ.Α. είναι πολύ υψηλές.

### 6.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά των Γενετικών Αλγορίθμων

Όπως αναφέρθηκε, οι Γ.Α. πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης από τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει, διότι διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Τα κυριότερα νέα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν, αλλά και τους δίνουν υπεροχή, είναι τα εξής:

- 1) Οι Γ.Α. δουλεύουν με μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος. Για παράδειγμα, αναφέρεται το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης: Έστω ένα μαύρο κουτί με πέντε δυαδικούς διακόπτες (on - off). Για κάθε συνδυασμό  $s$  των διακοπών παράγεται μία έξοδος  $f(s)$ . Ζητείται ο συνδυασμός των διακοπών που μεγιστοποιεί την έξοδο. Με τις παραδοσιακές μεθόδους, το μέγιστο θα εντοπιζόταν με «παίξιμο» των διακοπών πηγαίνοντας από συνδυασμό σε συνδυασμό με ψάξιμο στα τυφλά, καθ' ότι δεν είναι γνωστός ο τύπος της συνάρτησης. Σε ένα Γ.Α. όμως, η πρώτη ενέργεια είναι η κωδικοποίηση των διακοπών ως συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους. Μια απλή κωδικοποίηση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας μια δυαδική συμβολοσειρά μήκους



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

πέντε, όπου η κάθε θέση αναπαριστά ένα διακόπτη. Το 0 αντιστοιχεί στη θέση off και το 1 στη θέση on. Δηλαδή, η συμβολοσειρά 11110 κωδικοποιεί τον συνδυασμό κατά τον οποίο οι τέσσερις πρώτοι διακόπτες είναι on και ο τελευταίος off. Η κωδικοποίηση δεν είναι απαραίτητο να είναι πάντα δυαδική. Όπως θα φανεί και αργότερα, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, αρκετοί από τους οποίους ίσως και να μην είναι προφανείς. Το στοιχείο της κωδικοποίησης, όπως εξηγείται παρακάτω, είναι εκείνο που επιτρέπει τους Γ.Α. να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.

- 2) Οι Γ.Α. κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Αυτό το βήμα προς βήμα έχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μία περιοχή τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι Γ.Α. εξαλείφουν αυτό τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές). Έτσι μπορούν να «ανεβαίνουν» πολλούς λόφους (hill-climbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μια λάθος κορυφή. Γυρίζοντας στο παράδειγμα με το μαύρο κουτί, οι κλασικές μέθοδοι θα ξεκινούσαν το ψάξιμο από ένα συνδυασμό των διακοπών και στη συνέχεια, εφαρμόζοντας κάποιο κανόνα μετάβασης, θα δοκίμαζαν τον επόμενο (ψάξιμο δηλαδή σημείο προς σημείο). Αντιθέτως, ένας Γ.Α. αρχίζει το ψάξιμο του από ένα πληθυσμό συνδυασμών συμβολοσειρών και κατόπιν παράγει διαδοχικά καινούργιους. Ένας αρχικός πληθυσμός θα μπορούσε να είναι, π.χ. 01101, 11000, 01000 και 10011. Έπειτα, «τρέχοντας» ο αλγόριθμος δημιουργεί νέους πληθυσμούς που συγκλίνουν προς την επιθυμητή λύση. Διαλέγοντας ένα πληθυσμό που να καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- 3) Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία. Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους Γ.Α. Το ψάξιμό του είναι κατά κάποιο τρόπο «τυφλό». Αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση πράγμα που τους προσδίδει μεγάλη ευελιξία. Έτσι όμως, προκύπτει το ερώτημα αν συμφέρει να αγνοούνται οι βοηθητικές πληροφορίες. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο έχουν αναπτυχθεί μορφές Γ.Α. που αξιοποιούν και τέτοιου είδους πληροφορίες (Knowledge-Based Genetic Algorithms).
- 4) Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς. Η χρήση πιθανοτικών κανόνων μετάβασης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των Γ.Α., χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στη τύχη. Δε λαμβάνονται αποφάσεις με το «στρίψιμο ενός νομίσματος». Το στοιχείο της τύχης χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

Τα τέσσερα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά συμβάλουν αποφασιστικά ώστε να έχουν οι Γ.Α. την πολυπόθητη ιδιότητα της ευρωστίας.

### 6.1.5 Βασικά στοιχεία των Γενετικών Αλγορίθμων

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός απλού Γ.Α. μέσα από την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης [32], [33], [34]. Έστω ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να επιλυθεί είναι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης  $f$  – στην περίπτωση τώρα που υπάρχει ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης  $f$ , αυτό μπορεί να μετασχηματιστεί σε πρόβλημα μεγιστοποίησης της συνάρτησης  $g = -f$ . Επιπλέον, θεωρείται ως σύμβαση ότι η αντικειμενική συνάρτηση  $f$  παίρνει μόνο θετικές τιμές - διαφορετικά μπορεί να εισαχθεί μια θετική σταθερά  $c$ , έτσι ώστε:

$$\max g(x) = \max\{f(x) + c\}$$

Έστω, λοιπόν, ότι πρέπει να μεγιστοποιηθεί μία συνάρτηση  $k$  μεταβλητών,  $f(x_1, \dots, x_k): R^k \rightarrow R$ . Κάθε μεταβλητή  $x_i$  παίρνει τιμές στο διάστημα  $D_i = [a_i, b_i] \subseteq R$  και  $f(x_1, \dots, x_k) > 0, \forall x_i \in D_i, i=1, \dots, k$ . Ακόμα, είναι επιθυμητό η βελτιστοποίηση της  $f$  να γίνει με κάποια απαιτούμενη ακρίβεια  $q$  δεκαδικών ψηφίων για κάθε μεταβλητή.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του γενετικού αλγορίθμου είναι η γενετική αναπαράσταση των υποψηφίων λύσεων, η οποία στο συγκεκριμένο πρόβλημα θα είναι η δυαδική. Για να επιτευχθεί η ζητούμενη ακρίβεια, θα πρέπει κάθε διάστημα τιμών  $D_i = [a_i, b_i]$  να διαχωριστεί σε  $(b_i - a_i) * 10^q$  ίσα υποδιαστήματα. Έστω  $m_i$  ο μικρότερος ακέραιος για τον οποίο ισχύει  $(b_i - a_i) * 10^q \leq 2^{m_i} - 1$ . Τότε η αναπαράσταση των μεταβλητών σαν δυαδικές συμβολοσειρές μήκους  $m_i$  ικανοποιεί την απαίτηση για ακρίβεια  $q$  δεκαδικών ψηφίων. Η ακόλουθη σχέση μετατρέπει κάθε τέτοια δυαδική συμβολοσειρά  $bin\_str$  στον αντίστοιχο πραγματικό αριθμό:

$$x_i = a_i + decimal(bin\_str) * \frac{b_i - a_i}{2^{m_i} - 1} \quad (6.1)$$

όπου η  $decimal(bin\_str)$  επιστρέφει την αντίστοιχη δεκαδική τιμή για το δυαδικό αριθμό που περιέχει η  $bin\_str$ .

Κατ' αυτόν τον τρόπο, κάθε χρωμόσωμα αναπαριστάται από μια δυαδική συμβολοσειρά μήκους  $m = \sum_{i=1}^k m_i$ . Τα πρώτα  $m_1$  δυαδικά ψηφία κωδικοποιούν τη μεταβλητή  $x_1$ , δηλαδή το διάστημα  $[a_1, b_1]$ , τα επόμενα  $m_2$  κωδικοποιούν τη  $x_2$  στο διάστημα  $[a_2, b_2]$ , κ.ο.κ.

Τα βασικά βήματα του απλού Γ.Α., που επιλύει το παραπάνω πρόβλημα μεγιστοποίησης είναι τα εξής:

- 1) Δημιουργία, με τυχαίο τρόπο, ενός αρχικού πληθυσμού δυνατών λύσεων (Αρχικοποίηση - Initialization).
- 2) Αξιολόγηση κάθε λύσης χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση  $f$  σαν αντικειμενική συνάρτηση.
- 3) Επιλογή ενός νέου πληθυσμού με βάση την απόδοση κάθε μέλους (δυνατής λύσης) του προηγούμενου πληθυσμού (Επιλογή - Selection).
- 4) Εφαρμογή στον πληθυσμό που προκύπτει μετά τη διαδικασία της επιλογής των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης (Crossover) και της μετάλλαξης (Mutation).
- 5) Με την ολοκλήρωση του προηγούμενου βήματος, έχει δημιουργηθεί η επόμενη γενιά, οπότε επιστρέφει ξανά στο βήμα 2.

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

- 6) Μετά από κάποιο αριθμό γενιών, και αφού καμία βελτίωση δεν παρατηρείται πλέον, ο Γ.Α. τερματίζεται.

Το καλύτερο χρωμόσωμα αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη λύση (πιθανώς καθολικά βέλτιστη). Στη συνέχεια θα περιγράφονται πιο αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου.

### Αρχικοποίηση

Στη φάση της αρχικοποίησης δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός από δυνατές λύσεις. Αυτό γίνεται παράγοντας τυχαία ( $pop\_size \cdot m$ ) δυαδικά ψηφία, όπου  $pop\_size$  είναι το μέγεθος του πληθυσμού που θα επεξεργαστεί ο Γ.Α. Το μέγεθος του πληθυσμού παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του Γ.Α.

### Επιλογή

Για τη διαδικασία επιλογής ενός νέου πληθυσμού χρησιμοποιείται μια ρουλέτα με σχισμές (slotted roulette wheel). Η επιλογή γίνεται με βάση την απόδοση κάθε μέλους (ατόμου – δυνατής λύσης) του πληθυσμού, έτσι όσο καλύτερο είναι κάποιο μέλος τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να επιλεγεί και να περάσει στην επόμενη γενεά. Τα διάφορα μέλη του πληθυσμού τοποθετούνται στη ρουλέτα ανάλογα με την απόδοσή τους (μέλη με μεγάλη απόδοση κατέχουν μεγαλύτερες σχισμές της ρουλέτας).

Η κατασκευή μιας τέτοιας ρουλέτας γίνεται ως εξής:

- Υπολογίζεται η απόδοση  $eval(v_i)$  κάθε μέλους  $v_i$ ,  $i=1, \dots, pop\_size$  του πληθυσμού.
- Υπολογίζεται η συνολική απόδοση του πληθυσμού  $F = \sum_{i=1}^{pop\_size} eval(v_i)$ .
- Υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής  $p_i$  κάθε μέλους  $v_i$ ,  $i=1, \dots, pop\_size$ :  
$$p_i = \frac{eval(v_i)}{F}$$
- Τέλος, υπολογίζεται η αθροιστική (cumulative) πιθανότητα  $q_i$  κάθε μέλους  $v_i$ ,  $i=1, \dots, pop\_size$ :  $q_i = \sum_{j=1}^i p_j$ .

Για την επιλογή των μελών του νέου πληθυσμού εκτελούνται  $pop\_size$  περιστροφές της ρουλέτας. Αυτό γίνεται ως εξής:

1. Επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός  $r$  μεταξύ 0 και 1.
2. Αν  $r < q_1$ , τότε επιλέγεται το πρώτο χρωμόσωμα  $v_1$ , διαφορετικά επιλέγεται το  $v_i$  ( $2 \leq i \leq pop\_size$ ), έτσι ώστε ( $q_{i-1} < r \leq q_i$ ).

Προφανώς, με αυτή τη μέθοδο επιλογής είναι δυνατόν κάποια μέλη του πληθυσμού να επιλεγθούν περισσότερες από μία φορές, με αυτά που είχαν την καλύτερη απόδοση στην προηγούμενη γενιά να έχουν τις περισσότερες πιθανότητες γι' αυτό.

### Διασταύρωση

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο τελεστής της διασταύρωσης – ο οποίος στο συγκεκριμένο Γ.Α. είναι διασταύρωση ενός σημείου – στο νέο πληθυσμό. Λαμβάνεται ότι η πιθανότητα κάθε μέλους του πληθυσμού να επιλεγεί για διασταύρωση είναι  $p_c$ . Για κάθε μέλος του πληθυσμού γίνονται τα εξής:

- Επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός  $r$  μεταξύ 0 και 1.



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

- Αν  $r < r_c$ , επιλέγεται το τρέχον μέλος του πληθυσμού για διασταύρωση.

Μετά την επιλογή μελών του πληθυσμού για διασταύρωση (ο αναμενόμενος αριθμός αυτών των μελών είναι  $r_c * pop\_size$ ), σχηματίζονται ζευγάρια από μέλη και για κάθε ζευγάρι επιλέγεται τυχαία ένας ακέραιος αριθμός  $pos$  στο διάστημα  $[1, m-1]$ , όπου  $m$  είναι το μήκος σε δυαδικά ψηφία του (μοναδικού στην περίπτωση μας) χρωμοσώματος κάθε μέλους. Ο αριθμός  $pos$  προσδιορίζει το σημείο διασταύρωσης. Τα επιλεγμένα ζευγάρια διασταυρώνονται και την θέση τους στον πληθυσμό την παίρνουν οι απόγονοί τους. Έτσι, η διασταύρωση των δύο παρακάτω ατόμων:

$(b_1 b_2 \dots b_{pos} b_{pos+1} \dots b_m)$

$(c_1 c_2 \dots c_{pos} c_{pos+1} \dots c_m)$

θα δώσει το ακόλουθο ζευγάρι απογόνων:

$(b_1 b_2 \dots b_{pos} b_{pos+1} \dots c_m)$

$(c_1 c_2 \dots c_{pos} c_{pos+1} \dots b_m)$

Απόγονοι οι οποίοι θα αντικαταστήσουν τους «γονείς» τους στον πληθυσμό.

### Μετάλλαξη

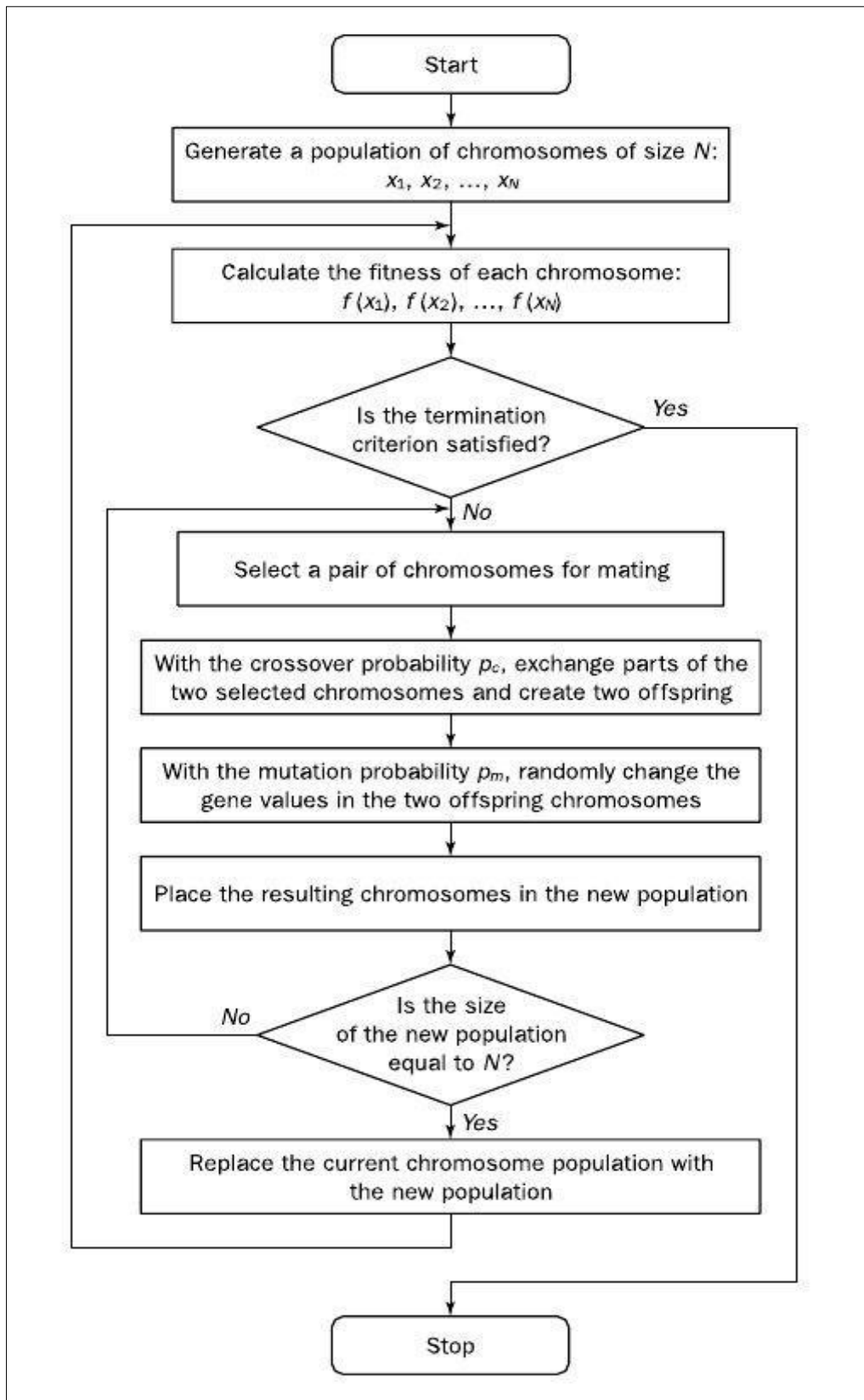
Η μετάλλαξη επιλέγει με τυχαίο τρόπο γονίδια από τα χρωμοσώματα των μελών του πληθυσμού και μεταβάλλει την τιμή τους. Επειδή στο συγκεκριμένο Γ.Α. τα γονίδια παίρνουν μόνο δυαδικές τιμές ο τελεστής της μετάλλαξης απλώς τα αντιστρέφει. Έτσι στο Γ.Α. που παρουσιάζεται η μετάλλαξη αντιμετωπίζει τον πληθυσμό των ατόμων σαν μία ακολουθία από δυαδικά ψηφία. Κάθε δυαδικό ψηφίο έχει την ίδια πιθανότητα να επιλεγεί προκειμένου να μεταλλαχθεί. Η πιθανότητα αυτή ισούται με την πιθανότητα μετάλλαξης  $p_m$ . Ο αναμενόμενος αριθμός των ανεστραμμένων ψηφίων μετά τη διαδικασία της μετάλλαξης θα είναι  $(p_m * m * pop\_size)$ . Η διαδικασία έχει ως εξής:

Για κάθε χρωμόσωμα μέλους και κάθε γονίδιο μέσα στο χρωμόσωμα:

- Επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός  $r$  μεταξύ 0 και 1.
- Αν  $r < p_m$ , τότε μεταλλάσσεται το γονίδιο (αντιστρέφουμε το δυαδικό ψηφίο).

### 6.1.6 Διάγραμμα Ροής του Γενετικού Αλγορίθμου για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος

Στη παρακάτω εικόνα(Εικόνα 6.1) απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του Γ.Α. που περιγράφηκε παραπάνω για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος.



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα ροής για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων [35]

## 6.2 Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης του Ηλιοθερμικού Σταθμού αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης. Γενικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι δείκτες για την αξιολόγηση επενδύσεων με πιο συνηθισμένους την καθαρή παρούσα αξία (NPV), τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR), την έντοκη περίοδο αποπληρωμής (DPP) και το ετήσιο ισοδύναμο κόστος (EAC). Οι πιο αντιπροσωπευτικοί από αυτούς τους δείκτες, οι οποίοι και χρησιμοποιηθήκαν για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης επένδυσης, είναι οι NPV και IRR [36].

### 6.2.1 Υπολογισμός Καθαρών Ταμειακών Ροών (ΚΤΡ)

Η αξιολόγηση επενδύσεων βασίζεται στην έννοια των Καθαρών Ταμειακών Ροών (ΚΤΡ). Σε γενικές γραμμές, η ΚΤΡ κάθε έτους είναι η διαφορά μεταξύ των εσόδων της επιχείρησης από τις πωλήσεις (ταμειακές εισροές) και των πληρωμών για τους διάφορους συντελεστές παραγωγής και τη διάθεση των προϊόντων, καθώς επίσης και για την πληρωμή του φόρου εισοδήματος (ταμειακές εκροές). Στη συγκεκριμένη διπλωματική υιοθετούνται οι εξής συμβολισμοί για τα οικονομικά μεγέθη κάθε έτους  $t$ :

- $E_t$  : Τα συνολικά έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.
- $\Lambda\Delta_t$  : Οι λειτουργικές δαπάνες του σταθμού που περιλαμβάνουν τα έξοδα O&M, τα ασφαλιστικά κόστη και τα μισθολογικά κόστη.
- $A_t$  : Οι προβλεπόμενες αποσβέσεις για την επένδυση.
- $ΟΤΑ_t$  : Το ειδικό τέλος που πληρώνει ο ιδιοκτήτης του σταθμού ΑΠΕ στον Οργανισμό Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) κάθε χρόνο.
- $\Phi\Sigma$  : Ο φορολογικός συντελεστής για τον υπολογισμό του φόρου εισοδήματος.
- $T_t$  : Ο τόκος που καταβάλλεται ετησίως λόγω ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων.
- $X_t$  : Το χρεολύσιο που καταβάλλεται για την απόσβεση των δανειακών κεφαλαίων.

Με βάση τους παραπάνω συμβολισμούς, οι ΚΤΡ του σταθμού για κάθε έτος  $t$  υπολογίζονται με την εφαρμογή της εξίσωσης:[37]

$$ΚΤΡ_t = (E_t - \Lambda\Delta_t - A_t - T_t - ΟΤΑ_t) * (1 - \Phi\Sigma) + A_t - X_t \quad (6.2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξ. 6.2 ισχύει εάν το δανειακό κεφάλαιο δεν έχει συνεκτιμηθεί στο αρχικό κόστος της επένδυσης  $K_0$ , πρακτική που ακολουθείται στην παρούσα εργασία. Στην περίπτωση που το δανειακό κεφάλαιο συνεκτιμάται στο  $K_0$ , τότε οι τόκοι πρέπει να προστεθούν στις ΚΤΡ μολονότι αποτελούν πραγματικές ταμειακές εκροές, σε αντίθεση με τις αποσβέσεις, όπως φαίνεται από την εξ. 6.3. Τέλος, στην περίπτωση που η επένδυση πραγματοποιείται εξολοκλήρου με ίδια κεφάλαια και δεν υπάρχει δανεισμός, τότε από την εξ. 6.3 απουσιάζει ο όρος  $T_t$ .

$$ΚΤΡ_t = (E_t - \Lambda\Delta_t - A_t - T_t - ΟΤΑ_t) * (1 - \Phi\Sigma) + A_t + T_t \quad (6.3)$$

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

Σε αυτό το σημείο, θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού του κάθε όρου της εξίσωσης 6.2.

Τα έσοδα κάθε έτους ( $E_t$ ) σε € του σταθμού υπολογίζονται ως εξής [38]:

$$E_t = \begin{cases} TotalAnnualWnet * 0.26485, & \text{αν η αποθήκη είναι μικρότερη από 2 ώρες} \\ TotalAnnualWnet * 0.28485, & \text{αν η αποθήκη είναι ίση ή μεγαλύτερη από 2 ώρες} \end{cases} \quad (6.4)$$

όπου,  $TotalAnnualWnet$  : η ετήσια καθαρή παραγωγή ενέργειας.

Οι λειτουργικές δαπάνες κάθε έτους ( $\Delta\Delta_t$ ) υπολογίζονται ως εξής:

$$\Delta\Delta_t = AnnualOMCost + AnnualInsuranceCost + AnnualLpgCost \quad (6.5)$$

όπου,  $AnnualOMCost$  : Ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του σταθμού.

$AnnualInsuranceCost$  : Ετήσιο κόστος ασφάλισης του σταθμού.

$AnnualLpgCost$  : Ετήσιο κόστος Lpg.

Η απόσβεση κεφαλαίου κάθε έτους ( $A_t$ ) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$A_t = \frac{K_{o,total}}{N} \quad (6.6)$$

όπου,  $K_{o,total}$  : το σύνολο των δανειακών και ιδίων κεφαλαίων.

$N$  : η διάρκεια αξιολόγησης της επένδυσης σε έτη.

Το ειδικό τέλος που δίνεται κάθε χρόνο στην τοπική αυτοδιοίκηση ( $OTA_t$ ), είναι [38]:

$$OTA_t = 0,03 * E_t \quad (6.7)$$

όπου,  $E_t$  : τα έσοδα που δίνονται από τον τύπο 6.4.

Οι τόκοι κάθε έτους ( $T_t$ ) μπορούν να υπολογιστούν με μία απλή αφαίρεση:

$$T_t = \Delta\Delta - X_t \quad (6.8)$$

όπου,  $\Delta\Delta$  : τα τοκοχρεολύσια κάθε έτους (ουσιαστικά η Δόση δανείου κάθε έτους).

$X_t$  : τα χρεολύσια κάθε έτους.

Τα τοκοχρεολύσια κάθε έτους ( $\Delta\Delta$ ) είναι ίσα μεταξύ τους και υπολογίζονται από την εξίσωση:

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

$$\Delta\Delta = \left(i + \frac{i}{(1+i)^{N_{\Delta}-1}}\right) * C_L \quad (6.9)$$

Τα χρεολύσια ( $X_t$ ) κάθε έτους υπολογίζονται ως εξής:

$$X_t = \frac{i}{(1+i)^{N_{\Delta}-1}} * C_L * (1+i)^{t-1} \quad (6.10)$$

όπου,  $i$  : το επιτόκιο του δανείου.

$N_{\Delta}$  : η περίοδος εξόφλησης του δανείου σε έτη.

$C_L$  : το δανειακό κεφάλαιο (Loan Capital).

Σημείωση: Ο υπολογισμός των τόκων ( $T_t$ ) και των χρεολυσίων ( $X_t$ ) διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο εξόφλησης του δανείου. Οι παραπάνω τύποι που χρησιμοποιήθηκαν ισχύουν όταν η μέθοδος εξόφλησης που χρησιμοποιείται είναι αυτή με ίσα τοκοχρεολύσια, δηλαδή στο τέλος κάθε έτους καταβάλλεται μια σταθερή δόση δανείου ( $\Delta\Delta$ ). Από έτος σε έτος ο τόκος μειώνεται ενώ το χρεολύσιο αυξάνει ώστε η δόση να παραμένει σταθερή.

### 6.2.2 Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV)

Ο δείκτης NPV (Net Present Value) λαμβάνει υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος με την αναγωγή των ετήσιων ΚΤΡ σε παρούσα αξία, δηλαδή στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής λειτουργίας του σταθμού. Εν γένει, η εξίσωση υπολογισμού της ΚΠΑ είναι:

$$NPV = -K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+k)^t} + \frac{YA_N}{(1+k)^N} \quad (6.11)$$

όπου,  $K_0$  : το αρχικό κόστος της επένδυσης (στην περίπτωσή μας περιλαμβάνει μόνο τα Ίδια Κεφάλαια).

$KTP_t$  : οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους  $t$ .

$k$  : το επιτόκιο αναγωγής, που ισούται με την ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων που επενδύονται.

$N$  : η διάρκεια αξιολόγησης της επένδυσης σε έτη.

$YA_N$  : η υπολειπόμενη αξία της επένδυσης στο τέλος της περιόδου αξιολόγησης (στην περίπτωσή μας δεν λαμβάνεται υπ' όψιν).

Ανάλογα με την τιμή της NPV που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης 6.11 αξιολογείται το επενδυτικό σχέδιο. Εάν εξετάζονται σε συνδυασμό περισσότερα του ενός εναλλακτικά επενδυτικά σχέδια επιλέγεται εκείνο που έχει την μεγαλύτερη NPV, με την προϋπόθεση η διάρκεια ζωής όλων των σχεδίων να είναι η ίδια. Πιο συγκεκριμένα για ένα σχέδιο:

- Εάν  $NPV > 0$  το επενδυτικό σχέδιο μπορεί να επιλεγεί.
- Εάν  $NPV < 0$  το επενδυτικό σχέδιο απορρίπτεται.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

- Εάν  $NPV = 0$  υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου (οριακή κατάσταση).

### 6.2.3 Υπολογισμός Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR)

Ο δείκτης IRR (Internal Rate of Return) είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής σε παρούσα αξία που κάνει την NPV της επένδυσης, για τη διάρκεια οικονομικής αξιολόγησης της, ίση με το μηδέν. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφράζει την απόδοση κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της. Συνεπώς, ο IRR της επένδυσης προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\text{Εάν } NPV(k)=0, \text{ τότε } IRR=k \quad (6.12)$$

Ανάλογα με την προκύπτουσα τιμή του IRR και την ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων του επενδυτή ( $k$ ) αξιολογείται η επένδυση. Στην περίπτωση που αξιολογείται ένα μόνο επενδυτικό σχέδιο ισχύουν τα εξής:

- Εάν  $IRR > k$  το επενδυτικό σχέδιο μπορεί να επιλεγεί.
- Εάν  $IRR < k$  το επενδυτικό σχέδιο απορρίπτεται.
- Εάν  $IRR = k$  υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου (οριακή κατάσταση).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη και αρνητικών KTP ενδέχεται να οδηγήσει σε παραπάνω από μία λύσεις της εξίσωσης 6.12, δηλαδή σε περισσότερους από έναν IRR για το ίδιο επενδυτικό σχέδιο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για τιμές του  $k$  μικρότερες από το μεγαλύτερο από τα IRR της επένδυσης έχουμε αρνητικό NPV. Κατά συνέπεια, σε αυτές τις περιπτώσεις για να εφαρμοστεί σωστά το κριτήριο αξιολόγησης του IRR θα πρέπει να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με αυτό της NPV.

### 6.3 Βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού όταν αυτός λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος

Σε αυτή την ενότητα, θα βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του Ηλιοθερμικού Σταθμού όταν αυτός λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Η βελτιστοποίηση θα γίνει ως προς τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) της επένδυσης.

Για τον υπολογισμό του IRR έγιναν οι εξής υποθέσεις:

Τα Ίδια Κεφάλαια αποτελούν το 30% της συνολικής επένδυσης, οπότε τα Δανειακά Κεφάλαια αντίστοιχα αποτελούν το 70% της συνολικής επένδυσης. Το επιτόκιο δανεισμού είναι 8%, το επιτόκιο αναγωγής επίσης 8%, η διάρκεια ζωής του έργου είναι 25 χρόνια και τέλος η διάρκεια αποπληρωμής του δανείου είναι 15 χρόνια και γίνεται με την μέθοδο των σταθερών Δόσεων Δανείου.

Θεωρούνται δύο «σενάρια» για αυτή την βελτιστοποίηση:

1<sup>ο</sup> Σενάριο: Στο πρώτο σενάριο θα κρατηθεί σταθερή η ονομαστική ισχύς του σταθμού και θα μεταβάλλονται η έκταση της γης που απαιτείται για έναν τέτοιο σταθμό (δηλαδή, ουσιαστικά θα μεταβάλλεται η έκταση που καλύπτουν τα κάτοπτρα) καθώς και το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης του σταθμού ώστε να επιτευχθεί μεγιστοποίηση ως προς τον IRR.

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

2° Σενάριο: Στο δεύτερο σενάριο θα κρατηθεί σταθερή η έκταση της γης που είναι διαθέσιμη για τον Ηλιοθερμικό Σταθμού και θα μεταβάλλονται η ονομαστική ισχύς του σταθμού καθώς και το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης του σταθμού ώστε να επιτευχθεί και πάλι μεγιστοποίηση ως προς τον IRR.

### 6.3.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την Ονομαστική Ισχύς του Σταθμού

Πρόκειται για το σενάριο 1 που περιγράφηκε ακριβώς πριν. Θα κρατηθεί σταθερή η ονομαστική ισχύς του σταθμού ( $W_{net}$ ) και θα μεταβάλλονται η έκταση της γης ( $Land_{Required}$ ) που θα χρησιμοποιηθεί για τον σταθμό καθώς επίσης και το μέγεθος της αποθήκης ( $h$ ). Πιο συγκεκριμένα, η έκταση γης που θα είναι διαθέσιμη θα κυμαίνεται από 500 – 3000 στρέμματα και οι ώρες αποθήκης από 0 – 8 ώρες. Επιπλέον, για να υπάρχει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα θα βελτιστοποιηθούν τρεις διαφορετικοί σταθμοί.

Παρακάτω, ακολουθούν αναλυτικοί πίνακες με τα βασικά στοιχεία των σταθμών, που λειτουργούν βελτιστοποιώντας τον IRR τους, καθώς επίσης και διαγράμματα που αναπαριστούν τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις.

#### 6.3.1.1 Σταθμός 30 MW

1<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 1<sup>ος</sup> σταθμός θα έχει ονομαστική ισχύς 34MW ώστε να δίνει στο δίκτυο 30MW (περίπου 13% είναι οι ιδιοκαταναλώσεις του σταθμού).

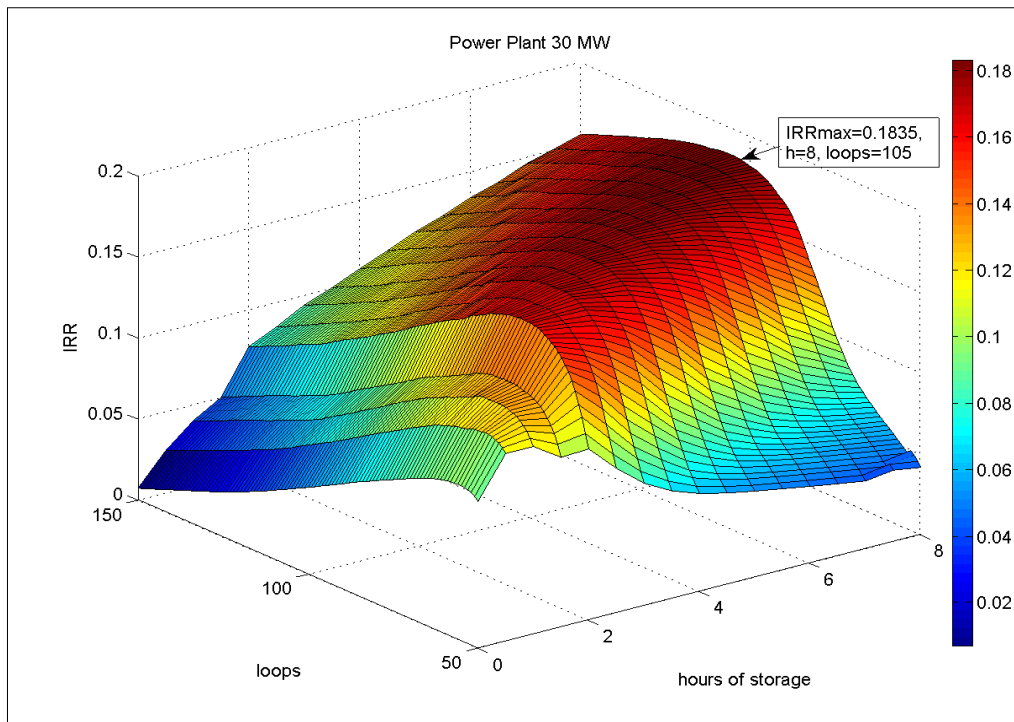
Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με $W_{net}=30MW$			
	1 <sup>ο</sup> Τρέξιμο	2 <sup>ο</sup> Τρέξιμο	3 <sup>ο</sup> Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	30	30	30
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	34	34	34
Ώρες Αποθήκης [hours]	8	7	7,5
loops	105	95	100
Έκταση Γης [στρέμματα]	1272	1151	1212
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,1835</b>	<b>0,1823</b>	<b>0,1812</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	57,8	52,3	54,7
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	132,1	121,8	127,3
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	114,2	105,6	110,2
Ποσοστό Χρήσης Καυστήρα	0,0358	0,0382	0,0388
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,4434	0,4089	0,4272
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	172,2	158,7	165,4

Πίνακας 6.1 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR –  $W_{net}=30MW$  – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

Ακολουθεί το γράφημα 6.1 το οποίο δείχνει τον IRR συναρτήσει της αποθήκης και των loops του σταθμού.



## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



Γράφημα 6.1 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 30MW, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

### 6.3.1.2 Σταθμός 50 MW

2<sup>ος</sup> Σταθμός:

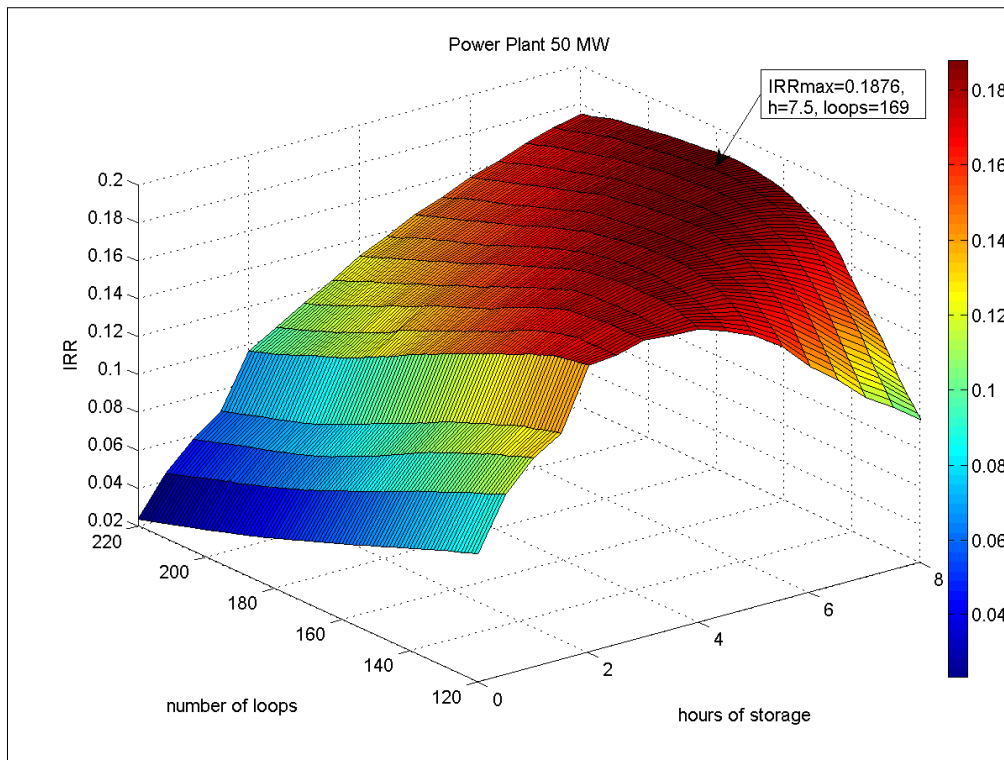
Ο 2<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα δίνει:  $W_{gross}=56MW$  και  $W_{net}=50MW$ .

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με $W_{net}=50MW$			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	50	50	50
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	56	56	56
Ώρες Αποθήκης [hours]	7,5	5,5	8
loops	169	150	175
Έκταση Γης [στρέμματα]	2048	1817	2120
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,1876</b>	<b>0,1817</b>	<b>0,1860</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	96,4	82,5	99
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	212,1	186	218,6
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	184,4	162,4	189,1
Ποσοστό Χρήσης Καυστήρα	0,0372	0,0355	0,0349
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,4322	0,3791	0,4456
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	274,6	245,3	283,2

Πίνακας 6.2 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR –  $W_{net}=50MW$  – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος.



## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



Γράφημα 6.2 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 50MW, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

### 6.3.1.3 Σταθμός 70 MW

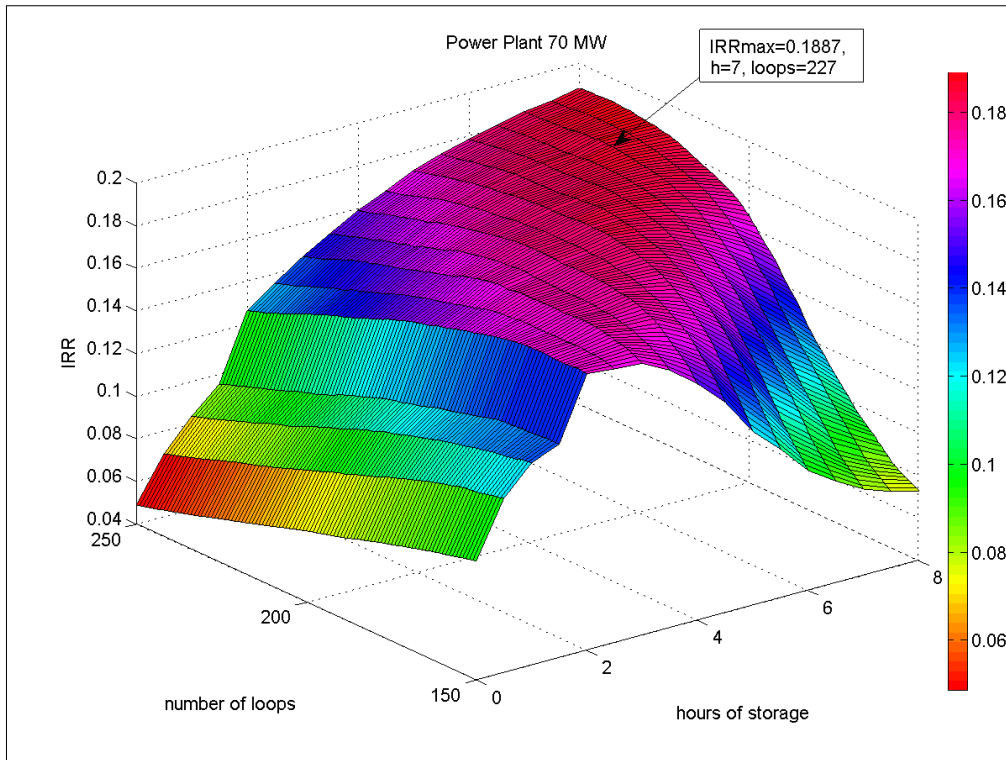
3<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 3<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα δίνει:  $W_{gross}=78MW$  και  $W_{net}=70MW$ .

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με $W_{net}=70MW$			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	70	70	70
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	78	78	78
Ώρες Αποθήκης [hours]	7	8	6
loops	227	235	220
Έκταση Γης [στρέμματα]	2750	2848	2665
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,1887</b>	<b>0,1886</b>	<b>0,1872</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	131,3	139,5	122,4
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	284,7	299,7	269,8
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	247,5	260,2	234,8
Ποσοστό Χρήσης Καυστήρα	0,0348	0,0372	0,0316
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,4166	0,4386	0,3949
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	368,2	382,5	354,8

Πίνακας 6.3 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR –  $W_{net}=70MW$  – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



**Γράφημα 6.3** Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 70MW, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

### 6.3.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την έκταση της γης που είναι διαθέσιμη για τον Σταθμό

Πρόκειται για το σενάριο 2 που περιγράφηκε λίγο πιο πάνω. Εδώ θα κρατηθεί σταθερή η διαθέσιμη έκταση γης (LandRequired) που υπάρχει για τον σταθμό και θα μεταβάλλονται η ονομαστική ισχύς του σταθμού ( $W_{gross}$ ) καθώς επίσης και το μέγεθος της αποθήκης ( $h$ ). Πιο συγκεκριμένα, η ονομαστική ισχύς θα κυμαίνεται από 30 – 110 MW και οι ώρες αποθήκης από 0 – 8 ώρες. Επιπλέον, για να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα θα βελτιστοποιηθούν και πάλι τρεις διαφορετικοί σταθμοί.

Παρακάτω, ακολουθούν αναλυτικοί πίνακες με τα βασικά στοιχεία των σταθμών, που λειτουργούν βελτιστοποιώντας τον IRR τους, καθώς επίσης και διαγράμματα που αναπαριστούν τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις.

Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

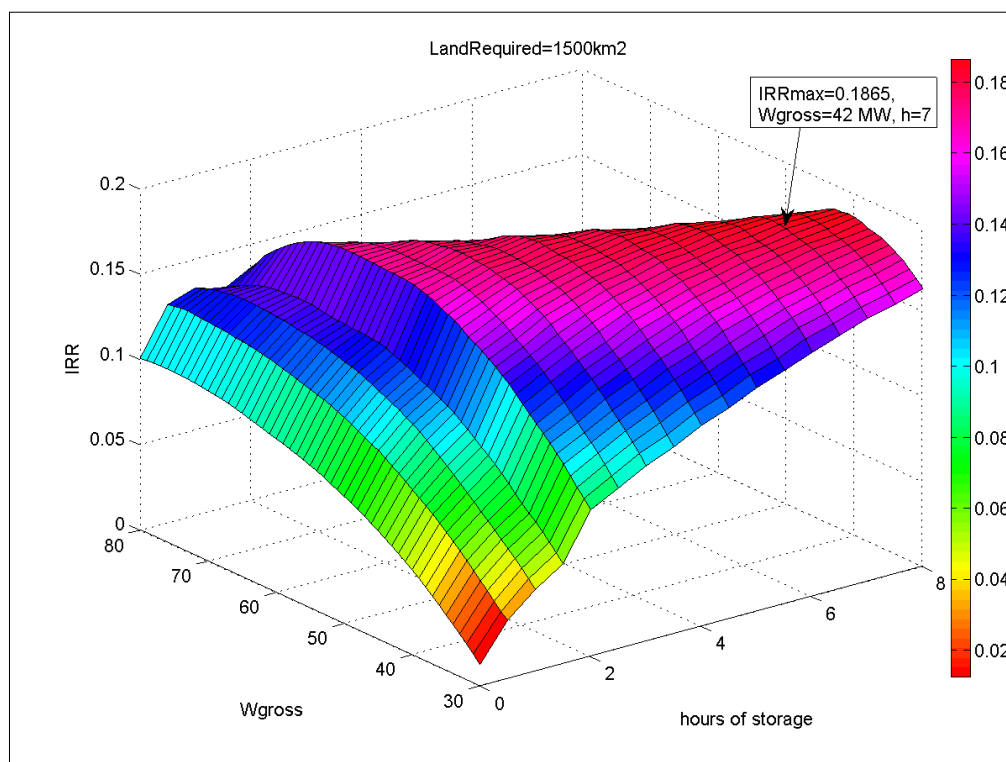
6.3.2.1 Έκταση 1500 στρέμματα

1<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 1<sup>ος</sup> σταθμός θα έχει έκταση: LandRequired=1500 στρέμματα.

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με LandRequired=1500 στρέμματα			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	42	40	44
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	37	35	38,5
Ώρες Αποθήκης [hours]	7	8	6
loops	123	123	123
Έκταση Γης [στρέμματα]	1500	1500	1500
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,1865</b>	<b>0,1846</b>	<b>0,1815</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	68,3	68,2	66,9
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	154,5	155,3	152,1
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	134,3	134,6	132,5
Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα	0,0374	0,0361	0,0354
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,4198	0,4431	0,3945
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	201,2	201,4	200,7

Πίνακας 6.4 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=1500 στρεμμάτων – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος



Γράφημα 6.4 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 1500 στρεμμάτων, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

**Κεφάλαιο 6°** Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού  
με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

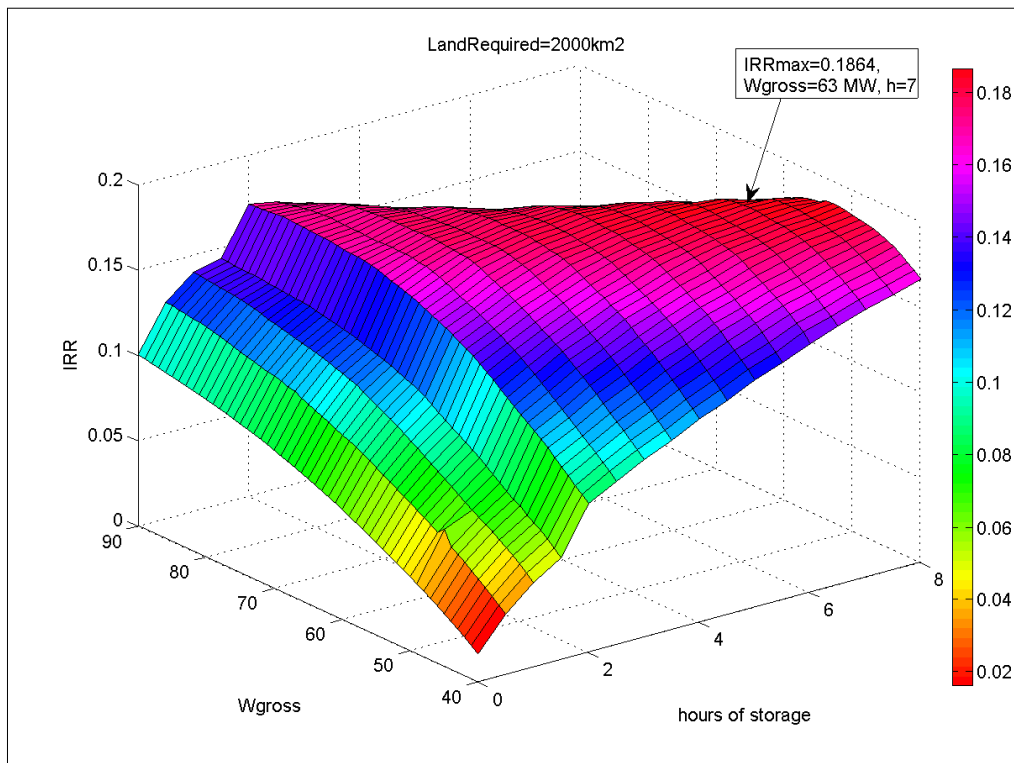
*6.3.2.2 Έκταση 2000 στρέμματα*

2<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 2<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα έχει έκταση: LandRequired=2000 στρέμματα.

<b>Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με LandRequired=2000 στρέμματα</b>			
	<b>1ο Τρέξιμο</b>	<b>2ο Τρέξιμο</b>	<b>3ο Τρέξιμο</b>
<b>Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]</b>	63	59	66
<b>Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]</b>	55.5	52	58
<b>Ώρες Αποθήκης [hours]</b>	7	8	6
<b>loops</b>	165	165	165
<b>Έκταση Γης [στρέμματα]</b>	2000	2000	2000
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0.1864</b>	<b>0,1816</b>	<b>0,1811</b>
<b>NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]</b>	90	91,8	93,4
<b>Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]</b>	219	218,6	216,6
<b>Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]</b>	190,1	189,3	189,2
<b>Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα</b>	0,0473	0,0451	0,0445
<b>Συντελεστής Χρησιμοποίησης</b>	0,3969	0,423	0,3746
<b>Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]</b>	279,3	277,7	278,8

*Πίνακας 6.5 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2000 στρεμμάτων – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος*



*Γράφημα 6.5 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2000 στρεμμάτων, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος*

**Κεφάλαιο 6°** Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού  
με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

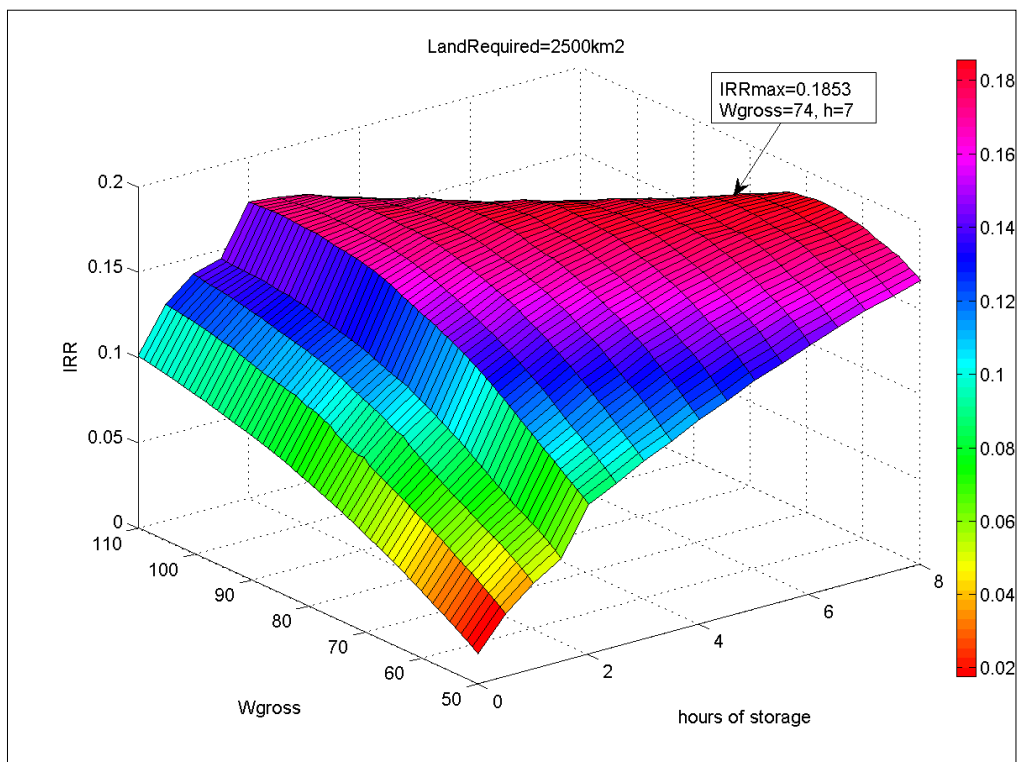
*6.3.2.3 Έκταση 2500 στρέμματα*

3<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 3<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα έχει έκταση: LandRequired=2500 στρέμματα.

<b>Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με LandRequired=2500 στρέμματα</b>			
	<b>1ο Τρέξιμο</b>	<b>2ο Τρέξιμο</b>	<b>3ο Τρέξιμο</b>
<b>Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]</b>	74	71	68
<b>Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]</b>	65	62,5	60
<b>Ώρες Αποθήκης [hours]</b>	7	8	6
<b>loops</b>	206	206	206
<b>Έκταση Γης [στρέμματα]</b>	2500	2500	2500
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	0,1853	0,1849	0,1833
<b>NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]</b>	120,2	120,5	111,5
<b>Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]</b>	264,6	269	242,5
<b>Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]</b>	229,8	233,1	211,3
<b>Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα</b>	0,0377	0,0413	0,0286
<b>Συντελεστής Χρησιμοποίησης</b>	0,4083	0,4325	0,4071
<b>Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]</b>	340	340,6	325

*Πίνακας 6.6 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2500 στρεμμάτων – Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος*



*Γράφημα 6.6 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2500 στρεμμάτων, ως προς IRR, χωρίς περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος*

## 6.4 Βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού όταν αυτός λειτουργεί με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος

Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθούν οι ίδιες βελτιστοποιήσεις, όπως και στην ενότητα 6.3, με τη μόνη διαφορά ότι θα υπάρχουν περιορισμοί διείσδυσης ισχύος. Συγκεκριμένα, από την έναρξη λειτουργίας του σταθμού μέχρι τις 18:00 το απόγευμα ο σταθμός θα μπορεί να δίνει στο δίκτυο μόνο το 50% της ονομαστικής του ισχύος. Από τις 18:00 και μετά, και εφ' όσον η αποθήκη είναι φορτισμένη, ο σταθμός θα μπορεί να δίνει μέχρι και την ονομαστική του ισχύ.

### 6.4.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την Ονομαστική Ισχύς του Σταθμού

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται είναι αυτή με σταθερή Ονομαστική Ισχύς σταθμού. Συγκεκριμένα, θα κρατηθεί σταθερή η ονομαστική ισχύς του σταθμού και θα μεταβάλλονται το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης του σταθμού καθώς επίσης και η έκταση γης που είναι διαθέσιμη ώστε να βελτιστοποιηθεί ο IRR του σταθμού. Οι ώρες αποθήκης θα μεταβάλλονται από 3 – 8. Η έκταση της γης θα μεταβάλλεται από 500 – 3000 στρέμματα.

Παρακάτω, ακολουθούν αναλυτικοί πίνακες με τα βασικά στοιχεία των σταθμών, που λειτουργούν βελτιστοποιώντας τον IRR τους, καθώς επίσης και διαγράμματα που αναπαριστούν τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις.

#### 6.4.1.1 Σταθμός 30 MW

1<sup>ος</sup> Σταθμός:

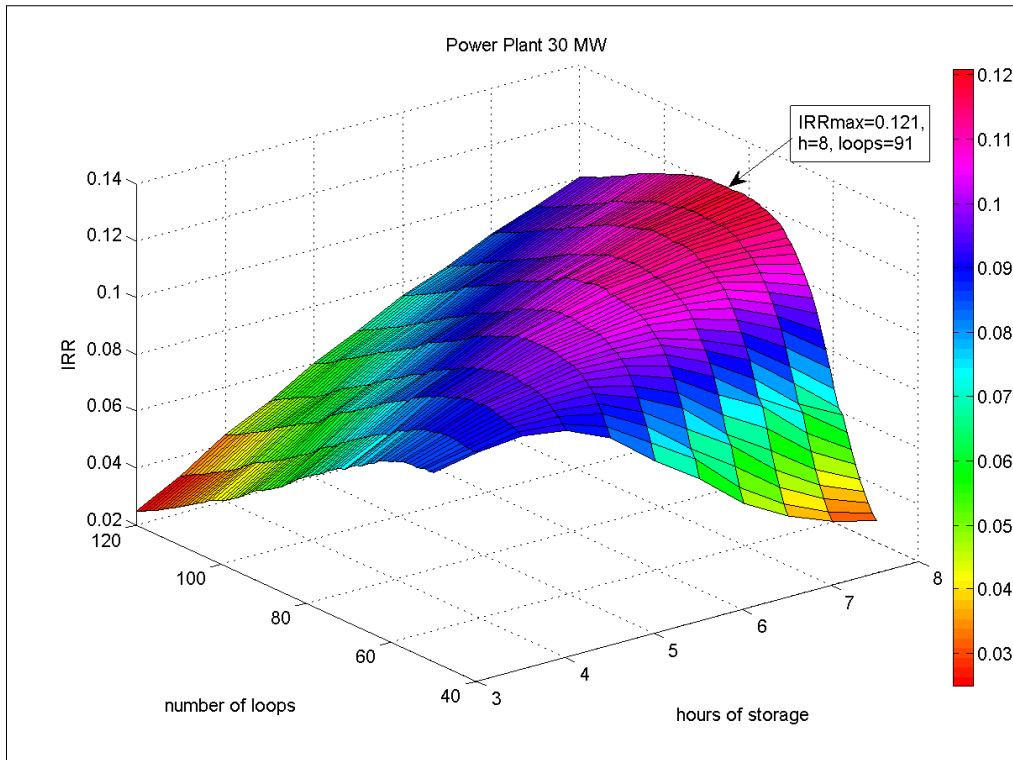
Ο 1<sup>ος</sup> σταθμός θα δίνει:  $W_{gross}=34MW$  και  $W_{net}=30MW$ .

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με $W_{net}=30MW$			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	30	30	30
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	34	34	34
Ώρες Αποθήκης [hours]	8	7	7,5
loops	91	80	85
Έκταση Γης [στρέμματα]	1102	969	1029
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,121</b>	<b>0,1177</b>	<b>0,1187</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	18,1	14,6	16,1
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	99,8	89,6	94,3
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	84,2	75,8	79,6
Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα	0,0252	0,0261	0,0241
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,3351	0,3011	0,3167
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	157,4	142,9	149,6

Πίνακας 6.7 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR –  $W_{net}=30MW$  – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος



## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



Γράφημα 6.7 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 30MW, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

### 6.4.1.2 Σταθμός 50 MW

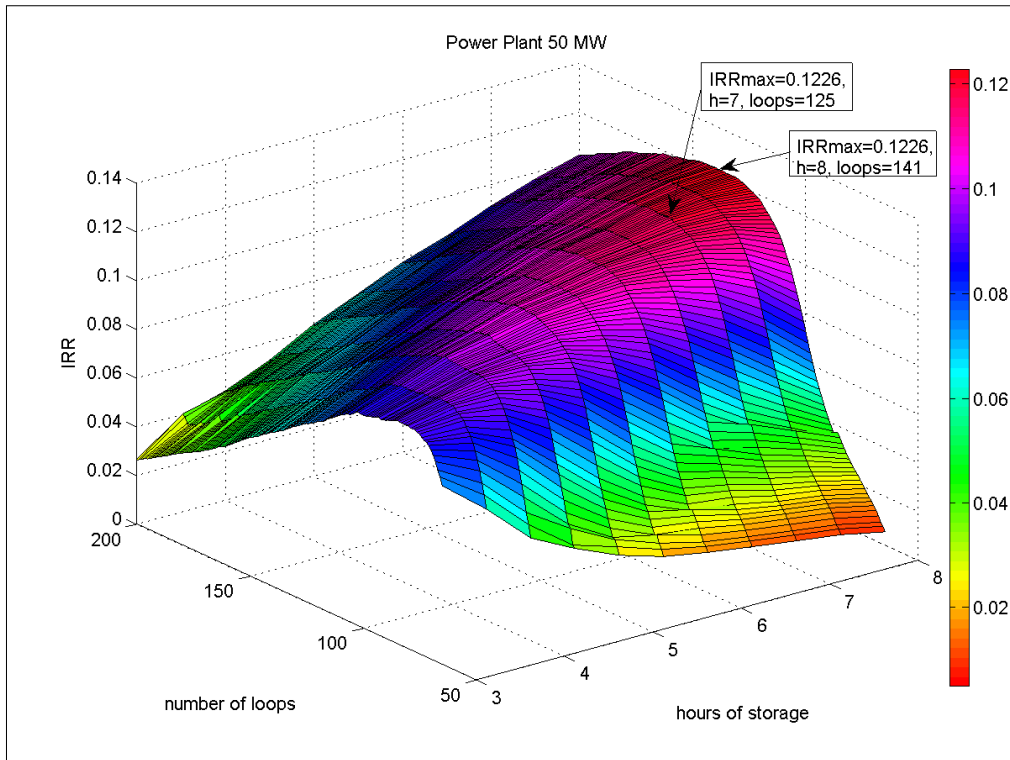
2<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 2<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα δίνει:  $W_{gross}=50MW$  και  $W_{net}=56MW$ .

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με $W_{net}=50MW$			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	50	50	50
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	56	56	56
Ώρες Αποθήκης [hours]	7	8	7,5
loops	125	141	132
Έκταση Γης [στρέμματα]	1515	1708	1600
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,1226</b>	<b>0,1226</b>	<b>0,1221</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	27,9	32,6	30,7
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	144,8	159,8	151,8
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	123,2	134,7	128,9
Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα	0,031	0,0263	0,0283
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,2953	0,3259	0,3093
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	226	247,4	235,7

Πίνακας 6.8 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR –  $W_{net}=50MW$  – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



Γράφημα 6.8 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 50MW, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

### 6.4.1.3 Σταθμός 70 MW

3<sup>ος</sup> Σταθμός:

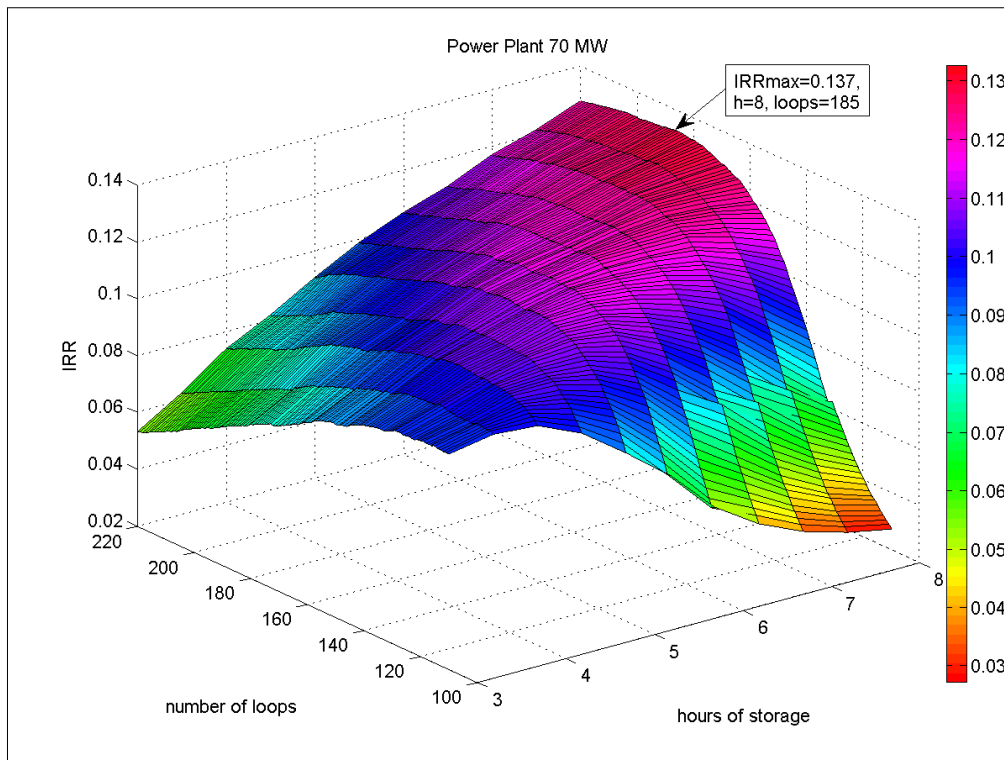
Ο 3<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα δίνει:  $W_{gross}=70MW$  και  $W_{net}=78MW$ .

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με $W_{net}=70MW$			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	70	70	70
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	78	78	78
Ώρες Αποθήκης [hours]	8	6	7
loops	185	165	175
Έκταση Γης [στρέμματα]	2241	2000	2120
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,137</b>	<b>0,128</b>	<b>0,1252</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	52,6	34	43,6
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	218,5	186	201,7
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	186,5	159,2	172,4
Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα	0,0322	0,0264	0,0286
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,3198	0,2721	0,2951
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	330	296,9	313,5

Πίνακας 6.9 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR –  $W_{net}=70MW$  – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος



## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



**Γράφημα 6.9** Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού 70MW, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

### 6.4.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού κρατώντας σταθερή την έκταση της γης που είναι διαθέσιμη για τον Σταθμό

Σε αυτή τη περίπτωση θα κρατηθεί σταθερή η διαθέσιμη έκταση γης (LandRequired) που υπάρχει για τον σταθμό και θα μεταβάλλονται η ονομαστική ισχύς του σταθμού ( $W_{gross}$ ) καθώς επίσης και το μέγεθος της αποθήκης ( $h$ ). Πιο συγκεκριμένα, η ονομαστική ισχύς θα κυμαίνεται από 30 – 110 MW και οι ώρες αποθήκης από 3 – 8 ώρες. Επιπλέον, για να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα θα βελτιστοποιηθούν και πάλι τρεις διαφορετικοί σταθμοί.

Παρακάτω, ακολουθούν αναλυτικοί πίνακες με τα βασικά στοιχεία των σταθμών, που λειτουργούν βελτιστοποιώντας τον IRR τους, καθώς επίσης και διαγράμματα που αναπαριστούν τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις.

Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

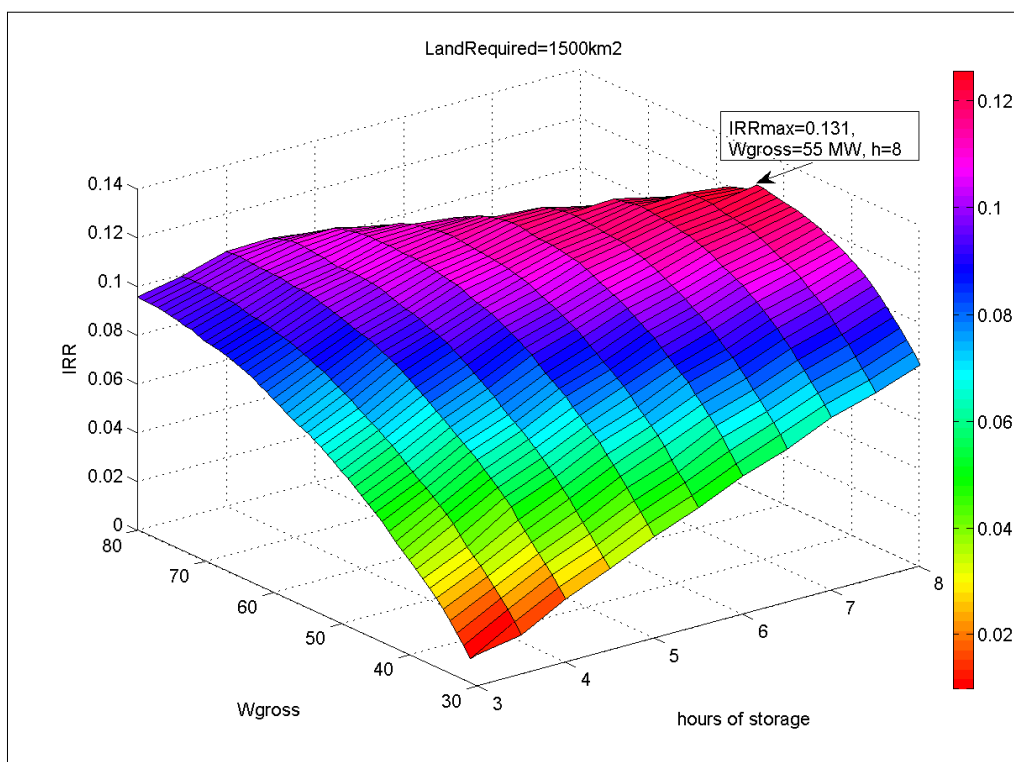
6.4.2.1 Έκταση 1500 στρέμματα

1<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 1<sup>ος</sup> σταθμός θα έχει έκταση: LandRequired=1500 στρέμματα.

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με LandRequired=1500 στρέμματα			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	55	52	51
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	48,5	46	44,5
Ώρες Αποθήκης [hours]	8	7	7,5
loops	123	123	123
Έκταση Γης [στρέμματα]	1500	1500	1500
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,131</b>	<b>0,1254</b>	<b>0,123</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	28,9	27	27,3
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	150	137,4	139,3
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	126,4	116,7	118
Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα	0,0368	0,0267	0,026
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,3113	0,3017	0,311
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	226,8	217,5	218

Πίνακας 6.10 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=1500 στρεμμάτων – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος



Γράφημα 6.10 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 1500 στρεμμάτων, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

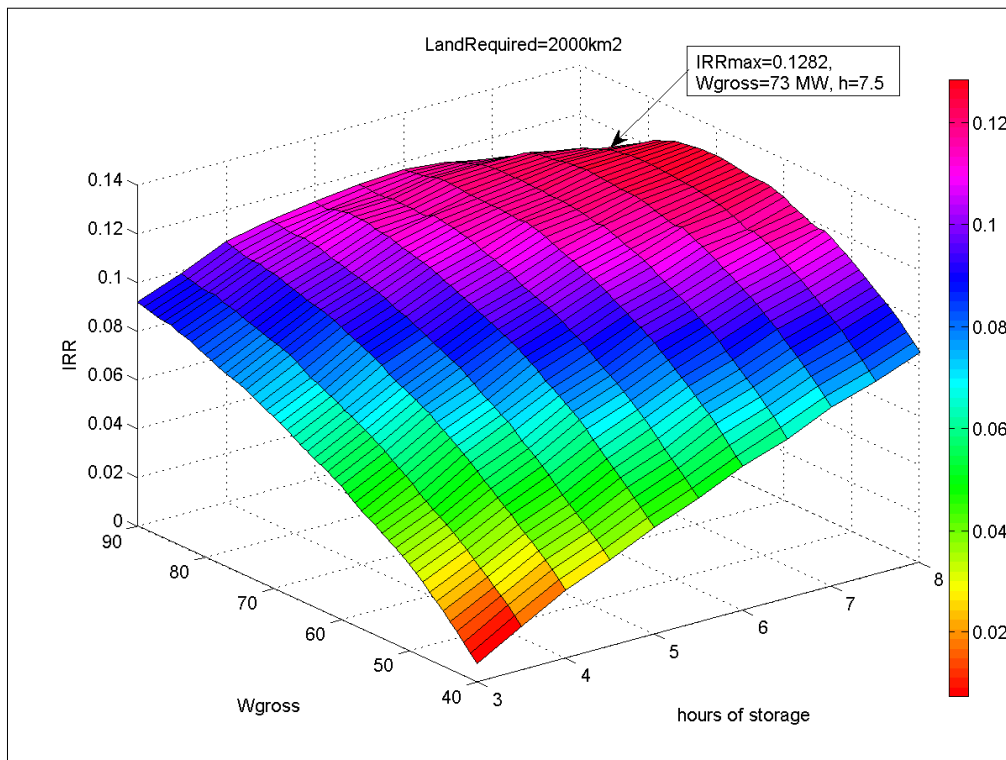
6.4.2.2 Έκταση 2000 στρέμματα

2<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 2<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα έχει έκταση: LandRequired=2000 στρέμματα.

Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με LandRequired=2000 στρέμματα			
	1ο Τρέξιμο	2ο Τρέξιμο	3ο Τρέξιμο
Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]	73	76	71
Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]	64	67	65,5
Ώρες Αποθήκης [hours]	7,5	6	8
loops	165	165	165
Έκταση Γης [στρέμματα]	2000	2000	2000
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,1282</b>	<b>0,1223</b>	<b>0,1265</b>
NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]	42	33,7	41,9
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	194,8	171,1	201,1
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	165,9	146,3	171,3
Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα	0,0322	0,0212	0,036
Συντελεστής Χρησιμοποίησης	0,3046	0,2872	0,3101
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]	298	291,8	302,4

Πίνακας 6.11 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2000 στρεμμάτων – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος



Γράφημα 6.11 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2000 στρεμμάτων, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος

**Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων**

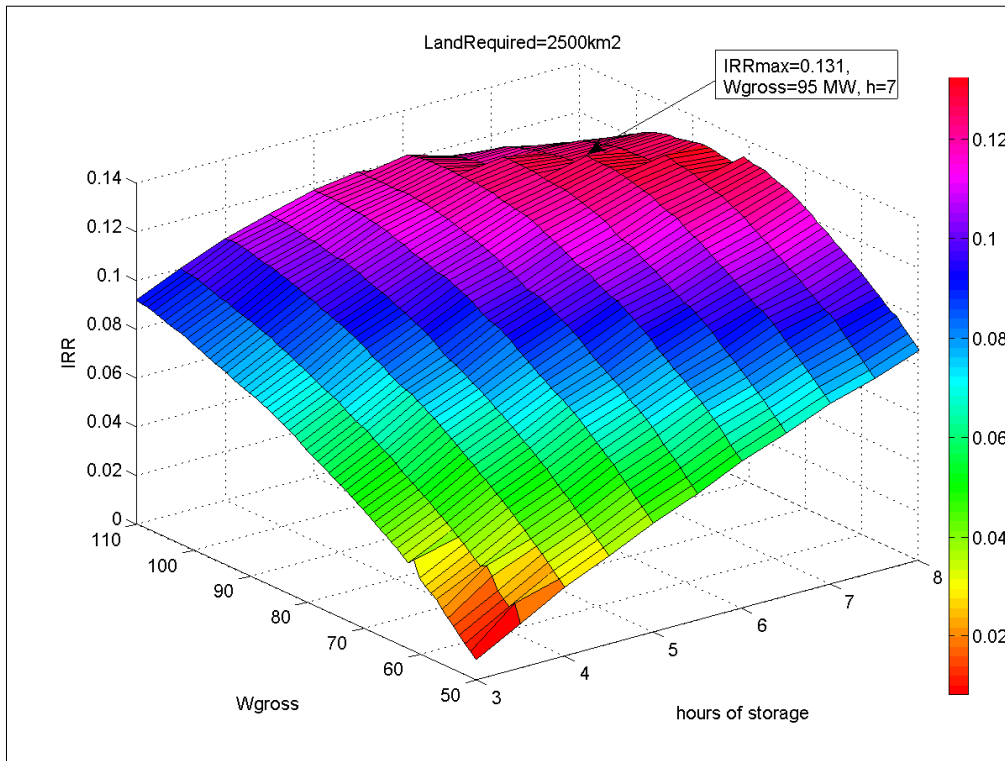
**6.4.2.3 Έκταση 2500 στρέμματα**

3<sup>ος</sup> Σταθμός:

Ο 3<sup>ος</sup> σταθμός αντίστοιχα θα έχει έκταση: LandRequired=2500 στρέμματα.

<b>Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR με LandRequired=2500 στρέμματα</b>			
	<b>1ο Τρέξιμο</b>	<b>2ο Τρέξιμο</b>	<b>3ο Τρέξιμο</b>
<b>Καθαρή Παραγωγή Ισχύος [MW]</b>	95	93	98
<b>Ακαθάριστη Παραγωγή Ισχύος [MW]</b>	83,5	82	86
<b>Ώρες Αποθήκης [hours]</b>	7	8	6
<b>loops</b>	206	206	206
<b>Έκταση Γης [στρέμματα]</b>	2500	2500	2500
<b>IRR (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια)</b>	<b>0,131</b>	<b>0,1275</b>	<b>0,1247</b>
<b>NPV (70% Δανειακά Κεφάλαια, 30% Ίδια Κεφάλαια) [Μ€]</b>	50,5	51,3	45,7
<b>Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]</b>	241,5	252	232,1
<b>Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]</b>	204,4	213	200,1
<b>Ποσοστό Χρήσης Κουστήρα</b>	0,0298	0,0375	0,0274
<b>Συντελεστής Χρησιμοποίησης</b>	0,2902	0,3093	0,2704
<b>Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης [Μ€]</b>	372,5	376	370

*Πίνακας 6.12 Βελτιστοποίηση ως προς τον IRR – LandRequired=2500 στρεμμάτων – Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος*



*Γράφημα 6.12 Αναπαράσταση βελτιστοποίησης σταθμού εκτάσεως 2500 στρεμμάτων, ως προς IRR, με περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος*

## 6.5 Κόστος Επένδυσης

Σε αυτή την ενότητα θα υπολογιστεί το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης (TotalInvestmentCost) που απαιτείται για έναν Ηλιοθερμικό Σταθμό. Στο κεφάλαιο επένδυσης συνυπολογίζονται το κόστος του συστήματος αποθήκης της θερμικής ενέργειας, το κόστος του Ηλιακού Πεδίου, το κόστος του κύκλου Ισχύος, το κόστος ενοικίασης και ομαλοποίησης του εδάφους, το κόστος αγοράς του βοηθητικού καυστήρα Lpg, το κόστος μελέτης και διασύνδεσης του σταθμού και τέλος το κόστος του συστήματος ψύξης. Παρακάτω γίνεται μία τυπική αναφορά στα κόστη αυτά.

### 6.5.1 Κόστος Συστήματος Αποθήκης

Το κόστος του συστήματος αποθήκης, που περιλαμβάνει την αγορά και εγκατάσταση των δύο δεξαμενών (δεξαμενή υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας) και των αντλιών άλατος, είναι μία συνάρτηση της συνολικής απαιτούμενης μάζας αλάτων και της μέγιστης αποθηκευμένης ενέργειας στα άλατα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [22]:

$$TEScost = \begin{cases} 0, & \text{αν } TotalMassMS = 0 \\ (-0,002881 * TotalMassMS + 79.3836) * MaxEnergyStored, & \text{αν } 0 < TotalMassMS \leq 14095 \\ (-4.583 * 10^{-4} * TotalMassMS + 45.249) * MaxEnergyStored, & \text{αν } 14095 < TotalMassMS \leq 28192 \\ (-1,0287 * 10^{-4} * TotalMassMS + 35.23) * MaxEnergyStored, & \text{αν } 28192 < TotalMassMS \end{cases} \text{ [€]} \quad (6.14)$$

όπου:

TotalMassMS = Συνολική απαιτούμενη μάζα αλάτων [ton]

MaxEnergyStored = Η μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια στα άλατα [KWh]

### 6.5.2 Κόστος Ηλιακού Πεδίου

Το κόστος του Ηλιακού Πεδίου περιλαμβάνει την αγορά και εγκατάσταση των παραβολικών κατόπτρων, των αντλιών ελαίου και των μοτέρ που είναι υπεύθυνα για την κίνηση των κατόπτρων. Προσεγγιστικά το κόστος αυτό δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [39]:

$$SFcost = 288 \left( \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) * \text{Συνολική Επιφάνεια Κατόπτρων}(\text{m}^2) \text{ [€]} \quad (6.15)$$

### 6.5.3 Κόστος Κύκλου Ισχύος

Το κόστος του κύκλου ισχύος που περιλαμβάνει όλα όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα 4.2.2 δίνεται προσεγγιστικά από τον ακόλουθο τύπο [39]:

$$PBcost = 800 \left( \frac{\text{€}}{\text{KW}} \right) * W_{grossNom}(\text{KW}) \text{ [€]} \quad (6.16)$$

#### 6.5.4 Κόστος ενοικίασης και ομαλοποίησης του εδάφους

Ως κόστος ενοικίασης και ομαλοποίησης του εδάφους έχει ληφθεί μία τιμή της τάξης των 200 €/στρέμμα.

$$LandCost = 200 \left( \frac{\text{€}}{\text{στρέμμα}} \right) * LandRequired(\text{στρέμμα}) \quad [€] \quad (6.17)$$

#### 6.5.5 Κόστος αγοράς καυστήρα

Το κόστος του καυστήρα είναι ανάλογο της θερμικής ισχύος που παράγει και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$HeaterCost = 15,5 \left( \frac{\text{€}}{\text{KW}} \right) * Heater(KW) \quad [€] \quad (6.18)$$

#### 6.5.6 Κόστος μελέτης και διασύνδεσης του σταθμού

Το κόστος μελέτης και διασύνδεσης του σταθμού είναι ανάλογο της ονομαστικής ισχύος του σταθμού και δίνεται προσεγγιστικά από τον ακόλουθο τύπο[12]:

$$ConnectionAndSurveyCost = 1500000 \left( \frac{\text{€}}{\text{MW}} \right) * \frac{W_{gross}(MW)}{50} \quad [€] \quad (6.19)$$

#### 6.5.7 Κόστος Συστήματος Ψύξης

Το συνολικό κόστος του συστήματος ψύξης, υδρόψυκτο σύστημα ψύξης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο[29]:

$$CoolingCost = 140000 \left( \frac{\text{€}}{\text{MW}} \right) * W_{gross}(MW) \quad [€] \quad (6.20)$$

#### 6.5.8 Συνολικό κόστος επένδυσης

Το συνολικό κόστος επένδυσης είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω κοστών:

$$TotalInvestmentCost = (TEScost + SFcost + PBcost + LandCost + HeaterCost + ConnectionAndSurveyCost + CoolingCost)/1000000 \quad [M€] \quad (6.21)$$

Από τους παραπάνω τύπους εύκολα συμπεραίνεται ότι το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης εξαρτάται από την Ονομαστική Ισχύς του Σταθμού, από το μέγεθος της αποθήκης, από την ονομαστική θερμική Ισχύς του καυστήρα και τέλος από τον αριθμό των loops του Ηλιακού Πεδίου.

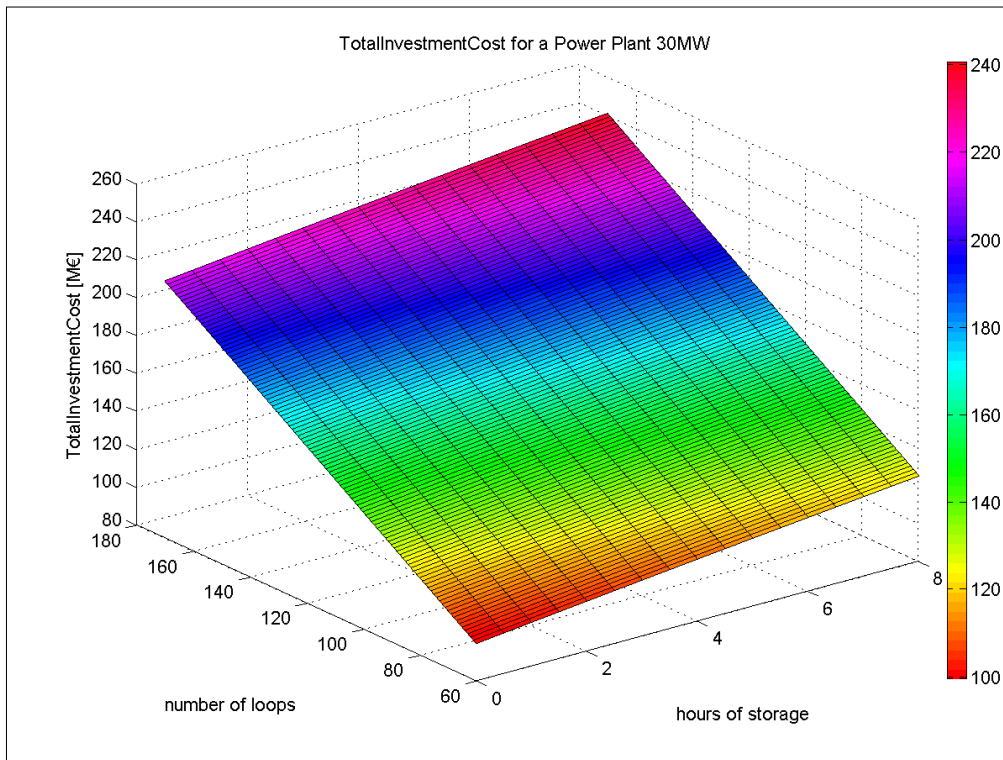
Ακολουθείται ως σύμβαση, ότι η θερμική Ισχύς του καυστήρα θα λαμβάνεται πάντα ίση με την Ονομαστική θερμική Ισχύς του σταθμού.

Οπότε προκύπτει ότι το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης εξαρτάται μόνο από την αποθήκη, τα loops και την Ονομαστική Ισχύς του Σταθμού.

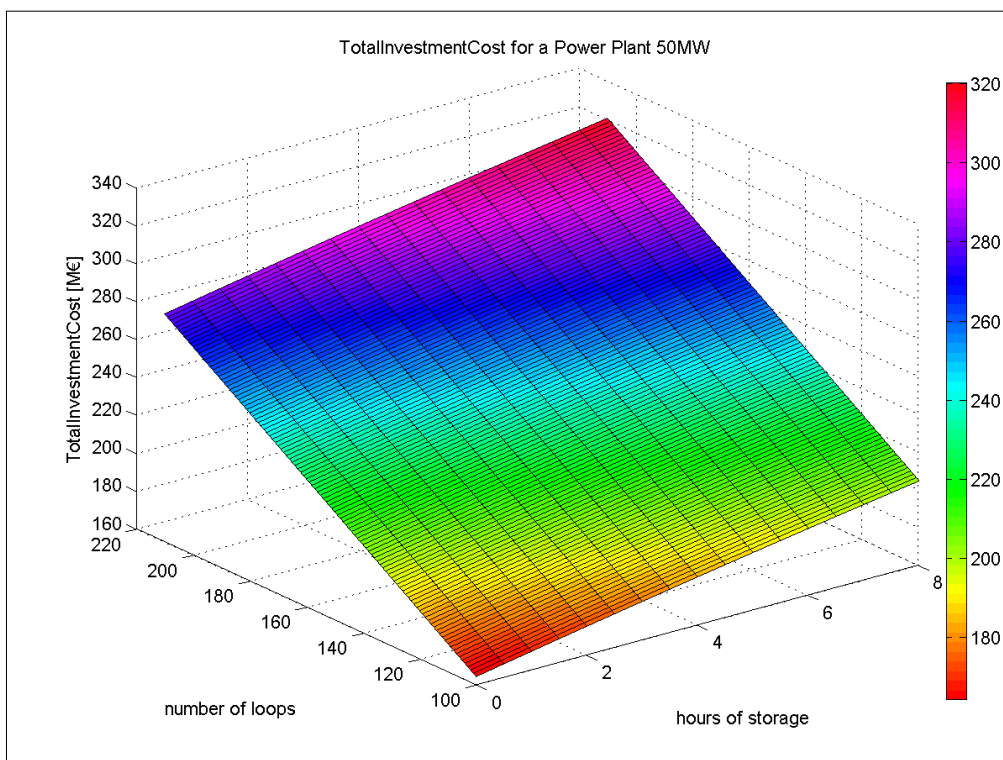


## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

Παρακάτω ακολουθούν γραφήματα που απεικονίζουν το κόστος κεφαλαίου για αυτές τις παραμέτρους, λαμβάνοντας υπ' όψιν τρεις διαφορετικούς σταθμούς.

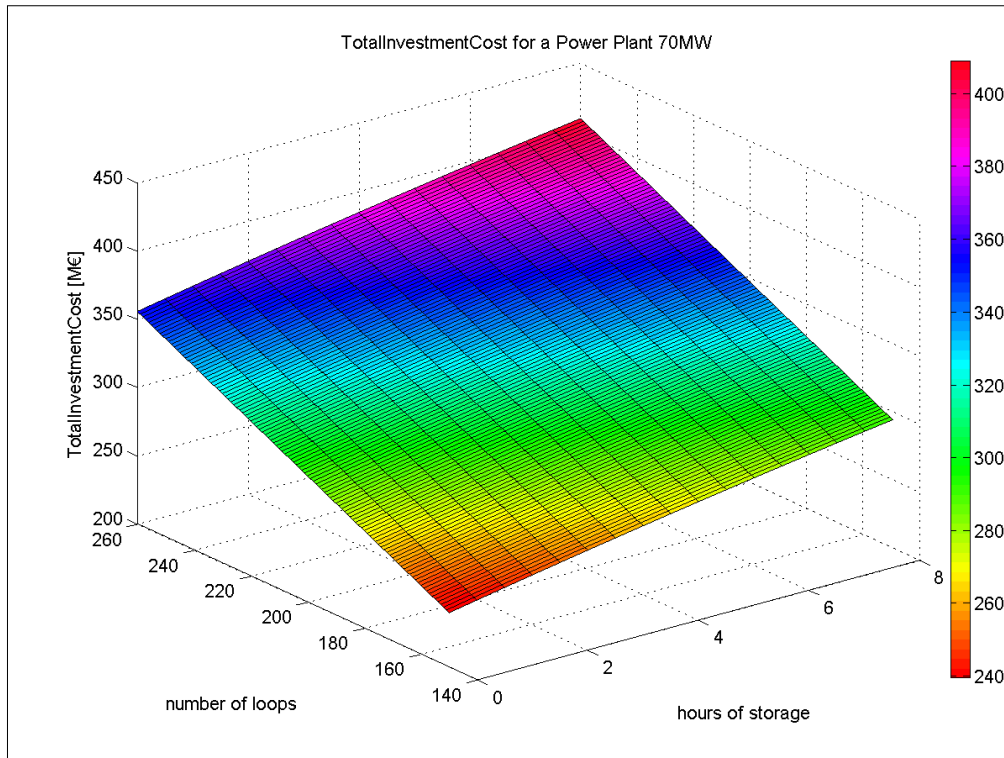


Γράφημα 6.13  $TotalInvestmentCost = f(hours\ of\ storage, number\ of\ loops)$  για  $W_{net}=30MW$



Γράφημα 6.14  $TotalInvestmentCost = f(hours\ of\ storage, number\ of\ loops)$  για  $W_{net}=50MW$

## Κεφάλαιο 6° Βέλτιστη Διαστασιολόγηση ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων



Γράφημα 6.15  $TotalInvestmentCost = f(hours\ of\ storage, number\ of\ loops)$  για  $W_{net}=70MW$

Σημείωση: Για να πραγματοποιήσω τις βελτιστοποιήσεις, χρησιμοποίησα το λογισμικό Matlab R-2010a και πιο συγκεκριμένα την συνάρτηση ga που υπήρχε στην βιβλιοθήκη του Matlab. Όσον αφορά τα διαγράμματα χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις plot και surf.



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα – Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στο Κεφάλαιο αυτό, θα πραγματοποιηθούν συγκρίσεις αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τα Κεφάλαια 5 και 6 καθώς και σχολιασμός αυτών.

#### 7.1 Σύγκριση μεγεθών ενός Ηλιοθερμικού σταθμού, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος

Στην ενότητα αυτή, συγκρίνονται βασικά μεγέθη ενός ηλιοθερμικού σταθμού, που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.1, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η σύγκριση αυτή.

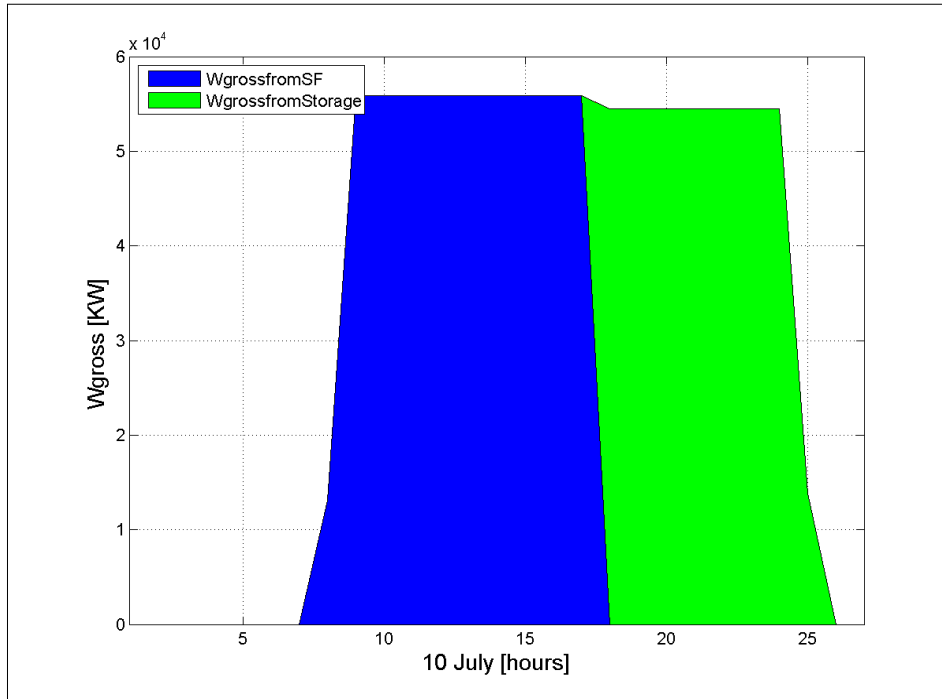
Μεγέθη Σταθμού	Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος	Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος
Ημέρες που δεν Λειτουργεί ο Σταθμός	22	22
Ετήσια Ακαθάριστη Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	212,1	165,8
Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας [GWh]	184,4	140
Ετήσια Παραγωγή Καυστήρα [GWh]	23,5	12,1
Ετήσια Απορριπτόμενη Θερμική Ενέργεια [GWhth]	61,7	160,5
Ποσοστό Χρήσης Καυστήρα	0,0372	0,0182
Ποσοστό Παρασιτικών Καταναλώσεων	0,1223	0,1579
Συντελεστής Εκμετάλλευσης	0,4322	0,338
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	0,1876	0,1119
Καθαρή Παρούσα Αξία [Μ€]	96,4	24,6

*Πίνακας 7.1 Σύγκριση μεγεθών σταθμού, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος*

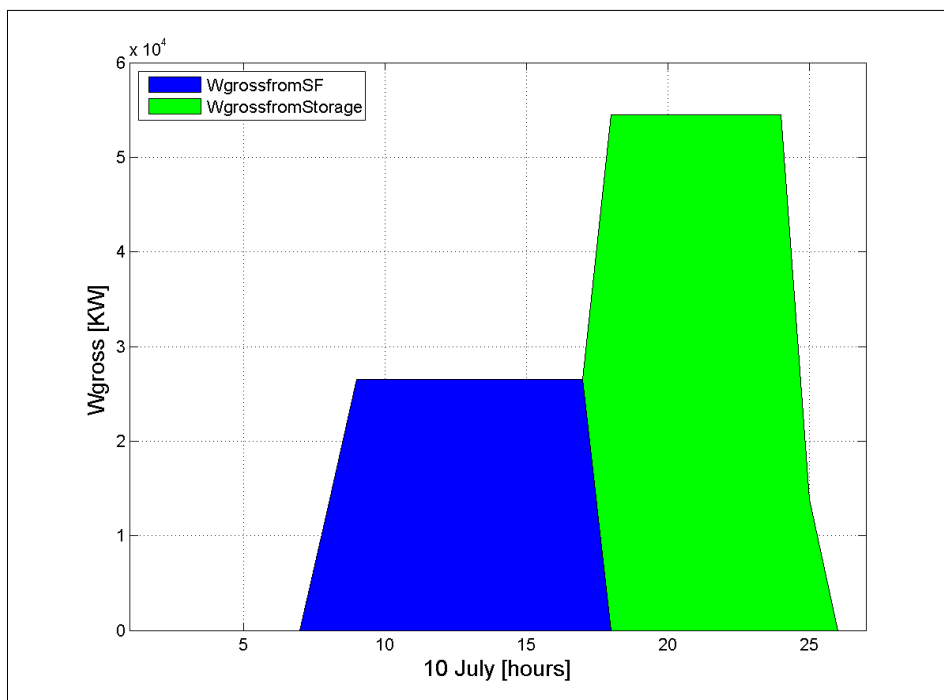
Όπως φαίνεται από τον πίνακα 7.1, όταν ο σταθμός λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος παρουσιάζει έναν αρκετά υψηλό εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης της τάξεως του 19%. Αντίθετα, στην περίπτωση λειτουργίας του σταθμού με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος, ο IRR είναι μόλις 11%. Παρατηρείται ακόμα, μια σημαντική διαφορά στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Στην πρώτη περίπτωση (χωρίς περιορισμούς) παράγονται 212 GWh ετησίως, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (με περιορισμούς) μόλις 166 GWh.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> Συμπεράσματα – Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Τα αποτελέσματα αυτά εξηγούνται παρατηρώντας τα γραφήματα 7.1 και 7.2 που ακολουθούν. Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζουν την παραγόμενη ενέργεια του σταθμού κατά τη διάρκεια μιας τυπικής θερινής ημέρας. Συγκεκριμένα την 10<sup>η</sup> Ιουλίου, όπου αναφέρονται τα γραφήματα, ο σταθμός παράγει 911,2 MWh όταν λειτουργεί χωρίς περιορισμούς διείσδυσης ισχύος και μόλις 688,6 MWh όταν λειτουργεί με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος, χάνοντας δηλαδή 220 MWh ημερησίως.



*Γράφημα 7.1 Παραγωγή Ενέργειας του σταθμού στις 10 Ιουλίου - Χωρίς Περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος*



*Γράφημα 7.2 Παραγωγή Ενέργειας του σταθμού στις 10 Ιουλίου - Με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος*

## 7.2 Συμπεράσματα από τις βέλτιστες διαστασιολογήσεις του σταθμού

Στο Κεφάλαιο 6, με τη βοήθεια των Γενετικών Αλγορίθμων, βρέθηκαν οι βέλτιστες διαστασιολογήσεις ενός Ηλιοθερμικού σταθμού. Συγκεκριμένα, για το σκοπό αυτό υιοθετήθηκαν δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, κρατήθηκε σταθερή η Ονομαστική Ισχύς του σταθμού και μεταβάλλονταν το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης καθώς επίσης και τα loops του σταθμού με σκοπό τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού της επένδυσης. Η διαστασιολόγηση αυτή πραγματοποιήθηκε για τρία διαφορετικά μεγέθη σταθμού, 30MW - 50MW - 70MW, τόσο για λειτουργία με περιορισμούς διείσδυσης Ισχύος όσο και για λειτουργία δίχως περιορισμών διείσδυσης Ισχύος. Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης φαίνονται στους Πίνακες 7.2 και 7.3.

Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος			
Ονομαστική Ισχύς Σταθμού [MW]	IRR	loops	Ώρες Αποθήκης
30	0.1835	105	8
50	0.1876	169	7.5
70	0.1887	227	7

Πίνακας 7.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Ον. Ισχύς – Χωρίς Περιορισμούς)

Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος			
Ονομαστική Ισχύς Σταθμού [MW]	IRR	loops	Ώρες Αποθήκης
30	0.121	91	8
50	0.1226	125/141	7/8
70	0.137	185	8

Πίνακας 7.3 Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Ον. Ισχύς – Με Περιορισμούς)

Στο δεύτερο σενάριο, κρατήθηκε σταθερή η έκταση γης που είναι διαθέσιμη για τον σταθμό και μεταβάλλονταν η Ονομαστική Ισχύς του σταθμού καθώς και το μέγεθος της αποθήκης με στόχο πάλι την μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για τρεις διαφορετικές διαθέσιμες εκτάσεις γη, 1500 στρεμ. – 2000 στρεμ. – 2500 στρεμ., φαίνονται στους Πίνακες 7.3 και 7.4

Χωρίς Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος			
Έκταση Γης	IRR	Ονομαστική Ισχύς Σταθμού [MW]	Ώρες Αποθήκης
1500	0.1865	42	7
2000	0.1864	63	7
2500	0.1853	74	7

Πίνακας 7.4 Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Έκταση Γης – Χωρίς Περιορισμούς)

Με Περιορισμούς Διείσδυσης Ισχύος			
Έκταση Γης	IRR	Ονομαστική Ισχύς Σταθμού [MW]	Ώρες Αποθήκης
1500	0.131	55	8
2000	0.1282	73	7.5
2500	0.131	95	7

Πίνακας 7.5 Βέλτιστη διαστασιολόγηση Σταθμού (Σταθερή Έκταση Γης – Με Περιορισμούς)

### 7.3 Σύνοψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής, τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων, όταν αυτός λειτουργούσε χωρίς αλλά και με περιορισμούς διείσδυσης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των περιορισμών, ο σταθμός μέχρι τις 18:00 το απόγευμα επιτρεπόταν να δίνει στο δίκτυο μέχρι το 50% της ονομαστικής του ισχύος και από τις 18:00 και μετά μπορούσε να λειτουργεί στις ονομαστικές του τιμές, εφ' όσον είχε αυτή τη δυνατότητα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν Γενετικοί Αλγόριθμοι για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του σταθμού ως προς τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης. Προκειμένου να γίνει αυτό υιοθετήθηκαν δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, κρατήθηκε σταθερή η ονομαστική ισχύς του σταθμού και μεταβάλλονταν το μέγεθος της ενεργειακής αποθήκης καθώς και η έκταση του σταθμού. Στο δεύτερο σενάριο, κρατήθηκε σταθερή η έκταση του σταθμού και μεταβάλλονταν η ονομαστική ισχύς του σταθμού και το μέγεθος της αποθήκης.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω προσομοιώσεις, μοντελοποιήθηκε η λειτουργία του Ηλιακού Πεδίου, η λειτουργία του συστήματος αποθήκης (αποθήκη θερμικής ενέργειας με χρήση δύο δεξαμενών, θερμή – ψυχρή, και χρήση άλατος ως μέσο αποθήκευσης), η λειτουργία του κύκλου Ισχύος (παραδοσιακός κύκλος Rankine) καθώς και η λειτουργία του συστήματος ψύξης (υδρόψυκτο σύστημα ψύξης).

### 7.4 Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Σε μελλοντική εργασία, θα μπορούσε να γίνει μία μελέτη – έρευνα σε κάποιο απομονωμένο νησιωτικό σύστημα (π.χ. Κρήτη, Ρόδος), των ποσών ισχύος που «απορροφά» το ηλεκτρικό δίκτυο από φωτοβολταϊκά, αιολικά και συμβατικές πηγές Ηλεκτρισμού. Συνδυάζοντας αυτές τις παραγωγές και ταυτόχρονα τους περιορισμούς των τεχνικών ελαχίστων των συμβατικών πηγών, θα προέκυπτε το μέγιστο ποσό ισχύος που θα μπορούσε να «απορροφήσει» το δίκτυο από τους Ηλιοθερμικούς σταθμούς ανά ώρα. Το ποσό αυτό θα μοιραζόταν σε «υποψήφιους» μελλοντικούς Ηλιοθερμικούς σταθμούς, ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του καθενός, και έτσι θα προέκυπταν ακριβείς περιορισμοί ισχύος για τον καθένα, όπου και θα εφαρμόζονταν. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την μέγιστη αξιοποίηση των Ηλιοθερμικών σταθμών.

## Βιβλιογραφία

- [1] Denholm, P. and Kulcinski, G.L. “Life Cycle Energy Requirements and Greenhouse Gas Emission from Large Scale Energy Storage Systems”. *Energy Conversion and Management Journal*, Vol. 45 (2004), pp: 2153-2172.
- [2] Keith Lovegrove, Andreas Luzzi, “Solar Thermal Power Systems”.
- [3] Phase I (Part I): “Review of CSP Technologies and Cost Drivers Overview. Consulting services for a Study of local capabilities to manufacture and supply components for development of Concentrating Solar thermal Power plants (CSP) in India”.
- [4] Solar Millennium, “The parabolic trough power plants from Andasol 1 to 3”.
- [5] Franz Trieb, Christoph Schillings, Marlene O’Sullivan, Thomas Pregger, Carsten Hoyer – Klick, (2009), “Global potential of concentrating solar power”.
- [6] Cost Reduction Study for Solar Thermal Power Plants, FINAL REPORT May 5, 1999. Prepared by Enermodal Engineering Limited 650 Riverbend Drive Kitchener, ON N2K 3S2.
- [7] A. Fernandez-Garcia, E.Zarza, L. Valenzuela, M. Perez (2010), “Parabolic trough solar collectors and their applications”.
- [8] David W. Kearney (2007), “Parabolic trough collector overview”.
- [9] “Solar power tower”.
- [10] “Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Θερμοηλιακών Σταθμών και των Θερμοκλινών Αποθήκευσης”, Διπλωματική Εργασία, Ευστράτιος Γ. Παπουτσή, 2010.
- [11] M.J. Montes, A. Abanades, J.M. Martinez-Val, “Performance of a Direct Steam Generation Solar Thermal Power Plant for Electricity Production as a function of the Solar Multiple”, *ScienceDirect*, Vol. 83 (2008), pp: 679 – 689.
- [12] Angela M. Patnode, “Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants”, University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [13] Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, Κοσμάς Α. Καββαδίας, “Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας”, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2001.
- [14] Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, Κοσμάς Α. Καββαδίας, Γεώργιος Χ. Σπυρόπουλος, “Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας”, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2007.

- [15] Marc Medrano, Antoni Gil, Ingrid Martorell, Xavi Patau, Luisa F. Cabeza, (2009), “State of the art on high – temperature thermal energy storage for power generation”. Part 2 – Case studies.
- [16] James E. Pacheco, Steven K Showalter, William J. Kolb, “Development of a molten – salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants”, 2009.
- [17] Zhen Yang, Suresh V. Garimell, “Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten – salt thermocline”, Vol. 84 (2010), pp: 974:985.
- [18] Michael Geyer, ‘Potential of solar trough installations in Europe 10”.
- [19] SENER (2007), “Andasol 1&2 50 MW, 7 hrs molten salt heat storage”.
- [20] Ray Dracker, Klaus-Juergen Riffelmann (2008), “Integrated thermal storage for concentrating solar power”.
- [21] [http://www.solarmillennium.de/index\\_lang2.html](http://www.solarmillennium.de/index_lang2.html)
- [22] “Thermal Storage Commercial Plant Design Study for a 2-Tank Indirect Molten Salt System”. Final Report May 13, 2002 — December 31, 2004. B. Kelly, Nexant, Inc. San Francisco, California. D. Kearney, Kearney & Associate,s Vashon, Washington.
- [23] J.M. Andujar, F. Rosa, M. Geyer, “CESA-1 Thermal Storage System Evaluation”, Plataforma Solar de Almeria, Vol. 46 (1991): 305-312.
- [24] Yunus A. Cengel, “Θερμοδυναμική για Μηχανικούς”, Τόμος Α, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε, Θεσσαλονίκη 2003.
- [25] Yunus A. Cengel, “Θερμοδυναμική για Μηχανικούς”, Τόμος Β, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε, Θεσσαλονίκη 2003.
- [26] Barlett, Robert L., “Steam Turbine Performance and Economics”, New York: McGraw-Hill,1958.
- [27] YunusA., Cengel, MichaelA., Boles, “Thermodynamics”, McGraw-Hill Education-Europe, 2002.
- [28] <http://www.energymanagertraining.com>
- [29] <http://www.aquachem.gr>
- [30] “Συστήματα ψύξης – Πύργοι ψύξης”, Παρουσίαση Ν. Ανδρίτσος.
- [31] D. Goldberg, “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, 1989”.

- [32] Ευστράτιος Γεωργόπουλος, Σπυρίδων Λυκοθανάσης, “Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους”, Πάτρα, 1999.
- [33] Φασουλάκης Παντελής, “Σχεδίαση βροχοκεραίων Yagi-Uda με χρήση του λογισμικού πακέτου SuperNEC και βελτιστοποίηση τους με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων”, Ε.Μ.Π. (2009).
- [34] Μαράτος, “Τεχνικές Βελτιστοποιήσεως (σημειώσεις)”, Ε.Μ.Π., 1990.
- [35] Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox™ 2 User’s Guide, MATLAB, the Mathworks.
- [36] Π. Κάπρος, Κ. Ντελκής, “Οικονομική ανάλυση επιχειρήσεων”, Ε.Μ.Π. (2001).
- [37] Βρεττός Ευάγγελος, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου”, Ε.Μ.Π. (2010).
- [38] ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, ΝΟΜΟΣ ΥΠ’ ΑΡΙΘ. 3851, Ιούνιος 2010.
- [39] M.J. Montes, A. Abanades, J.M. Martinez-Val, M. Valde’s., “Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors”, Vol. 83 (2009), pp: 2165 – 2176.

