

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ENGINEERING EQUATION SOLVER»

Επιμέλεια: Παναγιώτα Μιχαλάκη
Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Σχημάτων	4
Λίστα Πινάκων	6
Λίστα Διαγραμμάτων	6
Ευχαριστίες	9
Περίληψη	11
Summary	13
1 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα	14
1.1 Γενικά	14
1.2 Τεχνολογίες Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων	14
1.3 Μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες	16
1.3.1 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες	16
1.3.2 Συλλέκτες κενού	20
1.4 Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες	23
1.4.1 Σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές τύπου CPC.....	24
1.4.2 Συλλέκτες με επιμήκεις παραβολικούς συγκεντρωτές τύπου PTC.....	25
1.4.3 Συλλέκτες με παραβολοειδείς συγκεντρωτές	26
1.4.4 Συλλέκτες με κεντρικό δέκτη	28
1.4.5 Γραμμικός ανακλαστής Fresnel (τύπου LFR - Linear Fresnel Reflector)	29
2 Βελτιστοποίηση.....	31
2.1 Εισαγωγή στις μεθόδους Βελτιστοποίησης.....	31
2.2 Βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων - Μέτωπο Pareto	32
2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	33
3 Γενετικοί Αλγόριθμοι	35
3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Βασικές έννοιες.....	36
3.3 Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου.....	36
3.4 Η δομή του Γενετικού Αλγορίθμου.....	37
3.4.1 Κωδικοποίηση	38
3.4.2 Αρχικοποίηση.....	38
3.4.3 Αποκωδικοποίηση.....	38
3.4.4 Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση.....	39
3.4.5 Αναπαραγωγή	39
3.5 Κύκλος ενός Γενετικού Αλγορίθμου.....	42
3.6 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων	42
4 Μαθηματικό Μοντέλο	45
4.1 Γενικές πληροφορίες.....	45
4.2 Κατάστρωση Εξισώσεων	47
5 Εισαγωγή στο EES.....	54
5.1 Γενικές πληροφορίες για το EES [27]	54
5.2 Έναρξη του προγράμματος-Πρώτη επαφή με το πρόγραμμα [27]	55
5.3 Μεταφέροντας το πρόβλημά μας στο EES	63

6	Αποτελέσματα - Σχολιασμός.....	75
6.1	Μελέτη αλληλεπίδρασης διαφόρων παραμέτρων, επί του αρχικού προβλήματος. ($A_c=2m^2$, $W_{ol}=1m$, $L=2m$)	75
6.1.1	Επίδραση του συντελεστή εκπομπής απορροφητικής πλάκας (e_p)	75
6.1.2	Επίδραση του αριθμού των σωλήνων νερού (N).....	76
6.1.3	Επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T).....	77
6.1.4	Επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$).....	79
6.1.5	Επίδραση του διακένου (sp)	80
6.1.6	Επίδραση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης (k_{ins}).....	81
6.1.7	Επίδραση καλύμματος	81
6.2	Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων (W_{ol} , L , sp , d_{ins}) μέσω διαγραμμάτων για $A_c=2m^2$, $G_T=1000W/m^2$, $N=10$, $e_p=0,1$	82
6.2.1	Επίδραση του πλάτους του συλλέκτη (W_{ol}).....	83
6.2.2	Επίδραση του μήκους του συλλέκτη (L)	84
6.2.3	Επίδραση του διακένου μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας (sp) ...	85
6.3	Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων W_{ol} και L , μέσω διαγράμματος για $G_T=1000W/m^2$, $N=10$, $e_p=0,1$	85
6.3.1	Επίδραση της συλλεκτικής επιφάνειας A_c (και κατ'επέκταση του πλάτους και του μήκους του συλλέκτη)	85
6.4	Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων	86
6.4.1	Παράμετροι βελτιστοποίησης: Πλάτος συλλέκτη W_{ol} και διάκενο καλύμματος - απορροφητικής πλάκας sp (για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια $A_c=2m^2$)	86
6.4.2	Παράμετροι βελτιστοποίησης: Πλάτος συλλέκτη W_{ol} και συλλεκτική επιφάνεια A_c	89
6.5	Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων με τη βοήθεια του «Μετώπου Pareto»..	91
6.6	Σύνοψη των μεθόδων βελτιστοποίησης.....	93
7	Συμπεράσματα - Προοπτικές	94
7.1	Βασικά συμπεράσματα	94
7.2	Προοπτικές βελτίωσης.....	96
8	Βιβλιογραφία	98

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1:	Κύρια μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη	16
Σχήμα 1.2:	Μετάδοση θερμότητας σε επίπεδο ηλιακό συλλέκτη [18]	17
Σχήμα 1.3:	Τύποι απορροφητικών πλακών (α) Αγωγοί διαμορφωμένοι στο σώμα της απορροφητικής επιφάνειας (b) (c) Σωλήνες σε επαφή με την πλάκα απορρόφησης (d) Σωλήνες σε επαφή με πτερύγια	18
Σχήμα 1.4:	Είδη μονωτικών υλικών (α) Υαλοβάμβακας (b) Πετροβάμβακας (c) Πολυουρεθάνη (d) Εξηλασμένη πολυστερίνη	19
Σχήμα 1.5:	Σωλήνας κενού	21

Σχήμα 1.6: Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού	21
Σχήμα 1.7: Σχηματική παράσταση μεταφοράς θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο στο νερό χρήσης.....	22
Σχήμα 1.8: Σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής τύπου CPC.....	25
Σχήμα 1.9: Επιμήκης παραβολικός συγκεντρωτής τύπου PTC.....	25
Σχήμα 1.10: Ηλιακό πεδίο παραβολικών ηλιακών συλλεκτών τύπου PTC 30 MW στο Kramer Juction της Καλιφόρνια [28].....	26
Σχήμα 1.11: Παραβολοειδής συγκεντρωτής.....	27
Σχήμα 1.12: Παραβολοειδείς συγκεντρωτές με μηχανές Stirling στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar de Almeria [29] της Ισπανίας. Κάθε δίσκος παράγει 10kW ηλεκτρικής ισχύος [19]	27
Σχήμα 1.13: Ηλιακός σταθμός με κεντρικό δέκτη στην πόλη Φουέντες της Ανδαλουσίας, στην Ισπανία συνολικής επιφάνειας 480 στρεμμάτων, με 2650 ηλιοστάτες και παραγόμενη ισχύ 19,9MW [30]	28
Σχήμα 1.14: Γραμμικός ανακλαστής Fresnel με δυο γραμμικούς δέκτες.....	29
Σχήμα 1.15: Γραμμικός ανακλαστής Fresnel με έναν γραμμικό δέκτη	29
Σχήμα 1.16: Ηλιακός σταθμός τεχνολογίας Fresnel ισχύος 30MW, της εταιρείας Novatec Solar στην Ισπανία [31]	30
Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του μετώπου Pareto για την περίπτωση δυο στόχων.....	32
Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση διασταύρωσης δύο γονέων για να προκύψουν δύο απόγονοι [9]	40
Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση μετάλλαξης	41
Σχήμα 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη	45
Σχήμα 5.1: Καρτέλα έναρξης προγράμματος.....	55
Σχήμα 5.2: Παράθυρο Εξισώσεων (Equations Window).....	56
Σχήμα 5.3: Γραμμή Μενού και Γραμμή Εργαλείων	56
Σχήμα 5.4: Βοηθητικό παράθυρο αναζήτησης πληροφοριών	58
Σχήμα 5.5: Παράθυρο εμφάνισης του κώδικα με μαθηματικοποιημένο τρόπο (Formatted Equations)	60
Σχήμα 5.6: Πίνακας διάταξης στοιχείων (Array Table)	61
Σχήμα 5.7: Πίνακας εμφάνισης ενδιάμεσων τιμών μετά από υπολογισμό ολοκληρώματος (Integral Table)	61
Σχήμα 5.8: Παράθυρο πρόχειρων υπολογισμών (Calculator)	62
Σχήμα 5.9: Εισαγωγή δεδομένα στο Equation Window του EES.....	64
Σχήμα 5.10: Εμφάνιση δεδομένων με μαθηματικοποιημένη μορφή στο παράθυρο Formatted Equations	65
Σχήμα 5.11: Εισαγωγή εξισώσεων στο παράθυρο εξισώσεων.....	66
Σχήμα 5.12: Εμφάνιση εξισώσεων στο Formatted Equations	67
Σχήμα 5.13: Έλεγχος σύνταξης και πληρότητας του συστήματος.....	68
Σχήμα 5.14: Παράθυρο προόδου υπολογισμών	68
Σχήμα 5.15: Παράθυρο αποτελεσμάτων	69
Σχήμα 5.16: Παράθυρο επεξεργασίας της εμφάνισης των αποτελεσμάτων	70

Σχήμα 5.17: Παράθυρο Key Variables.....	71
Σχήμα 5.18: Καρτέλα για τη δημιουργία παραμετρικού πίνακα.....	72
Σχήμα 5.19: Εμφάνιση μηνύματος ότι στην παράμετρο έχει δοθεί ήδη κάποια τιμή.....	73
Σχήμα 5.20: Καρτέλα δημιουργίας παραμετρικού πίνακα.....	73
Σχήμα 5.21: Καρτέλα δημιουργίας διαγράμματος.....	74
Σχήμα 6.1: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (α) με 1 κάλυμμα (b) χωρίς κάλυμμα (c) με 2 καλύμματα.....	82
Σχήμα 6.2: Παράθυρο επεξήγησης για τη διαδικασία βελτιστοποίησης.....	87
Σχήμα 6.3: Παράθυρο έναρξης διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	87
Σχήμα 6.4: Παράθυρο αποτελεσμάτων μετά από βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης (η_{th}) ως προς το πλάτος του συλλέκτη (W_{oi}) και το διάκενο (sp).....	88
Σχήμα 6.5: Παράθυρο αποτελεσμάτων μετά από βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης (η_{th}) ως προς το πλάτος του συλλέκτη (W_{oi}) και τη συλλεκτική επιφάνεια (A_c).....	90

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3-1: Ορολογία που χρησιμοποιείται στους Γενετικούς Αλγορίθμους.....	36
Πίνακας 5-1: Δεδομένα αρχικού προβλήματος.....	63
Πίνακας 5-2: Τα κυριότερα αποτελέσματα του αρχικού προβλήματος.....	71
Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με ΓΑ για $A_c=2m^2$ και παραμέτρους βελτιστοποίησης το πλάτος του συλλέκτη W_{oi} και το διάκενο καλύμματος- απορροφητικής πλάκας sp	89
Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με ΓΑ και παραμέτρους βελτιστοποίησης το πλάτος του συλλέκτη W_{oi} και τη συλλεκτική επιφάνεια A_c	90
Πίνακας 6-3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σχεδιαστικών παραμέτρων με τη βοήθεια του Μετώπου Pareto.....	92
Πίνακας 6-4: Κύρια συγκεντρωτικά αποτελέσματα από διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης....	93

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6-1: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$) για διάφορες τιμές του συντελεστή εκπομπής της απορροφητικής πλάκας (e_p).....	75
Διάγραμμα 6-2: Καμπύλη μεταβολής του συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών (U_L) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$) για επιλεκτικό ($e_p=0,1$) και μη επιλεκτικό ($e_p=0,95$) συλλέκτη.....	76
Διάγραμμα 6-3: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$) για διάφορες τιμές του αριθμού των σωλήνων νερού (N).....	77
Διάγραμμα 6-4: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της μεταβλητής x για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T).....	78

Διάγραμμα 6-6: Καμπύλες μεταβολής του παράγοντα θερμικής απολαβής (F_R) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου νερού (T_{fin}) για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T)	78
Διάγραμμα 6-7: Καμπύλη μεταβολής του παράγοντα απόδοσης (F') συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού (T_{fin})	79
Διάγραμμα 6-8: Καμπύλη μεταβολής του αριθμού Reynolds (Re) συναρτήσει της μεταβλητής x λόγω εξάρτησης της καμπύλης μεταβολής του δυναμικού ιξώδους (μ) συναρτήσει της μεταβλητής x	80
Διάγραμμα 6-9: Καμπύλη μεταβολής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-απορροφητή δια συναγωγής ($h_{c,pc}$) συναρτήσει της απόστασης μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας (sp)	80
Διάγραμμα 6-10: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης	81
Διάγραμμα 6-11: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης (η_{th}) συναρτήσει της μεταβλητής x για συλλέκτη με 1 κάλυμμα, με 2 καλύμματα ή χωρίς κάλυμμα.....	82
Διάγραμμα 6-12: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του πλάτους του (W_{oi})	83
Διάγραμμα 6-13: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του πλάτους του (W_{oi}) που εντοπίζει ακριβώς που παρατηρείται μέγιστο πλάτος	84
Διάγραμμα 6-14: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του μήκους του (L).....	84
Διάγραμμα 6-15: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της απόστασης μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας (sp)	85
Διάγραμμα 6-16: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του μήκους του (L) για διάφορες τιμές του πλάτους (W_{oi}).....	86
Διάγραμμα 6-17: Διάγραμμα κατά Pareto για διαφορετικά διάκενα ($15\text{mm} < sp < 50\text{mm}$) και πάχη μόνωσης ($10\text{mm} < \delta_{ins} < 70\text{mm}$)	91
Διάγραμμα 6-18: Διάγραμμα εύρεσης βελτιωμένης λύσης από το μέτωπο Pareto.....	92
Διάγραμμα 6-19: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της μεταβλητής x που προέκυψαν για διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης	93

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Τζιβανίδη, Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για τη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια αυτής αλλά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Μπέλλο για τη συνεχή επίβλεψη και άριστη συνεργασία σε όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο να παρουσιάσει βελτιωμένες σχεδιαστικές παραμέτρους ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με τη βοήθεια του λογισμικού Engineering Equation Solver. Για το υπολογιστικό μέρος της εργασίας, καταστρώνεται ένα αρχικό πρόβλημα και πάνω σε αυτό μελετάται η αλληλεπίδραση διαφόρων παραμέτρων μεταξύ τους. Παράλληλα ερευνάται η βελτιστοποίηση ορισμένων από τις παραμέτρους που σχετίζονται με το σχεδιαστικό μέρος του συλλέκτη όπως είναι το μήκος και το πλάτος του συλλέκτη, το διάκενο που δημιουργείται μεταξύ του καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας καθώς και ο όγκος του γενικότερα. Η δομή της παρούσας διπλωματικής οργανώνεται ως εξής:

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια γενική εισαγωγή στα θερμικά ηλιακά συστήματα. Παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες σύγχρονων ηλιακών συλλεκτών καθώς και η αρχή λειτουργίας και εφαρμογές κάθε κατηγορίας. Επίσης παρατίθενται τα κύρια μέρη που απαρτίζουν έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, τα κύρια χαρακτηριστικά του καθώς και τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα εντός του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τη βελτιστοποίηση γενικότερα. Παρουσιάζονται επιγραμματικά διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης ενώ περιγράφεται συνοπτικά και η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με τη μέθοδο του μετώπου Pareto που χρησιμοποιήθηκε σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης γίνεται μια ανασκόπηση επί της βιβλιογραφίας με σύντομη αναφορά των εργασιών που μελετήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται τους Γενετικούς Αλγορίθμους που αποτέλεσαν βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης για την εξαγωγή ορισμένων αποτελεσμάτων. Αναφέρονται οι βασικές έννοιες των Γενετικών Αλγορίθμων, τα χαρακτηριστικά, η δομή και τα πλεονεκτήματά τους και περιγράφεται η διαδικασία πραγματοποίησης ενός κύκλου Γενετικού Αλγορίθμου.

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συλλέκτη παρουσιάζεται εκτενώς στο τέταρτο κεφάλαιο. Εδώ αρχικά γίνεται αναφορά στη φυσική ερμηνεία αδιάστατων αριθμών που χρησιμοποιήθηκαν (Reynolds, Prandtl, Nusselt και Rayleigh), ενώ παρουσιάζεται και ο συμβολισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά όλες οι εξισώσεις που λαμβάνουν μέρος στην παρούσα εργασία, ακολουθώντας μια λογική σειρά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται γενικές πληροφορίες και οι δυνατότητες του λογισμικού Engineering Equation Solver. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στο περιβάλλον του προγράμματος και επεξηγούνται αναλυτικά οι βασικές λειτουργίες του. Επιπρόσθετα περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε βήμα προς βήμα για την κατάστρωση του προβλήματος πάνω στο πρόγραμμα.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση

του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ύστερα από διάφορα σενάρια, μέσα από διαγράμματα ή πίνακες. Στην αρχή γίνεται η παρουσίαση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων πάνω στο αρχικό πρόβλημα, δηλαδή χωρίς βελτιστοποίηση. Έπειτα δίνονται αποτελέσματα, μέσα από διερεύνηση που προέκυψε, με διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο απαριθμούνται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και μελλοντικές προοπτικές.

Summary

The aim of the present diploma thesis is to display improved design parameters of a flat solar collector using the software of Engineering Equation Solver. An initial problem is structured for the computational part of the thesis and the interaction of various parameters is being studied. Furthermore the optimization of certain parameters related to the design of the collector as the length and width, the gap between the cover and the absorber plate and the volume of the collector investigated. The structure of this thesis is organized as follows:

The first chapter is a general introduction to solar thermal systems. It deals with the basic types of modern solar collectors as well as the principle of operation and applications of each category. It also states the main parts that constitute a flat plate collector, its main characteristics and thermal phenomena that take place within it.

The second chapter provides information about optimization in general. There is a reference to some optimization methods and a summarized description about multi-criteria optimization and especially the method of Pareto front which was used in following chapter. Also a review on the literature is done with a brief mention of the works which were studied for the preparation of this.

The third chapter deals with Genetic Algorithms which were a basic optimization tool to export certain results. It is explained the key concepts of Genetic Algorithms, their characteristics, the structure and their advantages and is also described the procedure for making a circle of Genetic Algorithm.

The mathematical model used for the simulation of the solar collector is shown in detail in the fourth chapter. Initially, it is explained the physical interpretation of dimensionless numbers which were used (Reynolds, Prandtl, Nusselt and Rayleigh), and presented a symbolism of geometric characteristics of the flat solar collector. Next there is a description in detail about all the equations involved in this work, following a logical sequence.

In the fifth chapter general information and features of the software Engineering Equation Solver is given. First there is an introduction into the environment of the program and explained in detail the basic functions. In addition the procedure followed step by step for the development of the problem over the program is described extensively.

Chapter six comprises the results obtained from the simulation of flat plate collector after several scenarios through charts or tables. At first there is an examination of the effect of some factors for the initial problem without optimization. Secondly is provided results through investigation with various optimization techniques.

In the seventh and last chapter the conclusions drawn from the present work and future prospects are listed.

1 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

1.1 Γενικά

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα συνδυάζουν διάφορες τεχνολογίες και προσφέρουν ενέργεια για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, καθιστώντας τα αποδοτικά, αξιόπιστα και ανταγωνιστικά. Η θερμότητα από ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων θέρμανση νερού χρήσης, θέρμανση χώρων, θερμότητα για βιομηχανικές διεργασίες, κλιματισμό, παραγωγή ατμού για βιομηχανικές εφαρμογές, ξήρανση.

Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, το μέγεθός τους, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής κ.τ.λ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικού τύπου ηλιακά θερμικά συστήματα.

Στην Ελλάδα, η οποία αποτελεί παγκοσμίως μια από τις πρωτοπόρες χώρες στη χρήση θερμικών ηλιακών, η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των συστημάτων είναι κυρίως θερμοσιφωνικά (για θέρμανση νερού χρήσης). Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σημαντική εξαγωγική δραστηριότητα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 2007 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ηλιακών θερμικών συστημάτων σε λειτουργία ήταν ίση με 146.8 GW_{th} που αντιστοιχούν σε 209.7 εκ.μ² συλλεκτών. Από αυτά το 82% περίπου προέρχονται από επίπεδους συλλέκτες. Ενώ στα τέλη του 2008 η συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών στην Ελλάδα ανέρχονταν σε 3,87 εκ.μ². [4] [22]

Επιπρόσθετα με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας αποφεύγεται η χρήση ορυκτών καυσίμων. Το περιβαλλοντικό όφελος από τη χρήση ηλιακών θερμικών συστημάτων προκύπτει από την εξοικονόμηση ενέργειας και κατ' επέκταση τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μια μικρή αναφορά στα περιβαλλοντικά οφέλη που απορρέουν από τη χρήση των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων δείχνει ότι επιτυγχάνονται τα εξής: [17]

- Εξοικονόμηση καυσίμων που ισοδυναμεί με 50-70 kg πετρελαίου/m² συλλέκτη ετησίως
- Μείωση εκπομπών CO₂ άνω των 750 kg/m² συλλέκτη ετησίως σε περίπτωση υποκατάστασης ηλεκτρικού ρεύματος
- Μείωση εκπομπών CO₂ άνω των 250kg CO₂/m² συλλέκτη ετησίως σε περίπτωση υποκατάστασης πετρελαίου

1.2 Τεχνολογίες Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν κυρίως ηλιακούς συλλέκτες και δεξαμενές αποθήκευσης (για δυνατότητα χρήσης σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια όπως τη νύχτα ή όταν έχει συννεφιά) ως χωριστά υποσυστήματα, ενώ η μεταφορά της ενέργειας μέσω ενός θερμαινόμενου ρευστού (νερό, αέρας, λάδι) πραγματοποιείται είτε με φυσική κυκλοφορία, είτε με εξαναγκασμένη (χρήση αντλιών-κυκλοφορητών, βαλβίδων και συστημάτων ελέγχου).

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Ένας ηλιακός συλλέκτης διαφέρει σε πολλά πράγματα από τους περισσότερους συμβατικούς εναλλάκτες. Στους τελευταίους η μεταφορά θερμότητας γίνεται από ρευστό σε ρευστό ενώ ο ρόλος της ακτινοβολίας δεν είναι σημαντικός. Αντίθετα σε έναν ηλιακό συλλέκτη η ενέργεια μεταφέρεται με την μορφή ακτινοβολίας από μια πολύ μακρινή πηγή (ήλιος), σε ένα ρευστό που ρέει μέσω του συλλέκτη και καθιστά το εργαζόμενο μέσο.

Τα ιδιαίτερα προβλήματα που συναντώνται κατά την ανάλυση των ηλιακών συλλεκτών σχετίζονται με τις χαμηλές και συνεχώς μεταβαλλόμενες τιμές της προσπίπτουσας ενέργειας και την σχετικά μεγάλη σημασία της μετάδοσης θερμότητας διάκτινοβολίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ροή προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι στην καλύτερη περίπτωση 1100W/m^2 περίπου (υπενθυμίζεται ότι η ηλιακή σταθερά είναι $G_{sc}=1353\text{W/m}^2$). Επομένως το ηλιακό δυναμικό το οποίο αξιοποιείται με την μορφή θερμότητας -αν και σημαντικό- απέχει πολύ από την πλήρη εκμετάλλευσή του.[1]

Οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Μη συγκεντρωτικοί
 - Επίπεδοι συλλέκτες
 - Συλλέκτες κενού
- Συγκεντρωτικοί
 - Σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (CPC - Compound Parabolic Concentrators)
 - Με επιμήκεις παραβολικούς συγκεντρωτές (PTC - Parabolic Trough Concentrators)
 - Με παραβολοειδείς συγκεντρωτές
 - Γραμμικός ανακλαστής Fresnel (τύπου LFR - Linear Fresnel Reflector)
 - Με κεντρικό δέκτη

Επίσης οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται σε ορισμένες κατηγορίες με βάση την θερμοκρασία λειτουργίας: [1]

- Χαμηλής θερμοκρασίας ($< 80^\circ\text{C}$) → Επίπεδοι συλλέκτες
- Μέσης θερμοκρασίας ($80 \div 250^\circ\text{C}$) → Συλλέκτες με σωλήνες κενού
- Υψηλής θερμοκρασίας ($>250^\circ\text{C}$) → Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν την ίδια επιφάνεια για τη συλλογή και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν δέκτη που αποτελεί μια μικρότερη επιφάνεια απορρόφησης χρησιμοποιώντας ανακλαστικές επιφάνειες ή διαθλαστικούς φακούς, αυξάνοντας έτσι την ροή της απορροφούμενης ακτινοβολίας. [2]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.

1.3 Μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες

1.3.1 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες

1.3.1.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών σε σχέση με τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

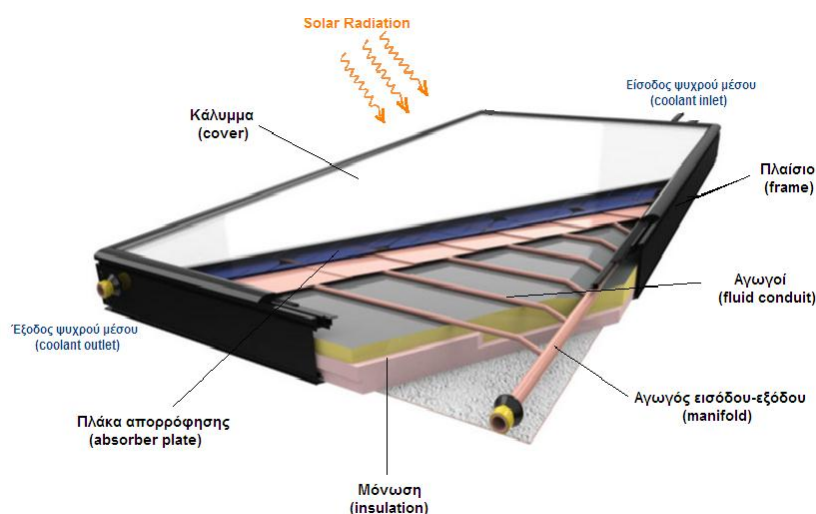
- Χρησιμοποίηση σε εφαρμογές που απαιτούν απόδοση ενέργειας σε μέσες θερμοκρασίες δηλαδή μέχρι περίπου 80°C πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Εκμετάλλευση τόσο της άμεσης όσο και της διάχυτης ακτινοβολίας.
- Δεν απαιτούν μηχανισμό κίνησης για την παρακολούθηση των ακτινών του ήλιου και συνεπώς είναι μηχανικά απλούστεροι των συγκεντρωτικών συλλεκτών και απαιτούν μικρή μόνο συντήρηση.
- Κύριες εφαρμογές είναι η θέρμανση νερού χρήσης και η θέρμανση κτιρίων, ενώ στις δυνατές εφαρμογές συμπεριλαμβάνεται ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση.[3]

1.3.1.2 Κύρια μέρη

Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι τα εξής:

- Διαφανές κάλυμμα που αποτελείται από ένα ή περισσότερα καλύμματα (cover).
- Απορροφητής ή πλάκα απορρόφησης (absorber plate) που περιλαμβάνει την απορροφητική επιφάνεια και τους σωλήνες αν πρόκειται για συλλέκτη θέρμανσης υγρού ή τους αεραγωγούς αν πρόκειται για θερμαντήρες αέρος (Fluid conduit).
- Μόνωση της πίσω και των παράπλευρων επιφανειών (side and back insulation).
- Πλαίσιο που περιβάλλει τον συλλέκτη (frame).

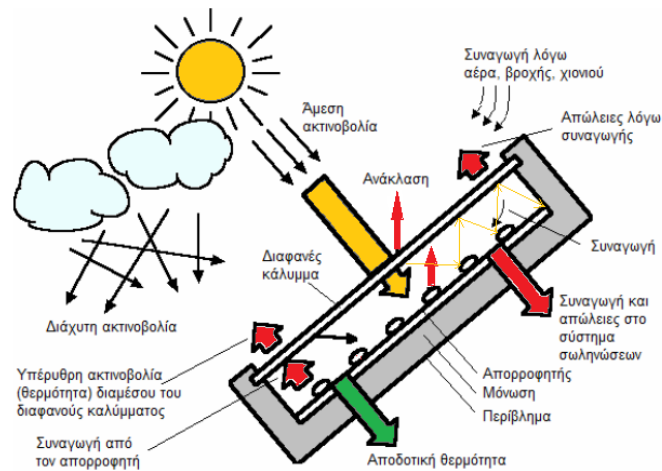
Στο [Σχήμα 1.1](#) που ακολουθεί φαίνεται η τομή ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με τα κύρια μέρη του.



Σχήμα 1.1: Κύρια μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

1.3.1.3 Αρχή λειτουργίας

Ένα μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας διαπερνά το κάλυμμα και προσκρούει στην πλάκα απορρόφησης. Όπως αναπαρίσταται και στο [Σχήμα 1.2](#) το μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας απορροφάται από τον απορροφητή και τις σωληνώσεις, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται προς τυχαίες κατευθύνσεις και προσκρούει με τη σειρά του στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ανακλώμενης ακτινοβολίας, ανακλάται πάλι πίσω από την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς την πλάκα, με αποτέλεσμα να παγιδεύεται εντός του διακένου (φαινόμενο θερμοκηπίου) και τελικά να απορροφάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την πλάκα και τους αγωγούς. Η θερμότητα που δεσμεύεται από τον απορροφητή μεταφέρεται δια αγωγής στα τοιχώματα των αγωγών και στη συνέχεια δια συναγωγής στο εργαζόμενο μέσο. Το κάτω μέρος του απορροφητή καθώς και η εσωτερική πλευρά του πλαισίου είναι καλά μονωμένα για τη μείωση των θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας και αγωγής.[2]



Σχήμα 1.2: Μετάδοση θερμότητας σε επίπεδο ηλιακό συλλέκτη [18]

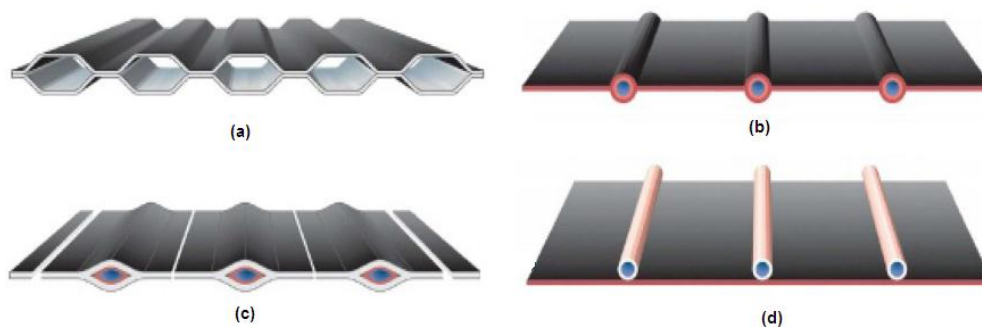
Το υγρό εργαζόμενο μέσο εντός ενός τυπικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη φυσικής κυκλοφορίας ρέει βάσει της αρχής του θερμοσιφώνου, σύμφωνα με την οποία το θερμό υγρό ανέρχεται εντός του συλλέκτη κατευθυνόμενο προς το άνω άκρο της δεξαμενής και τη θέση του παίρνει το ψυχρό υγρό που βρίσκεται στον πυθμένα. Με λίγα λόγια η διαφορά πυκνότητας που δημιουργήθηκε εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας στο εργαζόμενο μέσο είναι η αιτία που προκαλεί τη ροή του μέσου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά τη φυσική αυτή συναγωγή είναι αρκετά μικρές, της τάξεως του 0.08m/s και άρα οι απώλειες, λόγω συνεκτικότητας, αμελητέες.[1]

➤ Το διαφανές κάλυμμα έχει την ιδιότητα να παρουσιάζει μεγάλη διαπερατότητα σε υψηλής συχνότητας ακτινοβολία και χαμηλή διαπερατότητα σε ακτινοβολία χαμηλής συχνότητας. Έτσι επιτρέπει στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία να το διαπεράσει και να την εγκλωβίσει στο διάκενο που δημιουργείται μεταξύ πλάκας και απορροφητή για την εκμετάλλευση του μεγαλύτερου μέρους της, ενώ ταυτόχρονα βοηθά ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες δια συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον, αφού το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από τον απορροφητή επιστρέφει πάλι πίσω και έτσι μειώνονται οι

διαφυγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Η επιλεκτική επιφάνεια διακρίνεται από μεγάλη απορροφητικότητα ($90 \div 95\%$) και ελάχιστη ανάκλαση ($5 \div 15\%$) στα μικρά μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, και από ελάχιστη ανάκλαση στα μεγαλύτερα μήκη κύματος. Δηλαδή απορροφά την ενέργεια του ήλιου χωρίς να την ανακλά. Συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως καλύμματα είναι το απλό γυαλί, γυαλί με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο, γυαλί με πρισματοειδή διαμόρφωση, πολυκαρβονικά και ακρυλικά πλαστικά. Το πάχος του καλύμματος κυμαίνεται συνήθως σε $3 \div 5\text{mm}$. [2]

➤ Ο απορροφητής ή πλάκα απορρόφησης είναι το πλέον σημαντικό κομμάτι ενός ηλιακού συλλέκτη δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που θα πάρει το εργαζόμενο μέσο εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφά. Είναι ένα σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει την απορροφητική επιφάνεια και τους αγωγούς κυκλοφορίας του ρευστού μαζί με το ρευστό. Η απορροφητική επιφάνεια είναι μια επίπεδη μεταλλική επιφάνεια επικαλυμμένη με μαύρο χρώμα ή με στρώμα επιλεκτικής βαφής ώστε να μεγιστοποιεί τη συλλογή θερμικής ισχύος. Επειδή σε γενικές γραμμές η απορροφητικότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της απορροφητικής επιφάνειας δεν είναι μεγάλη, στην επιφάνειά τους τοποθετείται κατάλληλη επικάλυψη υψηλής απορροφητικότητας. Οι συλλέκτες με επιλεκτική βαφή μπορεί να έχουν μέχρι και 30% μεγαλύτερη απόδοση, σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες με απλή μαύρη βαφή λόγω της μείωσης των απωλειών λόγω ανάκλασης. Για χαμηλές θερμοκρασίες (όπως θέρμανση πισινών) χρησιμοποιούνται πλαστικές απορροφητικές πλάκες. Οι μεταλλικές πλάκες κατασκευάζονται συνήθως από υλικά όπως χαλκό, αλουμίνιο ή χάλυβα εξαιτίας του σχετικά χαμηλού κόστους, της υψηλής αντοχής τους και των καλών θερμομηχανικών ιδιοτήτων τους. Η συνήθης απόσταση μεταξύ καλύμματος και απορροφητή κυμαίνεται από $15 \div 25\text{mm}$. Επίσης η αποδοτική λειτουργία του απορροφητή καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό και από την διαμόρφωσή του. Οι πλάκες απορρόφησης απαρτίζονται από επιμέρους λωρίδες (μία λωρίδα για κάθε αγωγό) που κολλούνται μεταξύ τους. Οι κυριότεροι τρόποι διαμόρφωσης είναι είτε σωλήνες σε επαφή με την πλάκα της απορροφητικής επιφάνειας, είτε σωλήνες σε επαφή με πτερύγια, είτε αγωγοί διαμορφωμένοι στο σώμα της απορροφητικής επιφάνειας (τύπου «σάντουιτς»). [4]

Στο Σχήμα 1.3 που ακολουθεί φαίνονται διάφοροι τύποι απορροφητικών πλακών.

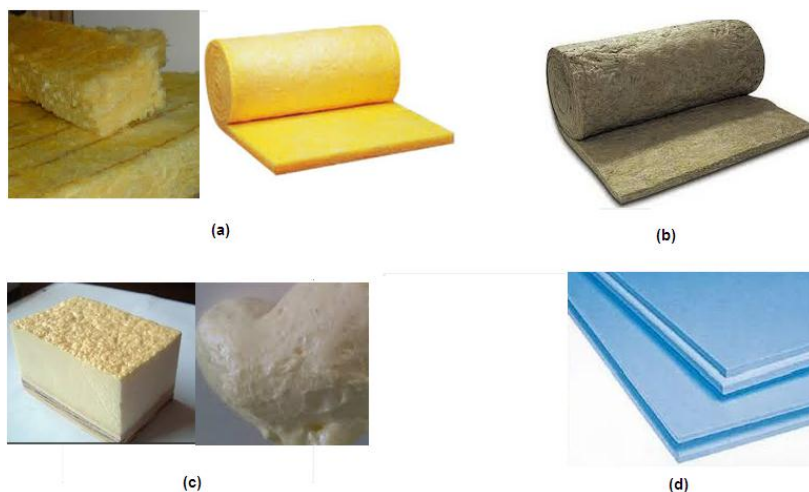


Σχήμα 1.3: Τύποι απορροφητικών πλακών (a) Αγωγοί διαμορφωμένοι στο σώμα της απορροφητικής επιφάνειας (b) (c) Σωλήνες σε επαφή με την πλάκα απορρόφησης (d) Σωλήνες σε επαφή με πτερύγια

Στους σωλήνες κυκλοφορεί ρευστό το οποίο αποτελεί το εργαζόμενο μέσο, όπου απάγει θερμότητα από την απορροφητική πλάκα. Το ρευστό ρέει όπως προαναφέρθηκε βάσει της αρχής του θερμοσιφώνου, σύμφωνα με την οποία το θερμό υγρό ανέρχεται εντός του συλλέκτη κατευθυνόμενο προς το άνω άκρο της δεξαμενής αποθήκευσης και τη θέση του παίρνει το ψυχρό υγρό που βρίσκεται στον πυθμένα. Συνήθως ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται νερό, αέρας ή λάδι.

- Η μόνωση των πλάγιων και πίσω πλευρών του συλλέκτη χρησιμοποιείται ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Ο υαλοβάμβακας υψηλής ποιότητας και ο πετροβάμβακας εμφανίζουν καλές μονωτικές ιδιότητες και αντοχή στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στον συλλέκτη. Όπως όλα τα μονωτικά υλικά είναι απαραίτητο να προστατευθούν από την υγρασία. Χρησιμοποιούνται σε πάχη μέχρι και 50mm καθώς το όφελος για μεγαλύτερα πάχη είναι μηδαμινό. Οι αφροί πολυουρεθάνης και εξηλασμένη πολυστερίνη είναι δημοφιλή μονωτικά υλικά εξαιτίας του πολύ χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, αλλά και της μεγαλύτερης αντοχής τους σε υγρασία. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι δεν αντέχουν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 120°C. Σε γενικές γραμμές ως μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως αφρός πολυουρεθάνης στην πίσω πλευρά με πετροβάμβακα στα πλαϊνά ή δευτερευόντως πετροβάμβακας παντού. [4]

Στο [Σχήμα 1.4](#) διακρίνονται ορισμένα από τα είδη μονωτικών υλικών για τα οποία έγινε λόγος.



Σχήμα 1.4: Είδη μονωτικών υλικών (a) Υαλοβάμβακας (b) Πετροβάμβακας (c) Πολυουρεθάνη (d) Εξηλασμένη πολυστερίνη

- Το πλαίσιο περιβάλλει τον συλλέκτη και τον προστατεύει από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως την σκόνη και την υγρασία ενώ προσφέρει ακαμψία στο σύστημα. Συνήθως είναι μεταλλικό, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις συναντάται και πλαστικό.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται στραμμένοι προς τον Ισημερινό ($\gamma=0^\circ$) και με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά την περίοδο του έτους που ενδιαφέρει η χρησιμοποίηση του συλλέκτη. Συγκεκριμένα:

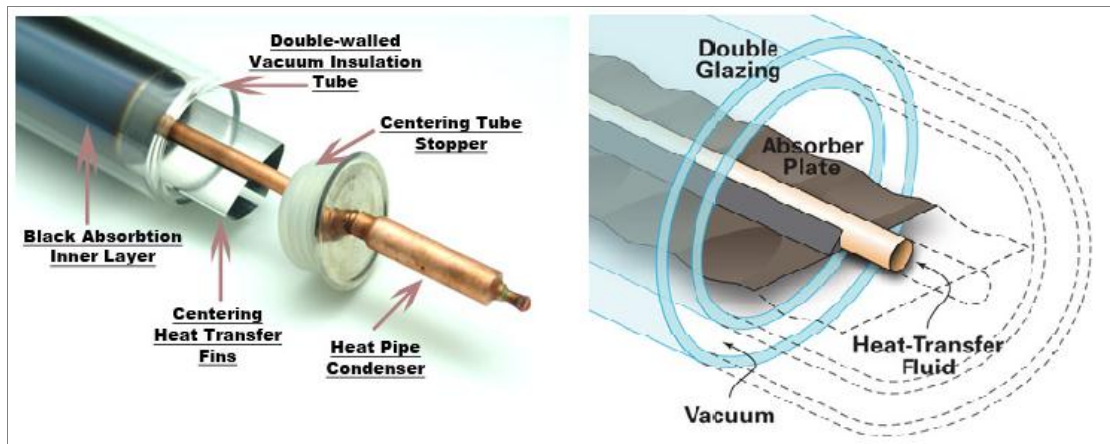
- Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος $\rightarrow \beta=\phi$
- Για μέγιστη ενέργεια κατά τη θερινή περίοδο απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους $\rightarrow \beta=\phi-15^\circ$
- Για μέγιστη ενέργεια κατά τη χειμερινή περίοδο απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους $\rightarrow \beta=\phi+15^\circ$
- Αποκλίσεις από τις παραπάνω τιμές προκαλούν μικρές μειώσεις της ενέργειας, πχ απόκλιση της κλίσης του συλλέκτη κατά $\pm 15^\circ$ μειώνει την ενέργεια κατά 5%.
- Ο βέλτιστος προσανατολισμός του συλλέκτη είναι ο νότιος ($\gamma=0^\circ$) για το βόρειο ημισφαίριο και ο βόρειος ($\gamma=180^\circ$) για το νότιο ημισφαίριο, δηλαδή ο συλλέκτης πρέπει όπως προαναφέρθηκε να είναι στραμμένος προς τον Ισημερινό. Αποκλίσεις μέχρι 20° προκαλούν μικρές μειώσεις της προσπίπτουσας ενέργειας.

1.3.2 Συλλέκτες κενού

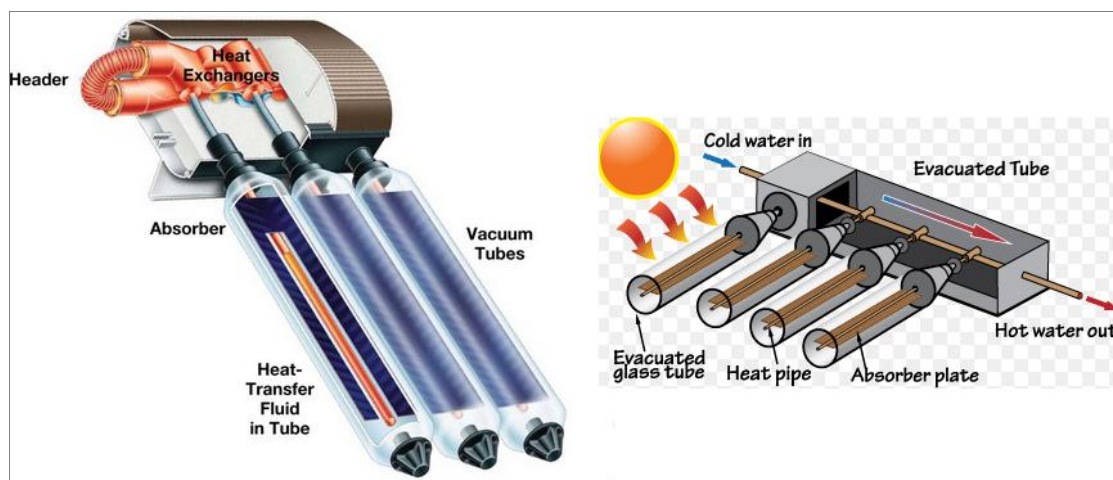
1.3.2.1 Γενική περιγραφή

Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού αποτελούνται από μια συστοιχία παράλληλων σωλήνων κενού τα άκρα των οποίων συνδέονται με έναν κεντρικό αγωγό όπου γίνεται η συναλλαγή θερμότητας. Κάθε σωλήνας κενού αποτελείται από δυο ομόκεντρους σωλήνες (σωλήνας διπλής υάλωσης) μεταξύ των οποίων επικρατούν συνθήκες κενού έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες συναγωγής. Αυτός ο σωλήνας διπλής υάλωσης κατασκευάζεται συνήθως από βιοπυριτικό γυαλί μεγάλης σκληρότητας και αντοχής. Ο εσωτερικός σωλήνας επικαλύπτεται συνήθως με ειδική επιλεκτική επίστρωση υψηλού συντελεστή απορρόφησης και χαμηλού συντελεστή θερμικής ανάκλασης με αποτέλεσμα να μετατρέπει περισσότερο από 92% της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ισχύ. Ο σωλήνας διπλής υάλωσης περιέχει στο εσωτερικό του ένα χάλκινο θερμαντικό αυλό εντός του οποίου βρίσκεται το εργαζόμενο μέσο μεταφοράς θερμότητας.[19]

Στο [Σχήμα 1.5](#) που ακολουθεί φαίνεται πως είναι ένας σωλήνας κενού με βάση την αναλυτική περιγραφή που προηγήθηκε. Ενώ στο [Σχήμα 1.6](#) παρουσιάζεται η συνολική εικόνα του συλλέκτη κενού.



Σχήμα 1.5: Σωλήνας κενού

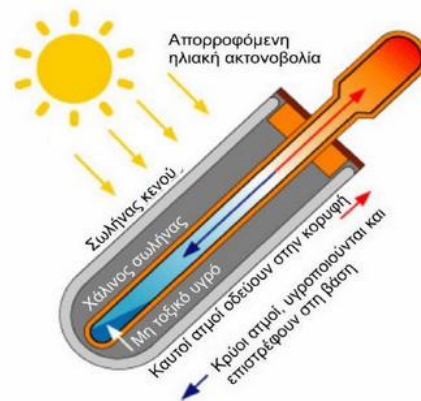


Σχήμα 1.6: Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού

1.3.2.2 Αρχή λειτουργίας

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το σωλήνα διπλής υάλωσης και προσκρούει στο θερμοαπορροφητικό υλικό (ειδική επιλεκτική επίστρωση του εσωτερικού γυάλινου σωλήνα). Εξαιτίας του κυκλικού σχήματος που έχουν οι σωλήνες κενού, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι σχεδόν πάντα κάθετη στην επιφάνειά τους κατά την περιστροφή του ήλιου από την ανατολή προς την δύση, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα του συστήματος. Ταυτόχρονα οι απώλειες ενός τέτοιου συστήματος είναι ελάχιστες εξαιτίας του κενού που δρα ως μόνωση αφού ελαχιστοποιεί τις απώλειες λόγω συναγωγής, γιατί δεν υπάρχει αέρας να κυκλοφορήσει. Το θερμοαπορροφητικό υλικό μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και στη συνέχεια η θερμότητα που συλλέγεται, μεταφέρεται με τη βοήθεια φύλλων αλουμινίου-πτερυγίων στο χάλκινο θερμαντικό αυλό (heat pipe) που περιέχει ένα ανόργανο, μη τοξικό πτητικό ρευστό. Το ρευστό αυτό που έχει χαμηλό σημείο ζέσης (εξατμίζεται στους 25°C), μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό, ανεβαίνει στο υψηλότερο σημείο του αυλού όπου

έρχεται σε επαφή με το ψυχρό νερό του σωλήνα συγκέντρωσης, αποδίδει την ενέργειά του, ψύχεται, συμπυκνώνεται και εν συνεχεία κινείται πάλι προς τα κάτω. Σημειώνεται ότι το επάνω μέρος των σωλήνων κενού έρχεται σε επαφή με το κύκλωμα του νερού προς θέρμανση όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 1.6](#). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται όπως δείχνουν και το [Σχήμα 1.6](#) και [Σχήμα 1.7](#).



Σχήμα 1.7: Σχηματική παράσταση μεταφοράς θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο στο νερό χρήσης

1.3.2.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Η κατασκευή των ηλιακών συλλεκτών κενού τους δίνει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους απλούς συλλέκτες, όπως:

- Πλήρης ηλιακή κάλυψη λόγω του κυλινδρικού σχήματος των σωλήνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απορροφούν ηλιακή ενέργεια περισσότερες ώρες την ημέρα, επομένως υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης του συλλέκτη σε οποιαδήποτε γωνία κλίσης. Αυτό το πλεονέκτημα καθιστά τους συλλέκτες κενού περίπου 40% πιο αποδοτικούς από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.
- Διαθεσιμότητα ζεστού νερού για 350 ημέρες το χρόνο. Ακόμα και σε μέρες με μικρή έως καθόλου ηλιοφάνεια λόγω απορρόφησης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας ακόμα και με χαμηλές θερμοκρασίες ή έντονο αέρα (λόγω καλύτερης θερμικής απομόνωσης του ψυκτικού υγρού, εξ αιτίας του κενού).
- Σχεδόν μηδενική απώλεια θερμότητας στους σωλήνες κενού κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Είναι ιδανικοί για ψυχρά κλίματα αφού έχουν αντοχή σε θερμοκρασίες ως και -40°C λόγω της μη ύπαρξης κυκλώματος νερού.
- Έχουν μεγάλη αντοχή σε καιρικές συνθήκες. Μηδενική αντίσταση στον αέρα διότι δεν υπάρχει ενιαία πλάκα και ο αέρας διαφεύγει ανάμεσα στις σωλήνες.
- Σχεδόν μηδενική συντήρηση λόγω της τεχνολογίας vacuum και της μη χρήσης νερού ως ρευστού μεταφοράς.
- Ικανοποιητική απόδοση ακόμα και σε ακραίες συνθήκες κρύου (-18°C).
- Ο κάθε σωλήνας κενού είναι ένα κλειστό κύκλωμα, ανεξάρτητο από το νερό

χρήσης. Επομένως αν καταστραφεί κάποιος σωλήνας δεν θα υπάρχει διαρροή νερού, ενώ ο συλλέκτης θα συνεχίζει να θερμαίνει κανονικά το κύκλωμα νερού.

- Λόγω του κλειστού κυκλώματος και της μικρής ποσότητας νερού που περνά μέσα από τον εναλλάκτη, μειώνεται η ισχύς των κυκλοφορητών με αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Κύριο μειονέκτημα των συλλεκτών κενού είναι ότι παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες λόγω του κενού που πρέπει να δημιουργηθεί και της συνεργασίας που πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ διαφορετικών υλικών στη θέρμανση και ψύξη. Επίσης η δυσκολία μεταφοράς θερμότητας από τον απορροφητή στο θερμικό φορέα λόγω του μεγάλου μήκους αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα. Για το λόγο αυτό έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και υψηλή τιμή πώλησης.[5]

1.4 Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

Όταν είναι επιθυμητή η απόδοση της ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες ή γενικότερα τους μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες, μπορεί να γίνει χρήση των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Σε αυτούς οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται με συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρή επιφάνεια απορρόφησης, μειώνοντας έτσι και τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Η συγκέντρωση επιτυγχάνεται με παρεμβολή μιας ανακλαστικής ή διαθλαστικής συσκευής μεταξύ της πηγής της ακτινοβολίας (δηλαδή τον ήλιο) και της επιφάνειας απορρόφησης. [3]

Αναλυτικότερα οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες συγκεντρώνουν με οπτικά μέσα την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν σε θερμότητα. Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες αντί της απορροφητικής επιφάνειας του επίπεδου συλλέκτη υπάρχουν α) το οπτικό σύστημα (συγκεντρωτής) που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, την συγκεντρώνει και την οδηγεί στον δέκτη και β) ο δέκτης που αποτελείται από την καλύπτουσα διαφανή πλάκα, την απορροφητική επιφάνεια και τη μόνωση.

Επομένως τα κύρια μέρη του συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής και ο δέκτης, ο οποίος περιλαμβάνει τον απορροφητήρα με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας και τα σχετικά καλύμματα καθώς και τη μόνωση.

Ο δέκτης μπορεί να είναι κυρτός, επίπεδος, κοίλος, καλυμμένος ή ακάλυπτος. Ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι:

- Ανακλαστικός ή διαθλαστικός (κάτοπτρο ή φακός)
- Επιμήκης (κυλινδρικός) ή κυκλικός. Ο επιμήκης συγκεντρωτής χαρακτηρίζεται ως δισδιάστατος και εστιάζει σε ευθεία γραμμή. Αν η κάθετος τομή του προς την ευθεία αυτή είναι παραβολή, τότε ονομάζεται παραβολικός συγκεντρωτής. Ο κυκλικός συγκεντρωτής είναι επιφάνεια εκ περιστροφής (πχ σφαίρα ή παραβολοειδής), εστιάζει σε σημείο και χαρακτηρίζεται ως τρισδιάστατος.
- Συνεχής ή αποτελούμενος από τμήματα

- Χωρίς είδωλο ή με είδωλο. Οι συγκεντρωτές χωρίς είδωλο δίνουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης ($C < 10$) και δεν σχηματίζουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ήλιου πάνω στον απορροφητήρα. Οι συγκεντρωτές με είδωλο δίνουν (χαμηλής ποιότητας) είδωλο πάνω στον απορροφητή και οι λόγοι συγκέντρωσης που επιτυγχάνονται μπορούν να φτάσουν σε πολύ υψηλές τιμές.

Βασικό στοιχείο λοιπόν των συγκεντρωτικών συλλεκτών αποτελεί ο λόγος συγκέντρωσης όπου ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας ανοίγματος ή παραθύρου A_a (δηλαδή η επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία) προς την επιφάνεια του δέκτη A_r (δηλαδή η επιφάνεια που απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία) όπως περιγράφεται από τη σχέση που ακολουθεί:[3]

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

Πρακτικά ο λόγος συγκέντρωσης για ένα συλλέκτη κυμαίνεται από $1,5 \div 10000$. Αυξάνοντας τον λόγο συγκέντρωσης αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αλλά ταυτόχρονα και η ακρίβεια κατασκευής και η ποιότητα του οπτικού συστήματος, άρα και το κόστος. Στις ανώτατες τιμές του λόγου συγκέντρωσης, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι πλέον εργαστηριακά όργανα για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Από τη σκοπιά του μηχανικού ενδιαφέρουν οι χαμηλές και μέσες συγκεντρώσεις.[3]

Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες αξιοποιείται μόνο η άμεση ακτινοβολία με εξαίρεση συλλέκτες χαμηλού λόγου συγκέντρωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται μηχανισμός κίνησης και προσανατολισμού ώστε ο συλλέκτης να παρακολουθεί κατά το δυνατόν την τροχιά του ήλιου στον ουρανό.

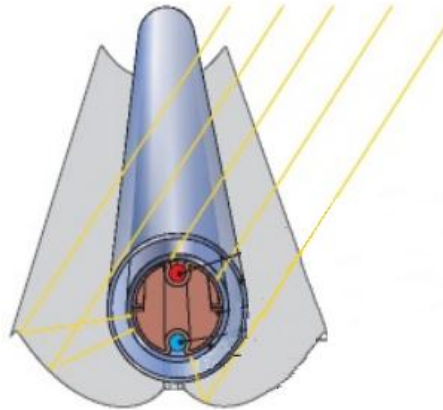
Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν προβλήματα που σχετίζονται με τον μηχανισμό προσανατολισμού και τις αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης, σε σύγκριση με τους επίπεδους συλλέκτες, ιδιαίτερα μάλιστα για τη διατήρηση της ποιότητας του οπτικού συστήματος (σκόνη, οξειδωση, διάβρωση). Επομένως τα προβλήματα λειτουργίας σε συνδυασμό με το κόστος έχουν περιορίσει τις πρακτικές εφαρμογές των συγκεντρωτικών συλλεκτών. [3]

1.4.1 Σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές τύπου CPC

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (CPC - Compound Parabolic Concentrators) ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών χωρίς είδωλο και δεν αποδίδουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ήλιου στον απορροφητή ενώ δίνουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης (συνήθως κάτω από 10). Αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία (συμπεριλαμβανομένης και της διάχυτης) που προσπίπτει υπό ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης και συνεπώς έχουν ελάχιστες απαιτήσεις κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου κάτι που συνεπάγεται και χαμηλότερο κόστος. [3]

Οι CPC χρησιμοποιούν πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις ώστε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο 'παράθυρο' του συγκεντρωτή, εντός της γωνίας αποδοχής, να φτάνει έως τον απορροφητή

που τοποθετείται στην βάση του συλλέκτη. Ο απορροφητής μπορεί να έχει ποικιλία διαμορφώσεων, για παράδειγμα μπορεί να είναι κυλινδρικός ή επίπεδος. Ένας τέτοιος συλλέκτης φαίνεται στο [Σχήμα 1.8](#) . Οι CPC καλύπτονται συνήθως από γυαλί για να αποφεύγεται η ρύπανση του συλλέκτη.



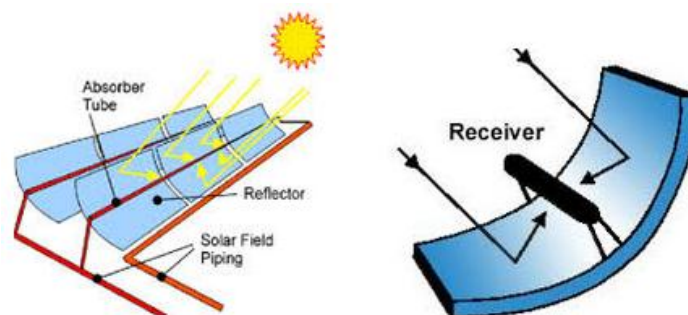
Σχήμα 1.8: Σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής τύπου CPC

Οι συλλέκτες τύπου CPC τοποθετούνται συνήθως με τον διαμήκη άξονα οριζόντιο και προσανατολισμένο κατά την Ανατολή-Δύση. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι στραμμένο προς τον Ισημερινό. Συνήθως υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης (περιστροφής) περί τον επιμήκη άξονα, έτσι ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει εντός των ορίων που επιβάλλει η γωνία αποδοχής.

1.4.2 Συλλέκτες με επιμήκεις παραβολικούς συγκεντρωτές τύπου PTC

Οι επιμήκεις παραβολικοί συγκεντρωτές (PTC - Parabolic Trough Concentrators) έχουν τομή σχήματος παραβολής και ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών με είδωλο. Αξιοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές που απαιτούν μέσες τιμές του λόγου συγκέντρωσης και θερμοκρασίες στην περιοχή $100 \div 500^{\circ}\text{C}$. Ο δέκτης του συλλέκτη μπορεί να είναι επίπεδος ή κυλινδρικός. [3]

Στο [Σχήμα 1.9](#) που ακολουθεί φαίνεται ένας επιμήκης παραβολικός συγκεντρωτής τύπου PTC.



Σχήμα 1.9: Επιμήκης παραβολικός συγκεντρωτής τύπου PTC

Ο κάθε ηλιακός συλλέκτης έχει έναν γραμμικό παραβολικό ανακλαστήρα που εστιάζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε έναν γραμμικό δέκτη, ο οποίος τοποθετείται στην εστία της παραβολής. Οι συλλέκτες παρακολουθούν τον ήλιο από τα ανατολικά προς τα δυτικά κατά την διάρκεια της ημέρας για να εξασφαλίσουν μ' αυτό τον τρόπο ότι ο ήλιος είναι συνεχώς εστιασμένος στον γραμμικό δέκτη. Ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας θερμαίνεται καθώς κυκλοφορεί διαμέσου του δέκτη και επιστρέφει σε μια σειρά εναλλακτών θερμότητας όπου το ρευστό χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής πίεσης υπέρθερμου ατμού. Ο υπέρθερμος ατμός τροφοδοτείται στη συνέχεια σε έναν συμβατικό στρόβιλο/γεννήτρια αναθέρμανσης για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο ατμός εξόδου από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστρέφει στους εναλλάκτες θερμότητας. Η ψύξη και η συμπύκνωση εξασφαλίζονται από μηχανικούς πύργους στήριξης. Μετά το πέρασμα του ρευστού μεταφοράς θερμότητας διαμέσου της μεριάς των ηλιακών εναλλακτών θερμότητας, το ψυχρό πλέον ρευστό μεταφοράς θερμότητας επανακυκλοφορεί στο ηλιακό πεδίο. [6]

Στο [Σχήμα 1.10](#) φαίνεται ένα ηλιακό πεδίο παραβολικών ηλιακών συλλεκτών αυτού του τύπου στο Kramer Junction της Καλιφόρνια.



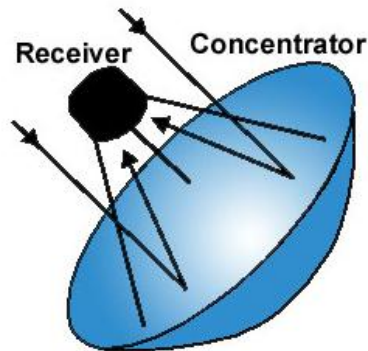
Σχήμα 1.10: Ηλιακό πεδίο παραβολικών ηλιακών συλλεκτών τύπου PTC 30 MW στο Kramer Junction της Καλιφόρνια [28]

1.4.3 Συλλέκτες με παραβολοειδείς συγκεντρωτές

Ο παραβολοειδής συγκεντρωτής ανήκει στην κατηγορία των συγκεντρωτών με είδωλο. Είναι μία επιφάνεια εκ περιστροφής και η τομή του που περιέχει τον άξονα συμμετρίας είναι παραβολή (όπως και η τομή του επιμήκου παραβολικού συγκεντρωτή). Αξιοποιεί μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και μπορεί να πετύχει πολύ υψηλό λόγο συγκέντρωσης. Είναι σημειακής εστίασης και χρησιμοποιείται με δέκτη σφαιρικό, επίπεδο ή κοίλο. [3]

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα σύστημα παραβολικού 'πίατου' όπως φαίνεται στο [Σχήμα 1.11](#)

που συλλέγει την άμεση ηλιακή ενέργεια και την συγκεντρώνει ή την εστιάζει σε μια μικρή περιοχή.



Σχήμα 1.11: Παραβολοειδής συγκεντρωτής

Το σύστημα αυτό πρέπει να παρακολουθεί πλήρως τον ήλιο για αυτό και διαθέτει δύο άξονες κίνησης για την ανάκλαση της δέσμης φωτός στον θερμικό δέκτη. Ο δέκτης απορροφά την ακτινοβολία του ήλιου και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια του κυκλοφορούντος μέσου. Το μέσο αυτό μπορεί να είναι υγρό ή αέριο (συνήθως ήλιο ή υδρογόνο). [19]

Η κύρια χρήση αυτού του τύπου συγκεντρωτή είναι η παραγωγή θερμικής ενέργειας για μετατροπή της σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας μια διάταξη μηχανής – γεννήτριας συνδεδεμένη απευθείας στο δέκτη, που συνήθως είναι μια μηχανή Stirling ή ένας αεριοστρόβιλος όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 1.12](#). Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα, συναρμολογησιμότητα, αυτόνομη λειτουργία και μια έμφυτη υβριδική υποστήριξη (η ικανότητα να λειτουργεί ή με ηλιακή ενέργεια ή με ορυκτό καύσιμο ή και με τα δύο). [2]



Σχήμα 1.12: Παραβολοειδείς συγκεντρωτές με μηχανές Stirling στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar de Almeria [29] της Ισπανίας. Κάθε δίσκος παράγει 10kW ηλεκτρικής ισχύος [19]

1.4.4 Συλλέκτες με κεντρικό δέκτη

Πρόκειται για ένα μεγάλο σύστημα που συνήθως καταλαμβάνει σημαντική έκταση εδάφους (ακόμη και μεγαλύτερη από 100m^2). Ένας τέτοιος σταθμός φαίνεται στο [Σχήμα 1.13](#). Ο συγκεντρωτής είναι μη συνεχής, δηλαδή αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κατόπτρων ή αλλιώς ηλιοστάτες, τα οποία ανακλούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία προς έναν κεντρικό δέκτη τοποθετημένο σε πύργο. Το ύψος του κεντρικού πύργου μπορεί να προσεγγίσει ακόμη και τα 200m ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού. Κατά την εγκατάστασή τους τα κάτοπτρα διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μη σκιάζονται μεταξύ τους, ούτε να παρεμβάλλονται στην πορεία της ανακλώμενης ακτινοβολίας εμποδίζοντάς τη να φτάσει στον δέκτη. Για την αντιμετώπιση της σκίασης και της παρεμβολής τα κάτοπτρα τοποθετούνται σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους, καλύπτοντας έτσι ένα κλάσμα μόνο του διατιθέμενου εδάφους. [3]



Σχήμα 1.13: Ηλιακός σταθμός με κεντρικό δέκτη στην πόλη Φουέντες της Ανδαλουσίας, στην Ισπανία συνολικής επιφάνειας 480 στρεμμάτων, με 2650 ηλιοστάτες και παραγόμενη ισχύ 19,9MW [30]

Τα κάτοπτρα μπορεί να είναι επίπεδα ή ελαφρώς κυρτά και διαθέτουν συστήματα παρακολούθησης του ηλίου σε δύο άξονες ώστε να εξασφαλίζεται βέλτιστη συγκέντρωση της ακτινοβολίας. Η θερμική ενέργεια που συγκεντρώνεται στον κεντρικό δέκτη αποδίδεται στο μέσο μεταφοράς θερμότητας, κατά τρόπο αντίστοιχο με το σταθμό παραβολικών κατόπτρων. Η ηλιακή ενέργεια απορροφάται υπό μορφή θερμότητας από το ρευστό ή το αέριο λειτουργίας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ο οποίος κινεί ένα συμβατικό στρόβιλο. Τα συστήματα αυτά πετυχαίνουν λόγους συγκέντρωσης μεταξύ 300-1500 και έτσι είναι αρκετά αποδοτικοί στην συλλογή θερμικής ενέργειας και στη μετέπειτα μετατροπή της σε ηλεκτρική. Η ισχύς τους είναι αρκετά μεγάλη (γενικά πάνω από 10MW). [19]

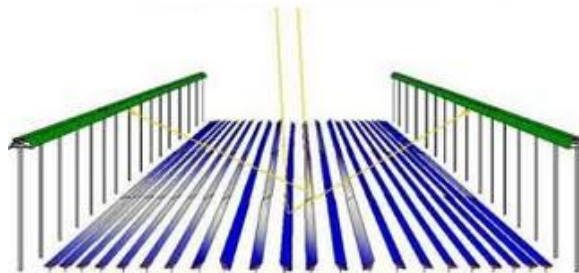
Στην τεχνολογία ηλιακού πύργου μπορούν να επιτευχθούν πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης ακτινοβολίας και ως εκ τούτου υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που επιτυγχάνονται στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που είναι διαθέσιμες στους ηλιακούς πύργους, αυτοί οι σταθμοί μπορούν να συνδυαστούν εκτός από ατμοστρόβιλο, και με αεριοστρόβιλο αλλά και με σύστημα συνδυασμένου κύκλου. [20]

Συνοψίζοντας οι διατάξεις κεντρικού δέκτη παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

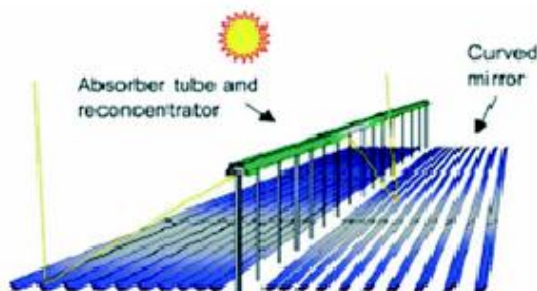
- Συγκεντρώνουν με οπτικό τρόπο την ηλιακή ακτινοβολία και την μεταφέρουν σε ένα δέκτη με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών μεταφοράς θερμικής ενέργειας.
- Συνήθως επιτυγχάνουν υψηλούς δείκτες συγκέντρωσης (300 έως 1500) άρα υψηλή αποδοτικότητα στην συλλογή ενέργειας.
- Μπορούν να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια σε επιτρεπτό κόστος.
- Έχουν μεγάλη ισχύ (γενικά περισσότερο των 10 MW) και έτσι προσφέρουν μειωμένο κόστος λόγω της μεγάλης τους κλίμακας.

1.4.5 Γραμμικός ανακλαστής Fresnel (τύπου LFR - Linear Fresnel Reflector)

Ο γραμμικός ανακλαστής Fresnel ανήκει στην τεχνολογία ηλιοθερμικών συστημάτων που εφαρμόζουν γραμμική εστίαση και μπορεί να θεωρηθεί ως ένας σπασμένος ανακλαστής παραβολικού κατόπτρου. Αυτοί οι σταθμοί LFR χρησιμοποιούν σειρές από μακρόστενα κάτοπτρα, είτε επίπεδα είτε με πολύ μικρή καμπυλότητα, τα οποία εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν ή περισσότερους γραμμικούς δέκτες που είναι τοποθετημένοι σε σταθερή θέση πάνω από τα κάτοπτρα, όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 1.14](#) και [Σχήμα 1.15](#). [2]



[Σχήμα 1.14](#): Γραμμικός ανακλαστής Fresnel με δυο γραμμικούς δέκτες



[Σχήμα 1.15](#): Γραμμικός ανακλαστής Fresnel με έναν γραμμικό δέκτη

Συνήθως, πάνω από το δέκτη εγκαθίσταται ένας μικρός παραβολικός καθρέφτης για επιπλέον συγκέντρωση του φωτός. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι η χρήση των ανακλαστικών κατόπτρων Fresnel. Τα κάτοπτρα αυτά κάνουν χρήση του φαινομένου του φακού Fresnel, το οποίο επιτρέπει την κατασκευή συγκεντρωτικών κατόπτρων με μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση μειώνοντας ταυτόχρονα τον απαιτούμενο όγκο υλικού. Αυτό μειώνει το κόστος του συστήματος αφού τα καμπυλωτά παραβολικά κάτοπτρα είναι αρκετά ακριβότερα. Τα συστήματα LFR στοχεύουν στη μείωση του συνολικού κόστους με το να μοιράζεται ένας δέκτης μεταξύ πολλών κατόπτρων σε αντίθεση με τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων και δίσκων, ενώ παράλληλα συνεχίζεται να χρησιμοποιείται η απλή γεωμετρία της γραμμικής εστίασης με το σύστημα ιχνηλάτησης ενός άξονα όπως και στα παραβολικά κάτοπτρα. Τα κάτοπτρα είναι στοιχισμένα με προσανατολισμό Βορρά-Νότου ώστε με το ελεγχόμενο σύστημα ιχνηλάτησης να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου από την ανατολή ως τη δύση. Ο δέκτης στα συστήματα LFR είναι τοποθετημένος σε σταθερή θέση και έτσι δεν απαιτούνται υδραυλικές συμπλέξεις. Επιπλέον, τα κάτοπτρα δεν χρειάζεται να στηρίζουν το δέκτη και ως εκ τούτου είναι κατασκευαστικά απλούστερα [20]

Τα κάτοπτρα-ανακλαστές είναι τοποθετημένοι κοντά στο έδαφος μειώνοντας το κόστος κατασκευής. Για την παρεμπόδιση της σκίασης μεταξύ των συλλεκτών, οι συλλέκτες τοποθετούνται σε απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση των ανακλαστήρων θα μπορούσε να μειωθεί με την εγκατάσταση δύο χαμηλότερων απορροφητικών πύργων. Η διάταξη αυτή περιορίζει τόσο το κόστος εγκατάστασης όσο και συντήρησης καθώς ελαττώνεται η διαδρομή του εργαζομένου μέσου. [2]

Στο [Σχήμα 1.16](#) φαίνεται ένας ηλιακός σταθμός τεχνολογίας Fresnel στην Ισπανία:



Σχήμα 1.16: Ηλιακός σταθμός τεχνολογίας Fresnel ισχύος 30MW, της εταιρείας Novatec Solar στην Ισπανία [31]

2 Βελτιστοποίηση

2.1 Εισαγωγή στις μεθόδους Βελτιστοποίησης

Από την πλευρά των μεθόδων βελτιστοποίησης, βασική είναι η διάκριση σε αιτιοκρατικές (deterministic) και στοχαστικές (stochastic) μεθόδους. Μία αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τη γενικευμένη έννοια της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, τιμές της οποίας καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει. Από την άλλη κύριο χαρακτηριστικό των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων είναι ότι η ανάπτυξη μίας αιτιοκρατικής μεθόδου βελτιστοποίησης απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο επένδυσης από την πλευρά του μηχανικού - προγραμματιστή, ενώ είναι δυσκολότερα επεκτάσιμη σε άλλα παρεμφερή προβλήματα (λ.χ όταν αλλάζει η αντικειμενική συνάρτηση). Γενικά, οι αιτιοκρατικές μέθοδοι συγκλίνουν γρήγορα στη βέλτιστη λύση, με τον κίνδυνο όμως η λύση αυτή να είναι τοπικό και όχι το ολικό βέλτιστο, ανάλογα με το σημείο εκκίνησης. Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι περισσότερο γενικοί, με την έννοια ότι εύκολα προσαρμόζονται σε διαφορετικούς τύπους προβλημάτων, και είναι συνήθως περισσότερο αργό από τις αιτιοκρατικές μεθόδους βελτιστοποίησης, με κέρδος όμως το να μπορούν να εντοπίσουν το ολικό ακρότατο ανεξάρτητα από τη λύση ή τις λύσεις με τις οποίες εκκινούν.[7]

Στην κατηγορία των αιτιοκρατικών μεθόδων αναζήτησης ανήκουν μέθοδοι όπως:

- Μέθοδοι της κατηγορίας αναζήτησης πλέγματος
- Τροχιακές μέθοδοι
- Μέθοδοι καλύψεως
- Μέθοδοι συμπληρωματικών συναρτήσεων
- Μέθοδοι tunneling

Στην κατηγορία των στοχαστικών μεθόδων αναζήτησης περιλαμβάνονται μέθοδοι όπως:

- Μέθοδοι τυχαίας αναζήτησης
- Μέθοδοι ομαδοποιήσεως
- Εξελικτικές μέθοδοι (Εξελικτικοί Αλγόριθμοι, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Εξελικτικές Στρατηγικές, Εξελικτικός Προγραμματισμός, Γενετικός Προγραμματισμός, Διαφοροεξελικτικός Προγραμματισμός)

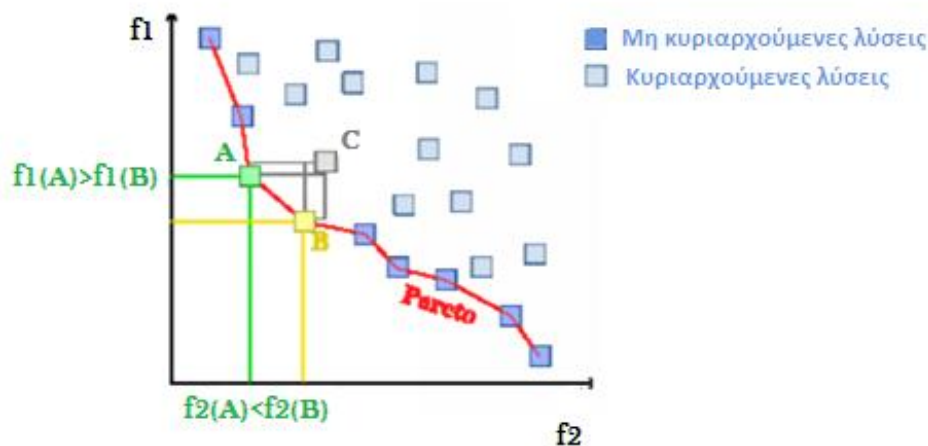
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων καθώς και η βελτιστοποίηση με τη βοήθεια του μετώπου Pareto για τα οποία γίνεται λόγος σε επόμενες ενότητες.

2.2 Βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων - Μέτωπο Pareto

Εκτός από τα προβλήματα βελτιστοποίησης ενός στόχου όπως είναι η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, υπάρχουν και τα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων όπου το πρόβλημα αποτελείται από περισσότερες από μια συναρτήσεις-στόχους.

Σε τέτοιου είδους προβλήματα δεν υπάρχει μια και μοναδική λύση που να βελτιστοποιεί συγχρόνως όλες τις συναρτήσεις. Εδώ οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι αντικρουόμενες και η βελτιστοποίηση της μιας συνάρτησης έχει σαν αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της άλλης. Πρόκειται λοιπόν για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, μια διαδικασία βελτιστοποίησης δύο ή περισσότερων αντικρουόμενων ζητημάτων με διάφορους περιορισμούς.

Η μέθοδος του μετώπου Pareto (Pareto Front) ή μετώπου μη κυριαρχούμενων λύσεων μας δίνει το σύνολο των βέλτιστων λύσεων μεταξύ των εξετασμένων λύσεων. Με βάση την έννοια της κυριαρχίας, σε ένα σύνολο διαθέσιμων λύσεων ενός προβλήματος, μπορούμε να ορίσουμε ως μέτωπο Pareto το υποσύνολο των λύσεων στις οποίες δεν κυριαρχεί καμία άλλη λύση (μη κυριαρχούμενες λύσεις). Σημειώνεται ότι δύο μέλη του μετώπου Pareto είναι αδύνατο να συγκριθούν. Στο [Σχήμα 2.1](#) φαίνεται συνοπτικά πως είναι ένα διάγραμμα κατά Pareto. Εδώ οι λύσεις A και B κυριαρχούν επί της λύσης C γιατί είναι καλύτερες και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις f_1 και f_2 . Αν συγκρίνουμε όμως την A με τη B, βλέπουμε ότι η λύση A είναι χειρότερη από τη B για τη συνάρτηση f_1 (αν πρόκειται για ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης f_1), αλλά καλύτερη από τη B για τη συνάρτηση f_2 (αν πρόκειται πάλι για ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης f_2). Συνεπώς καμία από αυτές τις λύσεις δεν κυριαρχεί επί της άλλης.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του μετώπου Pareto για την περίπτωση δυο στόχων

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων που ερευνά τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη αναφορά εκείνων των εργασιών που μελετήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας.

Στην εργασία των Varun, Siddhartha [10] μελετήθηκε η βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη αέρα κάνοντας χρήση γενετικών αλγορίθμων. Η βελτιστοποίηση επιτεύχθηκε για ένα εύρος τιμών του αριθμού Reynolds, του συντελεστή εκπομπής της απορροφητικής πλάκας, τη γωνία κλίσης του συλλέκτη και την ταχύτητα του αέρα μεταβάλλοντας κάθε φορά τον αριθμό καλυμμάτων και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Αντικείμενο της εργασίας του Kalogirou [11] ήταν η χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και οι γενετικοί αλγόριθμοι προκειμένου να μεγιστοποιήσει τα οικονομικά οφέλη ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα η εύρεση της βέλτιστης συσχέτισης της συλλεκτικής επιφάνειας και του μεγέθους της δεξαμενής αποθήκευσης με σκοπό το μέγιστο οικονομικό όφελος.

Στην εργασία των Njomo D, et al [12] μελετήθηκε η ανάπτυξη ενός μοντέλου ανάλυσης ευαισθησίας της θερμικής απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη αέρα. Το μοντέλο αναπτύχθηκε για να δέχεται ως εισόδους διάφορες παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, ο ρυθμός ροής μάζας αέρα, το βάθος των αγωγών ρευστού, ο αριθμός και το είδος των καλυμμάτων. Η έρευνα έδειξε ότι το μοντέλο αυτό βρίσκει εφαρμογή όχι μόνο σε επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες αέρα, αλλά και σε επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες νερού καθώς και σε γραμμικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες.

Οι Zhang Jiandong et al [13] βασιζόμενοι στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, μελέτησαν την θερμική απόδοση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη λαμβάνοντας υπόψη το πάχος της απορροφητικής πλάκας, το βήμα μεταξύ των αγωγών του συλλέκτη, το μήκος των αγωγών του συλλέκτη, την διάμετρο τους και το πάχος του στρώματος μόνωσης.

Η εργασία των Chandan S. M. et al [14] επικεντρώνεται στην μελέτη αλληλεπίδρασης του πάχους της απορροφητικής πλάκας με τον παράγοντα απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη σε μορφή σερπαντίνας.

Η δημοσίευση των Shouquat Hossain et al [15] αφορά την μελέτη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη νερού με τροποποιημένο σχεδιασμό. Εδώ το σύστημα του απορροφητή αποτελείται από δυο παράλληλους αγωγούς νερού σε μορφή σερπαντίνας (στο ίδιο επίπεδο) για να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Η μελέτη έγκειται στην επίδραση αυτού του σχεδιασμού στην αποδοτικότητα του συλλέκτη.

Αντικείμενο της μελέτης των H.Dagdougui et al [16] είναι η θερμική ανάλυση και η βελτιστοποίηση της απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη νερού. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη διάφορους τρόπους μεταφοράς θερμότητας στο συλλέκτη με στόχο την διερεύνηση επίδρασης του αριθμού και τον τύπο των καλυμμάτων (και όχι μόνο) για

μια πιο αποδοτική σχεδίαση. Η εργασία μελετά επίσης την βελτιστοποίηση δύο στόχων, δηλαδή της ροής του νερού και της συλλεκτικής επιφάνειας για έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης του συλλέκτη και της θερμοκρασίας εξόδου του νερού.

3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη μεθόδων επίλυσης προβλημάτων, βασισμένων στις αρχές της Γενετικής Εξέλιξης και της Κληρονομικότητας. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) βασίζονται στη θεωρία τους στην θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών που αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο.

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι βιολόγοι επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη, όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί και σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland του πανεπιστημίου του Michigan. Ο Holland φαντάστηκε ότι κάποιες ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, αν ενσωματώνονταν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων.[8]

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γενετικούς Αλγόριθμους είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης. Το παράδειγμα με τους λαγούς είναι ευρέως γνωστό για το πώς αναπαράγονται και εξελίσσονται από γενιά σε γενιά. Έστω ότι αρχίζουμε να παρατηρούμε ένα συγκεκριμένο πληθυσμό από λαγούς. Όπως είναι φυσικό, κάποιοι από αυτούς θα είναι πιο γρήγοροι και πιο εύστροφοι από τους άλλους. Αυτοί οι γρηγορότεροι και έξυπνότεροι λαγοί έχουν λιγότερες πιθανότητες να αποτελέσουν γεύμα κάποιας αλεπούς και άρα από τη στιγμή που καταφέρνουν να επιβιώσουν θα ασχοληθούν με την αναπαραγωγή του είδους τους. Φυσικά, θα υπάρχει και ένας μικρός αριθμός αργών και λιγότερο εύστροφων λαγών, που θα καταφέρουν να επιβιώσουν μόνο και μόνο επειδή στάθηκαν τυχεροί. Όλοι αυτοί οι λαγοί, που έχουν καταφέρει να επιβιώσουν, θα αρχίσουν την παραγωγή της επόμενης γενιάς τους, μιας γενιάς που θα συνδυάζει όλα τα χαρακτηριστικά των μελών της προηγούμενης, συνδυασμένα με διάφορους τρόπους μεταξύ τους. Έτσι, μερικοί αργοί λαγοί θα αναμειχθούν με κάποιους γρήγορους, κάποιοι γρήγοροι με άλλους γρηγορούς, κάποιοι εύστροφοι λαγοί με κάποιους μη εύστροφους και ούτω καθεξής. Οι μικροί λαγοί της επόμενης γενιάς θα είναι, κατά μέσο όρο, γρηγορότεροι και έξυπνότεροι από τους προγόνους τους, αφού από την προηγούμενη γενιά επιβίωσαν περισσότεροι γρήγοροι και έξυπνοι λαγοί. Ευτυχώς, για την διατήρηση της φυσικής ισορροπίας, και οι αλεπούδες υφίστανται την ίδια διαδικασία αναπαραγωγής, διαφορετικά οι λαγοί θα γινόντουσαν υπερβολικά γρήγοροι και έξυπνοι για να μπορούν να τους πιάσουν.[8]

Οι κανόνες μετάβασης των ΓΑ είναι στοχαστικοί καθώς η αναζήτηση του βέλτιστου σημείου γίνεται μέσω διαδοχικών, τυχαίων μεταβάσεων. Οι μεταβάσεις δηλαδή που επιτρέπουν οι ΓΑ να γίνονται, μπορούν να οδηγήσουν και σε χειρότερη τιμή ώσπου να καταλήξουν στη βέλτιστη.

3.2 Βασικές έννοιες

Όπως ήδη αναφέραμε οι ΓΑ χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της φυσικής Γενετικής. Ο Πίνακας 3-1 περιγράφει ορισμένους από τους βασικούς όρους που χρησιμοποιούν οι ΓΑ.

Πίνακας 3-1: Ορολογία που χρησιμοποιείται στους Γενετικούς Αλγορίθμους

Ορολογία	Περιγραφή
Χρωμόσωμα (άτομα)	Αναπαριστά την κωδικοποίηση μιας λύσης (κωδικοποιεί ένα σύνολο παραμέτρων ή αλλιώς το σύνολο των λύσεων) → Συμβολοσειρά
Γονίδιο	Τα μικρότερα μέρη από τα οποία αποτελούνται τα χρωμοσώματα → Ψηφία συμβολοσειράς -Παράμετρος/Μεταβλητή
Γονότυπος	Κωδικοποιημένη ομάδα παραμέτρων
Φαινότυπος	Το αποτέλεσμα της αποκωδικοποίησης μιας ομάδας παραμέτρων
Τελεστής	Μια φόρμουλα με την οποία μεταβάλλονται με συστηματικό τρόπο τα περιεχόμενα ενός χρωμοσώματος → Επιλογή - Διασταύρωση - Μετάλλαξη
Πληθυσμός	Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων
Γενιά	Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πλήθους στα οποία καταλήγει ο ΓΑ μετά από ένα σύνολο πράξεων
Γονείς	Ένα ζεύγος χρωμοσωμάτων - Ο κύκλος δημιουργίας νέου πληθυσμού
Απόγονοι	Προκύπτουν από διασταύρωση των γονέων

3.3 Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Σύμφωνα με τον Goldberg [9] τα κυριότερα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους ΓΑ και τους δίνουν υπεροχή είναι τα εξής: [8]

- Οι ΓΑ δουλεύουν με μια κωδικοποίηση ενός συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος. Απαιτούν δηλαδή το σύνολο των φυσικών παραμέτρων της βελτιστοποίησης, να κωδικοποιηθεί σε συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους, κάνοντας χρήση ενός πεπερασμένου αλφάβητου. Η κωδικοποίηση δεν είναι απαραίτητο να είναι πάντα δυαδική. Ενώ το στοιχείο της κωδικοποίησης είναι εκείνο που επιτρέπει στον ΓΑ να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.
- Οι ΓΑ 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, ενέχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μια περιοχή τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι ΓΑ εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο

σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές). Έτσι μπορούν να «ανεβαίνουν» πολλούς λόφους (hillclimbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μια λάθος κορυφή. Οι κλασικές μέθοδοι θα ξεκινούσαν το ψάξιμο από έναν αρχικό συνδυασμό λύσεων και στη συνέχεια, εφαρμόζοντας κάποιο κανόνα μετάβασης, θα δοκίμαζαν τον επόμενο (ψάξιμο δηλαδή σημείο προς σημείο). Αντιθέτως, ένας ΓΑ αρχίζει το ψάξιμο από ένα πληθυσμό συνδυασμών συμβολοσειρών και κατόπιν παράγει διαδοχικά καινούριους. Έπειτα, «τρέχοντας» ο αλγόριθμος δημιουργεί νέους πληθυσμούς, που σιγά σιγά συγκλίνουν προς την επιθυμητή λύση. Διαλέγοντας έναν πληθυσμό που να καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

- Οι ΓΑ 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 ΓΑ. Η αναζήτησή τους είναι κατά κάποιο τρόπο «τυφλή», με την έννοια ότι αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση.
- Οι ΓΑ χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες αναζήτησης και όχι ντετερμινιστικούς. Η χρήση πιθανοθεωρητικών κανόνων αναζήτησης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των ΓΑ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη. Δηλαδή, δεν λαμβάνονται αποφάσεις με το «στρίψιμο ενός νομίσματος». Το στοιχείο της τύχης, που εφαρμόζεται μέσω των γενετικών τελεστών, χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

3.4 Η δομή του Γενετικού Αλγορίθμου

Η δομή ενός ΓΑ αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Κωδικοποίηση (Coding)
2. Αρχικοποίηση (Initialization)
3. Αποκωδικοποίηση (Decoding)
4. Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση (Fitness calculation or evaluation)
5. Αναπαραγωγή (Reproduction)
 - I. Επιλογή (Selection)
 - II. Διασταύρωση (Crossover)
 - III. Μετάλλαξη (Mutation)
6. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ

3.4.1 Κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση αφορά ένα σύνολο πιθανών λύσεων του προβλήματος. Η αναπαράσταση των λύσεων πρέπει να γίνει με ένα μαθηματικό, φορμαλιστικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από τον υπολογιστή. Εξάλλου, κωδικοποίηση υπάρχει και στο φυσικό μοντέλο (χρωμοσώματα) και μάλιστα όλες οι αλλαγές που παρατηρούνται στους οργανισμούς γίνονται πάνω στα κωδικοποιημένα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου (κυρίως την επιλογή). Αποτέλεσμα της κωδικοποίησης πρέπει να είναι η ύπαρξη ομοιοτήτων ανάμεσα στα άτομα με σκοπό την κατάλληλη εκμετάλλευσή τους, διότι οι ομοιότητες βοηθούν την κατεύθυνση του ψαξίματος. Διάφορα είναι τα είδη της κωδικοποίησης που μπορούν να γίνουν από πρόβλημα σε πρόβλημα. Η πιο απλή είναι η κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία (bits) όπου κάθε λύση αναπαρίσταται από μια δυαδική συμβολοσειρά (binary string) καθορισμένου μήκους.

3.4.2 Αρχικοποίηση

Η αρχικοποίηση είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθός του ορίζεται από το χρήστη (συνήθως, όμως, εξαρτάται από τους πόρους που αυτός έχει στη διάθεσή του). Σε μερικές υλοποιήσεις, η επιλογή των αρχικών σημείων γίνεται με ευρετικές μεθόδους, δίνοντας εξαρχής ένα πλεονέκτημα στην αναζήτηση.

3.4.3 Αποκωδικοποίηση

Αφού προκύψει η πρώτη γενιά, ο ΓΑ εισέρχεται στο επαναληπτικό μέρος του. Ο πληθυσμός πρέπει να αξιολογηθεί, δηλαδή να μετρηθεί η ικανότητα επιβίωσης του κάθε ατόμου χωριστά. Για να συμβεί αυτό πρέπει να γίνει αποκωδικοποίηση χαρακτηριστικών και έπειτα υπολογισμός της απόδοσης των ατόμων. Στη φύση τα χρωμοσώματα ενός οργανισμού έχουν στα γονίδια τους κωδικοποιημένα τα χαρακτηριστικά τους. Το σύνολο αυτής της κωδικοποιημένης γενετικής πληροφορίας ονομάζεται γονότυπος. Ο γονότυπος δεν είναι αντιληπτός με τις φυσικές αισθήσεις των έμβιων όντων. Αντίθετα, αντιληπτή γίνεται η αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον, που έχει ως αποτέλεσμα την ορατή εμφάνιση των χαρακτηριστικών αυτών. Ανάλογος είναι ο ρόλος της αποκωδικοποίησης στο τεχνητό μοντέλο. Εδώ το ρόλο του γονότυπου παίζει η δομή της συμβολοσειράς με τα δυαδικά ψηφία ως αντίστοιχα των γονιδίων. Ο φαινότυπος αναφέρεται στην παρατηρήσιμη εμφάνιση μιας συμβολοσειράς, δηλαδή στο πώς φαίνεται στο περιβάλλον της. Περιβάλλον, όμως, θεωρείται η αντικειμενική συνάρτηση, άρα ο φαινότυπος μιας συμβολοσειράς αντιστοιχεί στην αποκωδικοποιημένη τιμή της, που ανήκει στο σύνολο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης.

3.4.4 Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση

Σκοπός της λειτουργίας αξιολόγησης είναι να υπολογιστεί για κάθε άτομο του πληθυσμού η ικανότητα του για επιβίωση. Στη φύση οι ικανότητες των ατόμων δεν είναι προσδιορισμένες με αυστηρό τρόπο. Είναι, όμως, καθορισμένες από το γενετικό υλικό των χρωμοσωμάτων τους. Εύκολα θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί, π.χ. για τα ζώα ότι μεγαλύτερη τύχη για επιβίωση έχουν όσα μπορούν να ξεφεύγουν από άρπαγες, να αντέχουν σε αρρώστιες και γενικά να αντιπαρέρχονται τις όποιες αντιξοότητες παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Συνεπώς, ο υπολογισμός της ικανότητας είναι θεμελιώδης λειτουργία για το ΓΑ. Για κάθε συμβολοσειρά του τρέχοντος πληθυσμού υπολογίζεται η απόδοσή της από την ήδη γνωστή αντικειμενική συνάρτηση.

3.4.5 Αναπαραγωγή

Η αναπαραγωγή είναι η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ. Εδώ λαμβάνει χώρα ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγορίθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι σύνθετη και περιλαμβάνει τους γενετικούς τελεστές της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης για την εκτέλεσή της.

3.4.5.1 Επιλογή

Με την επιλογή, βρίσκει εφαρμογή στα πλαίσια του αλγορίθμου, ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθορίζεται ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτρέπει εκθετική αύξηση των ικανοτέρων ατόμων και τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενεών, την επικράτησή τους. ΓΑ χωρίς επιλογή στην αναπαραγωγική του διαδικασία ισοδυναμεί με τυχαίο ψάξιμο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης της επιλογής στα πλαίσια ενός ΓΑ. Δεδομένου, όμως, ότι στη βασική μορφή του αλγορίθμου το μέγεθος του πληθυσμού από γενιά σε γενιά δεν αλλάζει, κάθε τεχνική επιλογής, για να δικαιώνει τον τίτλο της, οφείλει να δίνει με κάποιο τρόπο, μεγαλύτερες πιθανότητες αναπαραγωγής σε άτομα που αξιολογούνται μέσα στο τεχνητό περιβάλλον ως τα πιο ικανά. Για την βελτιστοποίηση με τη χρήση ΓΑ έχει δημιουργηθεί ένα σύνολο μεθόδων επιλογής, οι οποίες είναι είτε στοχαστικές είτε ντετερμινιστικές. Αναφέρουμε τις πιο σημαντικές από αυτές.

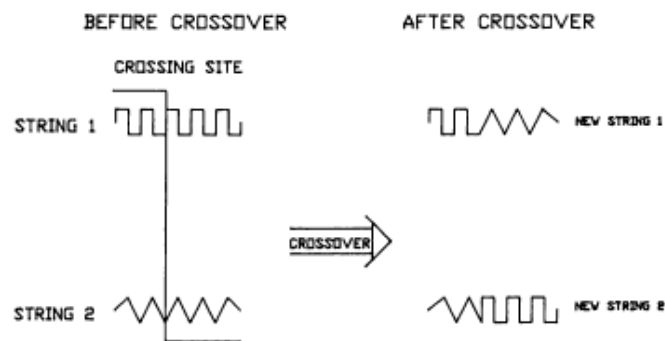
- Αναλογική Επιλογή – Εξαναγκασμένη Ρουλέτα (Proportionate Selection)
- Επιλογή «τουρνουά» (Tournament selection)
- Αποδεκατισμός πληθυσμού (Population Decimation)
- Διαβάθμιση Σίγμα (Sigma Scaling)
- Ελιτισμός (Elitism)
- Επιλογή βαθμονόμησης (rank selection)
- Επιλογή σταθερής κατάστασης (Steady-state selection)
- Κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση (normalized geometric ranking)

3.4.5.2 Διασταύρωση

Ο προσωρινός πληθυσμός που προέκυψε από τη διαδικασία της επιλογής πρέπει να περάσει από τη διαδικασία ζευγαρώματος για να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση.

Η νέα, λοιπόν, ομάδα ατόμων που προέκυψε από την επιλογή σχηματίζει με τυχαίο τρόπο ομάδες των δύο. Σε κάθε ομάδα, τα δύο μέλη παίρνουν μέρος σε μια απλή λειτουργία ανταλλαγής γενετικού υλικού που ονομάζεται διασταύρωση. Η διασταύρωση είναι μια απαραίτητη λειτουργία που συμβάλει αποφασιστικά στην επίδοση ενός ΓΑ. Στόχος της διασταύρωσης είναι η νέα γενιά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους.

Στο [Σχήμα 3.1](#) που ακολουθεί φαίνονται οι συμβολοσειρές που προκύπτουν (απόγονοι) μετά από διασταύρωση των γονέων:



Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση διασταύρωσης δύο γονέων για να προκύψουν δύο απόγονοι [9]

Συνοπτικά αναφέρεται ότι υπάρχουν διάφορες μεθόδους διασταύρωσης όπως οι εξής:

- Διασταύρωση ενός σημείου (simple crossover)
- Αριθμητική διασταύρωση (arithmetical crossover)
- Ευριστική διασταύρωση (heuristic crossover)
- Διασταύρωση δέντρου (tree crossover)

Ένα ενδεικτικό της χρησιμότητας της διασταύρωσης είναι η ανακατεύθυνση του ψαξίματος σε νέες «απάτητες» περιοχές του χώρου αναζήτησης. Έτσι διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγορίθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του. Επίσης, τα νέα άτομα περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων τους και με αυτό τον τρόπο μπορούν να προκύψουν επιτυχημένοι συνδυασμοί υψηλής ικανότητας. Υπάρχει, βέβαια, το ενδεχόμενο η διασταύρωση να δώσει χειρότερα παιδιά από τους γονείς, αλλά αυτά δεν θα έχουν μεγάλη πιθανότητα πολλαπλασιασμού στον επόμενο αναπαραγωγικό κύκλο, λόγω μικρής απόδοσης.

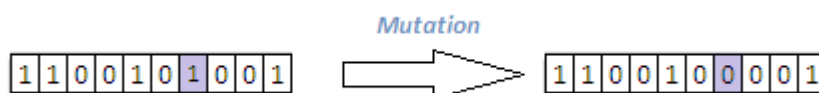
Στην πράξη, η διασταύρωση χρησιμοποιείται με παραμετροποιημένη μορφή, δηλαδή λαμβάνει

χώρα με πιθανότητα, την λεγόμενη πιθανότητα διασταύρωσης p_c (crossover probability), που καθορίζεται από το σχεδιαστή του ΓΑ. Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό και να αλλάζει κατά τον χρόνο τρεξίματος. Η τιμή αυτής της πιθανότητας διασταύρωσης επηρεάζει το χρόνο τρεξίματος του αλγορίθμου, δηλαδή τη σύγκλισή του. Η τιμή $p_c=1$, σημαίνει συνεχή εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, άρα το ψάξιμο γίνεται με μικρό βήμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η αναζήτηση να γίνει σε όλο το χώρο, άρα ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στο βέλτιστο, αλλά πολύ αργά. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας μικρές τιμές της p_c έχει σαν αποτέλεσμα το ψάξιμο να κάνει άλματα, άρα ο αλγόριθμος είναι πιθανόν να συγκλίνει πιο γρήγορα. Χρησιμοποιώντας μεγάλο βήμα, υπάρχει ο κίνδυνος, ο αλγόριθμος να ξεπεράσει το βέλτιστο και έτσι να αποκλίνει. Έτσι, επιλέγουμε συνήθως μεγάλο βήμα στην αρχή του ψαξίματος, και στη συνέχεια, όταν ο αλγόριθμος προσεγγίσει την τιμή του βέλτιστου, χρησιμοποιούμε μικρό βήμα αναζήτησης. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να αυξήσουμε την ταχύτητα αναζήτησης, χωρίς να κινδυνεύουμε να αποκλίνει ο αλγόριθμος.

3.4.5.3 Μετάλλαξη

Τελευταία στον κύκλο αναπαραγωγικής διαδικασίας και, ίσως, λιγότερο σημαντική, αλλά πάντως χρήσιμη, είναι η μετάλλαξη. Είναι μια λειτουργία που όταν συμβαίνει αραιά στη φύση, δρα βελτιωτικά για τους οργανισμούς και γενικά για την εξέλιξη της ζωής. Ανάλογος είναι ο ρόλος της και στα τεχνικά περιβάλλοντα. Η διαδικασία της μετάλλαξης ενεργεί σε ένα μόνο οργανισμό κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από τον γονέα στον απόγονο, επιλέγεται τυχαία με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης p_m (mutation probability), ένα ψηφίο και αντιστρέφεται (από 0 σε 1 ή το αντίστροφο). Στη δυαδική κωδικοποίηση, η μετάλλαξη επιτρέπει να αντιστραφεί το δυαδικό ψηφίο που θα επιλεγεί.

Ενδεικτικά, αν το κριτήριο για τη μετάλλαξη ενεργοποιηθεί για το έβδομο ψηφίο του ενός απόγονου τότε όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 3.2](#) αυτό αντιστρέφεται.



Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση μετάλλαξης

Είναι πολύ σημαντικό η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η μετάλλαξη να είναι αρκετά μικρή (περίπου μία μετάλλαξη σε κάθε χίλια ψηφία που αντιγράφονται), γιατί σε αντίθετη περίπτωση ο ΓΑ εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο. Αν και υπάρχει κάποια σύγχυση για το ρόλο της μετάλλαξης, τόσο φυσικής όσο και τεχνητής, το σίγουρο είναι πως είναι απαραίτητη. Η μετάλλαξη λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η επιλογή και η διασταύρωση, ενδεχομένως, χάσουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Όταν συμβαίνει, επιφέρει ποικιλία στον πληθυσμό, ανακατευθύνει την αναζήτηση και εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν αποκλείεται από τη διαδικασία του ψαξίματος.

3.5 Κύκλος ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Βήμα 1

Ο ΓΑ ξεκινά την αναζήτηση με ένα τυχαίο πληθυσμό N ατόμων. Εδώ καθορίζονται οι παράμετροι, το μέγεθος του πληθυσμού, οι παράμετροι για επιλογή, για διασταύρωση και για μετάλλαξη, καθώς και τα κριτήρια σύγκλισης. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια τερματισμού του ΓΑ. Μπορούμε να επιλέξουμε αρχικά τον μέγιστο αριθμό γενιών και ο αλγόριθμος να σταματήσει μόλις ο αριθμός αυτός συμπληρωθεί. Εναλλακτικά, μπορούμε να θέσουμε ένα συγκεκριμένο ποσοστό βελτίωσης του καλύτερου ατόμου ή του συνολικού πληθυσμού σε σχέση με κάποιον αριθμό προηγούμενων γενιών.

Βήμα 2

Υπολογίζεται η καταλληλότητα κάθε χρωμοσώματος στον πληθυσμό.

Βήμα 3

Δημιουργείται ο νέος πληθυσμός ως εξής:

- i. Επιλέγεται ένα ζευγάρι χρωμοσωμάτων από τον τρέχοντα πληθυσμό που θα αποτελέσει τους γονείς, με μια από τις μεθόδους επιλογής.
- ii. Από διασταύρωση των γονέων, με βάση την πιθανότητα p_c (πιθανότητα διασταύρωσης), σε ένα τυχαία επιλεγμένο σημείο προκύπτουν δύο νέοι απόγονοι. Εάν δεν πραγματοποιηθεί διασταύρωση, οι δύο νέοι απόγονοι είναι τα ακριβές αντίγραφα των γονέων.
- iii. Ακολουθεί η μετάλλαξη των δύο απογόνων με πιθανότητα p_m (πιθανότητα μετάλλαξης), και τα νέα χρωμοσώματα που προέκυψαν τοποθετούνται στο νέο πληθυσμό. Εάν το N είναι περιττός αριθμός, τότε μπορεί να απορριφθεί ένα μέλος του νέου πληθυσμού με τυχαίο τρόπο.

Βήμα 4

Ο τρέχων πληθυσμός αντικαθιστάται από το νέο πληθυσμό που δημιουργήθηκε.

Βήμα 5

Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 5 μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού.

3.6 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Η χρήση των ΓΑ σε διάφορες εφαρμογές είναι ελκυστική για αρκετούς λόγους. Οι κυριότεροι είναι οι εξής:

- Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των ΓΑ 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 με ΓΑ.

- Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι ΓΑ 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.
- Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Οι ΓΑ δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ, που δεν είναι αντιγραμμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά ανεκτές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των ΓΑ 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 ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ.
- 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, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
- 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 κτλ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους ΓΑ κάτι που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη «επικοινωνία» του ΓΑ με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του, ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Βέβαια αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους ΓΑ. Όπου όμως, δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
- Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Οι ΓΑ 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.
- Είναι η μόνη 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 την αναζήτηση με μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing) 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 ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, κάτι που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

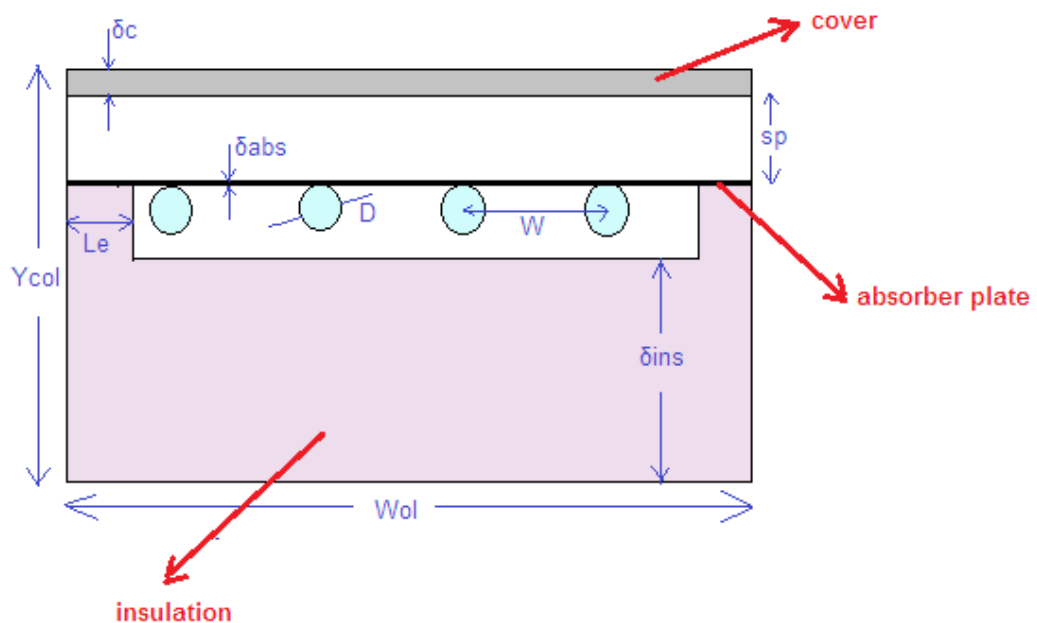
- Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι ΓΑ μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμα περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.

4 Μαθηματικό Μοντέλο

4.1 Γενικές πληροφορίες

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έγινε μια προσπάθεια να γραφτούν όλες οι απαραίτητες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθώντας μια λογική σειρά. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε και στο λογισμικό EES για το οποίο γίνεται λόγος παρακάτω.

Στο [Σχήμα 4.1](#) φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Πρόκειται για διάφορες διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις εξισώσεις που ακολουθούν.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Στις ακόλουθες εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν επίσης και οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds, Prandtl, Nusselt και Rayleigh. Επομένως θεωρήθηκε απαραίτητο να γίνει αρχικά μια αναφορά της φυσικής τους ερμηνείας.

- **Re** → Ο αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους του ρευστού. Μεγάλος Re σημαίνει ότι οι δυνάμεις αδράνειας είναι ισχυρές σε σύγκριση με τις δυνάμεις ιξώδους και συνεπώς οι τελευταίες δεν μπορούν να εμποδίσουν τις τυχαίες και γρήγορες διακυμάνσεις του ρευστού που οδηγούν σε τυρβώδη ροή. Σε αντίθετη περίπτωση οι ιξώδεις δυνάμεις κρατούν το ρευστό σε στρωτή ροή. [24]

$$Re = \frac{V \cdot x}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot x}{\mu}$$

Όπου:

- $V \rightarrow$ η ταχύτητα του ρευστού (m/s)
 - $x \rightarrow$ η απόσταση από την αρχή της επιφάνειας που πραγματοποιείται η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή (m)
 - $\nu \rightarrow$ το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m^2/s)
 - $\rho \rightarrow$ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)
 - $\mu \rightarrow$ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού ($kg/m \cdot s$)
- **Pr** \rightarrow Ο αριθμός Prandtl καθορίζει το σχετικό πάχος μεταξύ των οριακών στρωμάτων ταχύτητας και θερμοκρασίας. Για $Pr=1$ η θερμότητα και η ορμή μεταφέρονται διαμέσου του ρευστού με παρόμοιο τρόπο και τα οριακά στρώματα ταχύτητας και θερμοκρασίας έχουν το ίδιο πάχος. Μικροί αριθμοί Pr δηλώνουν ότι η θερμότητα διαχέεται πολύ γρηγορότερα σε σύγκριση με την ορμή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με μεγάλους αριθμούς Pr. Οι τιμές του αριθμού Pr κυμαίνονται από περίπου 0,01 για υγρά μέταλλα μέχρι και 10^5 για ορισμένα βαριά έλαια. [24]

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$$

Όπου:

- $C_p \rightarrow$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού (J/kg K)
 - $\mu \rightarrow$ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού ($kg/m \cdot s$)
 - $k \rightarrow$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού (W/m K)
- **Nu** \rightarrow Ο αριθμός Nu αντιπροσωπεύει το λόγο του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή προς τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε ακίνητο ρευστό κάποιου πάχους. Όσο ο αριθμός Nu αυξάνεται τόσο πιο αποτελεσματική είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Για $Nu = 1$ πρακτικά έχουμε μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή. [24]

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

Όπου:

- $h \rightarrow$ ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δια συναγωγής ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- $L \rightarrow$ μια χαρακτηριστική διάσταση (πχ διάμετρος αγωγού) (m)
- $k \rightarrow$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού ($W/m \cdot ^\circ C$)

- **Ra** → Ο αριθμός Rayleigh καθορίζει τη θέση μετάβασης από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή. [24]

$$Ra = \frac{g \cdot \beta' \cdot (T_S - T_\infty) \cdot x^3}{\nu \cdot \alpha}$$

Όπου:

- g → η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- β' → συντελεστής θερμικής διαστολής $\beta = \frac{1}{T_{S\infty}}$ (1/K)
- T_S → η θερμοκρασία της επιφάνειας (πχ θερμοκρασία στο τοίχωμα) (K)
- T_∞ → η θερμοκρασία του ρευστού μακριά από την επιφάνεια (K)
- x → μια χαρακτηριστική διάσταση (m)
- ν → το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m^2/s)
- α → συντελεστής διάχυσης (m^2/s)

4.2 Κατάστρωση Εξισώσεων

- Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας που αποδίδει ο συλλέκτης περιγράφεται από την παρακάτω σχέση που εκφράζει τον καταμερισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ωφέλιμη ενέργεια, θερμικές απώλειες και οπτικές απώλειες [3]:

$$Q_u = A_C \cdot [S - U_L \cdot (T_p - T_a)] \quad 4.1$$

Όπου:

- Q_u → ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς (W)
- A_C → η επιφάνεια του συλλέκτη (επιφάνεια του καλύμματος) (m^2)
- S → η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και των οπτικών απωλειών (W/m^2)
- U_L → ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από το συλλέκτη στο περιβάλλον δι'αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
- T_p → η μέση θερμοκρασία του απορροφητή ($^\circ\text{C}$)
- T_a → η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ\text{C}$)

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και με άλλους τρόπους ως εξής:

$$Q_u = A_C \cdot S - Q_{L,th} \quad 4.2$$

Όπου οι θερμικές απώλειες δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{L,th} = A_C \cdot U_L \cdot (T_{p,m} - T_a) \quad 4.3$$

- Η απορροφούμενη ισχύς από τον απορροφητή είναι [3]:

$$S = (\tau\alpha) \cdot G_T \quad 4.4$$

Όπου:

- τ → η διαπερατότητα του καλύμματος
- α → η απορροφητικότητα του απορροφητή
- G_T → η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Σε αυτό το σημείο επαναλαμβάνεται ότι η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη) που μπορεί να εκμεταλλευτεί ένας ηλιακός συλλέκτης είναι 1100W/m^2 περίπου αφού η μέγιστη ακτινοβολία που δίνει ο ήλιος είναι $G_{sc}=1353\text{W/m}^2$.

- Ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη αποτελείται από τρεις επιμέρους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας:
 - ✓ Τον συντελεστή θερμικών απωλειών κορυφής U_t ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)
 - ✓ Τον συντελεστή θερμικών απωλειών πυθμένος U_b ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)
 - ✓ Τον συντελεστή πλευρικών θερμικών απωλειών U_e ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

Επομένως:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad 4.5$$

- Ο συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής εκφράζεται ως εξής [3]:

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{t,pc}} + \frac{1}{h_{t,ca}} \right]^{-1} \quad 4.6$$

- Ο συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένος εκφράζεται ως εξής [3]:

$$U_b = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}} \quad 4.7$$

Όπου:

- k_{ins} → ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης ($W/m^{\circ}C$)
- δ_{ins} → το πάχος της οπίσθιας μόνωσης (m)

- Ο συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών εκφράζεται ως εξής [3]:

$$U_e = \frac{k_{ins}}{L_{e,ins}} \cdot \frac{A_e}{A_c} \quad 4.8$$

Όπου:

- $L_{e,ins}$ → το πάχος της πλευρικής μόνωσης
- A_e → η πλευρική επιφάνεια του συλλέκτη $A_e = (2L + 2W_{ol}) \cdot Y_{col}$
- L → το μήκος των σωλήνων που μεταφέρουν το εργαζόμενο μέσο / το μήκος του συλλέκτη (m)
- W_{ol} → το πλάτος του συλλέκτη (m)
- Y_{col} → το ύψος του συλλέκτη (m) $Y_{col} = \delta_c + sp + \delta_{abs} + D + \delta_{ins}$
- δ_c → το πάχος του καλύμματος (m)
- sp → το πάχος του διακένου μεταξύ του καλύμματος και του απορροφητή (m)
- δ_{abs} → το πάχος της απορροφητικής πλάκας (m)
- D → η διάμετρος των σωλήνων (m)

- Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής δίνεται από

τη σχέση $U_t = \left[\frac{1}{h_{t,pc}} + \frac{1}{h_{t,ca}} \right]^{-1}$

Όπου:

$h_{t,pc}$ → ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, μεταξύ του καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας ($W/m^2^{\circ}C$)

$$h_{t,pc} = h_{c,pc} + h_{r,pc} \quad 4.9$$

Εξαιτίας συναγωγής (convection)

Εξαιτίας ακτινοβολίας (radiation)

$h_{t,ca}$ → ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, μεταξύ του καλύμματος και του περιβάλλοντος ($W/m^2^{\circ}C$)

$$h_{t,ca} = h_{c,ca} + h_{r,ca} \quad 4.10$$

- Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-απορροφητή δια συναγωγής δίνεται από τη σχέση [1][26]:

$$h_{c,pc} = \frac{Nu_{pc} \cdot k_{air}}{sp} \quad 4.11$$

Όπου:

- k_{air} → ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα ανάμεσα στις δύο πλάκες ($W/m^{\circ}C$)
- sp → το πάχος του διακένου μεταξύ του καλύμματος και του απορροφητή (m)
- Nu_{pc} → ο αριθμός Nusselt μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας για γωνίες κλίσης $0^{\circ} < \beta < 75^{\circ}$ [1] [26]

$$Nu_{pc} = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - 1708 \cdot \frac{\sin^{1,6}(1,8 \cdot \beta)}{Ra_{pc} \cdot \cos \beta} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra_{pc} \cdot \cos \beta} \right]^+ + \left[\left[\frac{Ra_{pc} \cdot \cos \beta}{5830} \right]^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \quad 4.12$$

Οι δύο όροι στην εξίσωση 4.12 του Nu_{pc} που έχουν ως εκθέτες θετικά πρόσημα []⁺, δύναται να παραλειφθούν όταν οι όροι αυτοί προκύψουν αρνητικοί.

- Ra_{pc} → ο αριθμός Rayleigh μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας [1][26]

$$Ra_{pc} = \frac{g \cdot \beta' \cdot (T_p - T_c) \cdot sp^3 \cdot \rho^2 \cdot Pr_{air}}{\mu^2} \quad 4.13$$

- β' → συντελεστής θερμικής διαστολής $\beta' = \frac{1}{T_{pc}}$ (1/K) [1][26]
- T_c → η θερμοκρασία του καλύμματος

$$T_c = T_p - \left[\frac{U_t \cdot (T_p - T_a)}{h_{c,pc} + h_{r,pc}} \right] \quad 4.14$$

$$\overline{T}_{pc} = \frac{T_p + T_c}{2}$$

- Pr_{air} → ο αριθμός Prandtl για τον αέρα

$$Pr_{air} = \frac{\mu_{air}(T_a) \cdot C_{p,air}(T_a)}{k_{air}} \quad 4.15$$

- Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-απορροφητή δια ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση [3]:

$$h_{r,pc} = \frac{\sigma \cdot (T_p + T_c) \cdot (T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad 4.16$$

Όπου:

- $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ → η σταθερά Stefan-Boltzmann
- ε_c → συντελεστές εκπομπής του καλύμματος
- ε_p → συντελεστές εκπομπής του απορροφητή
- T_p, T_c → οι θερμοκρασίες καλύμματος, απορροφητή (K)

- Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-περιβάλλοντος δια συναγωγής δίνεται από τη σχέση [1]:

$$h_{c,ca} = 2,8 + 3 \cdot V \quad 4.17$$

Όπου:

- V → η ταχύτητα του αέρα περιβάλλοντος (m/s)

- Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-περιβάλλοντος δια ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση [1]:

$$h_{r,ca} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_c + T_\alpha) \cdot (T_c^2 + T_s^2) \quad 4.18$$

Όπου:

- T_p, T_c → οι θερμοκρασίες καλύμματος, απορροφητή (K)
- T_s → η θερμοκρασία του ουρανού $T_s = T_\alpha - 6$ (K)

- Μια ακόμη σχέση που εκφράζει την ωφέλιμη ισχύ είναι η παρακάτω [3]:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_{P_w} \cdot (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad 4.19$$

Όπου:

- $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$ → η συνολική παροχή μάζας του νερού στους σωλήνες (kg/s)
- $C_{P_w} = 4187 \text{ J/kg K}$ → η ειδική θερμοχωρητικότητα νερού
- $T_{f,out}$ → η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον συλλέκτη (K)
- $T_{f,in}$ → η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη (K)

- Επιπρόσθετα η ωφέλιμη ισχύς δύναται να εκφραστεί και ως ακολούθως [3]:

$$Q_u = A_C \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot G_T - U_L \cdot (T_{f,in} - T_a)] \quad 4.20$$

Όπου:

- F_R → ο παράγων θερμικής απολαβής που είναι ο λόγος της πραγματικής αποδιδόμενης θερμικής ισχύος Q_u , προς την θερμική ισχύ που θα αποδίδονταν αν ολόκληρος ο απορροφητής είχε τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού $T_{f,in}$. [3]

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_{p,w}}{A_C \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-A_C \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_{p,w}} \right)} \right] \quad 4.21$$

- F' → ο παράγων απόδοσης που παριστάνει το λόγο της πραγματικής αποδιδόμενης θερμικής ισχύος προς τη θερμική ισχύ που θα αποδίδονταν αν κάθε σημείο της πλάκας απορρόφησης είχε την αντίστοιχη θερμοκρασία του ρευστού.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{f,i}} + \frac{\gamma}{b \cdot k_b} \right]} \quad 4.22$$

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m \cdot (W - D)}{2}\right]}{\frac{m \cdot (W - D)}{2}}$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_{cop} \cdot \delta_{abs}}}$$

- D → η εξωτερική διάμετρος των σωλήνων ρευστού (m)
- D_i → η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων ρευστού $D_i = D - 0,002$ (m)
- W → το βήμα-απόσταση μεταξύ των σωλήνων ρευστού $W = \frac{W_{ol}}{N}$ (m)
- W_{ol} → το συνολικό πλάτος του συλλέκτη
- N → ο αριθμός των σωλήνων
- k_b, b, γ → θερμική αγωγιμότητα, εύρος και πάχος συνδέσμου σωλήνα-απορροφητικής πλάκας αντίστοιχα.
- $h_{f,i}$ → συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρευστού

$$h_{f,i} = Nu_w \cdot \frac{k_w}{D_i} \quad 4.23$$

- Nu_w → ο αριθμός Nusselt εντός των σωλήνων που περιέχει το ρευστό δηλαδή το νερό, για υδροδυναμικά ανεπτυγμένη στρωτή ροή, σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος και $Pr_w \gg 1$. [1] [25]

$$Nu_w = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot \frac{D_i}{L} \cdot Re_{D_i} \cdot Pr_w}{1 + 0,04 \cdot \left[\frac{D_i}{L} \cdot Re_{D_i} \cdot Pr_w \right]^{2/3}} \quad 4.24$$

- Re_{D_i} → ο αριθμός Reynolds στο εσωτερικό του σωλήνα

$$Re_{D_i} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_i \cdot \mu_w} \quad 4.25$$

- Pr_w → ο αριθμός Prandtl στο εσωτερικό του σωλήνα

$$Pr_w = \frac{\mu_w \cdot C_{p_w}}{k_w} \quad 4.26$$

- k_w → ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού (W/m °C)

- Τέλος ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος Q_u προς την αντίστοιχη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία $A_C G_T$. Επομένως προκύπτει η σχέση:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_C \cdot G_T} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_{f,in} - T_a}{G_T} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{f,out} - T_{f,in})}{A_C \cdot G_T} \quad 4.27$$

- Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη μπορεί να επίσης να εκφραστεί και συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου $T_{f,in}$ και εξόδου $T_{f,out}$ του θερμαινόμενου ρευστού, δηλαδή:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{f,out} - T_{f,in})}{A_C \cdot G_T} \quad 4.28$$

5 Εισαγωγή στο EES

5.1 Γενικές πληροφορίες για το EES [27]

Το Engineering Equation Solver (EES) είναι ένα εμπορικό πακέτο λογισμικού που αναπτύχθηκε από τον καθηγητή S.A.Klein του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του "University of Wisconsin-Madison". Πρόκειται για ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για ταυτόχρονη επίλυση συστημάτων (μη) γραμμικών εξισώσεων ενώ ταυτόχρονα παρέχει πολλές χρήσιμες εξειδικευμένες λειτουργίες και εξισώσεις για την επίλυση προβλημάτων θερμοδυναμικής και μεταφοράς θερμότητας, καθιστώντας το ένα χρήσιμο και ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα για μηχανολόγους μηχανικούς που εργάζονται σε αυτούς τους τομείς.

➤ Το EES αποθηκεύει θερμοδυναμικές ιδιότητες, εξαλείφοντας έτσι την επαναληπτική επίλυση του προβλήματος με το χέρι, μέσα από τη χρήση κώδικα που καλεί αυτές τις καθορισμένες θερμοδυναμικές ιδιότητες. Έτσι εκτελεί επαναληπτική επίλυση, εξαλείφοντας την επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία απόκτησης θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, με τις ενσωματωμένες λειτουργίες που διαθέτει.

➤ Το EES περιλαμβάνει επίσης παραμετρικούς πίνακες που επιτρέπουν στο χρήστη να συγκρίνει έναν αριθμό μεταβλητών σε μια στιγμή ενώ οι πίνακες αυτοί μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για την εξαγωγή διαγραμμάτων. Ακόμη μπορεί να ενσωματώσει μια εντολή τόσο στον κώδικα όσο και στους πίνακες ή τα διαγράμματα. Αυτό σημαίνει πως δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη (με τη βοήθεια κατάλληλης επιλογής) αλλάζοντας τα δεδομένα ή τον κώδικα να ανανεώνει αυτόματα τους πίνακες ή τα διαγράμματα που έχει "χτίσει".

➤ Ένα ακόμη σημαντικό εργαλείο που μας δίνει το συγκεκριμένο πακέτο είναι η δυνατότητα βελτιστοποίησης με διάφορες μεθόδους. Με τα εργαλεία βελτιστοποίησης που διαθέτει μπορεί να μεγιστοποιεί ή να ελαχιστοποιεί μια επιλεγμένη μεταβλητή μεταβάλλοντας ταυτόχρονα έναν αριθμό άλλων μεταβλητών. Η βελτιστοποίηση στο EES γίνεται με επιλογή κάποιας από τις παρακάτω μεθόδους:

- Μέθοδος Συζυγών Κατευθύνσεων (Conjugate Direction Method)
- Μέθοδος "Μεταβλητής Μετρικής" (Variable Metric Method)
- Μέθοδος Nelder-Mead Simplex (Nelder-Mead Simplex Method)
- Άμεσοι Αλγόριθμοι (Direct Algorithms)
- Μέθοδος Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Method)


➤ Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν πίνακες αναζήτησης για την αποθήκευση πληροφοριών που μπορεί να ανακτηθούν από μια κλήση στον κώδικα.

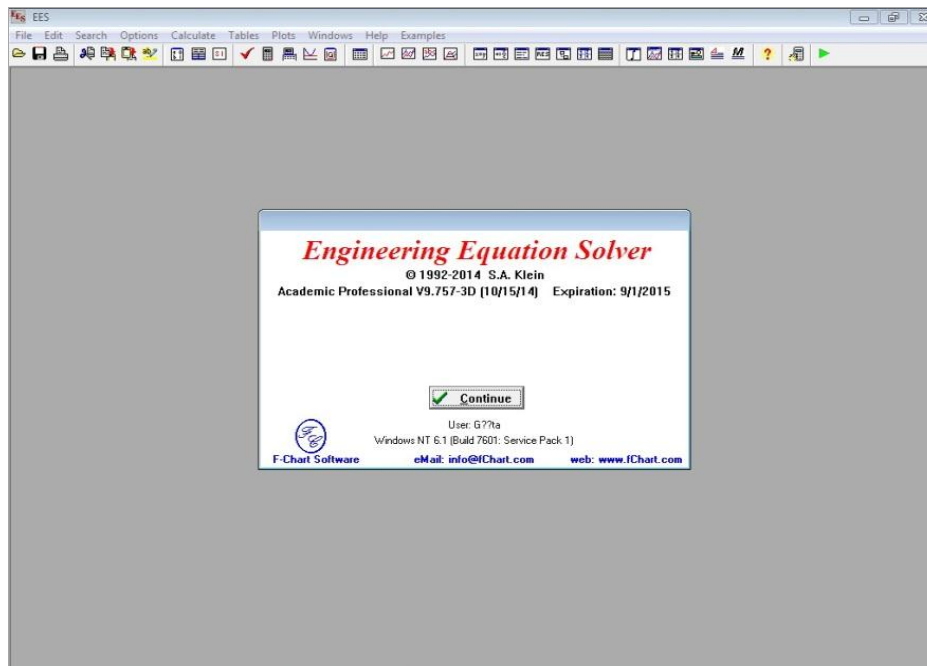
➤ Επίσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί-καταστρώνει τις εξισώσεις εισόδου σε οποιαδήποτε σειρά προκειμένου να αποκτήσει μια λύση, καθώς μπορεί επίσης να περιλαμβάνει δηλώσεις τύπου "if-then-else", οι οποίες μπορούν να είναι ένθετες μέσα στον υπόλοιπο κώδικα. Επιπρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον κώδικα "functions" καθώς επίσης και "procedures" που είναι "functions" με πολλές εξόδους.

➤ Μεταξύ άλλων επιλογών το EES επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει το σύστημα μονάδων που επιθυμεί, να καθορίσει κριτήρια τερματισμού ή αριθμό επαναλήψεων που θα εκτελέσει το πρόγραμμα, να ενεργοποιεί/απενεργοποιεί τον έλεγχο στις μονάδες των παραμέτρων (έτσι ο χρήστης μπορεί να ελέγξει αν υπάρχει ή όχι ασυμφωνία στο σύστημα μονάδων).

➤ Επίσης οι χρήστες μπορούν να καθορίσουν κάποιες “πιθανές τιμές” (guess values) ή να δώσουν κάποιους “περιορισμούς - μεταβλητά όρια” (variable limits) σε ορισμένες παραμέτρους προκειμένου να βοηθήσουν την επίλυση της επαναληπτικής διαδικασίας ώστε να βρεθεί μια λύση γρήγορα και με επιτυχία.

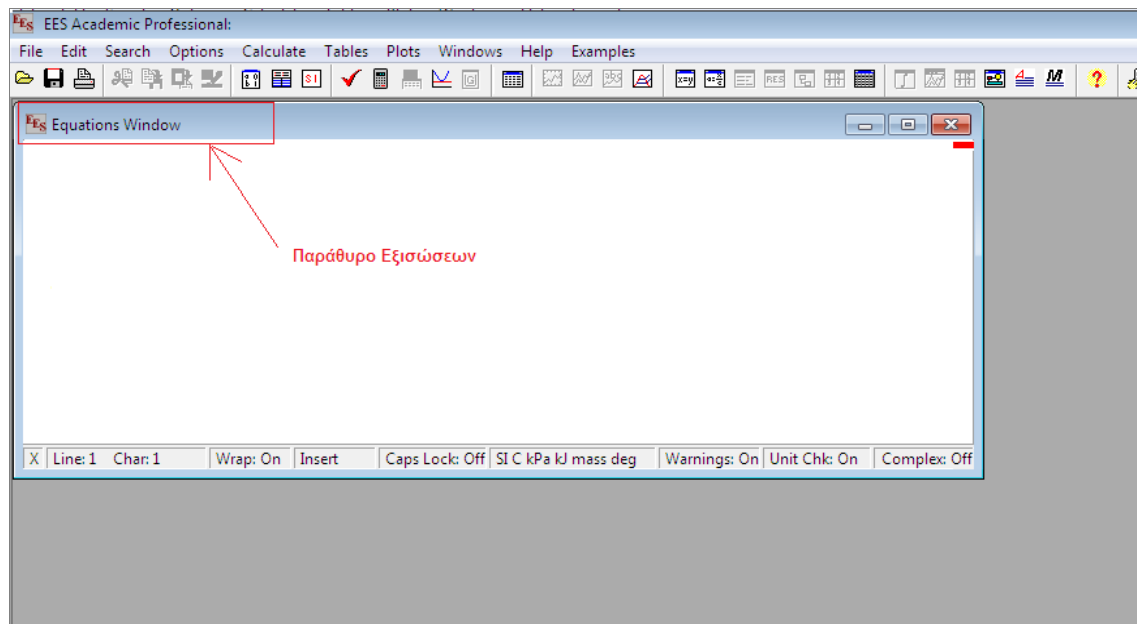
5.2 Έναρξη του προγράμματος-Πρώτη επαφή με το πρόγραμμα [27]

Αφού εγκαταστήσουμε το πρόγραμμα στον υπολογιστή μας επιλέγουμε το αρχείο . Ανοίγοντας το εμφανίζεται μια καρτέλα με την ονομασία του προγράμματος, τα στοιχεία του δημιουργού του καθώς και κάποια επιπλέον στοιχεία (όπως ημερομηνία λήξης του πακέτου, μοντέλο έκδοσης, χρήσιμες διευθύνσεις). Στην καρτέλα αυτή υπάρχει η επιλογή **Continue** όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 5.1](#) η οποία μας επιτρέπει να εισέλθουμε στο πρόγραμμα.



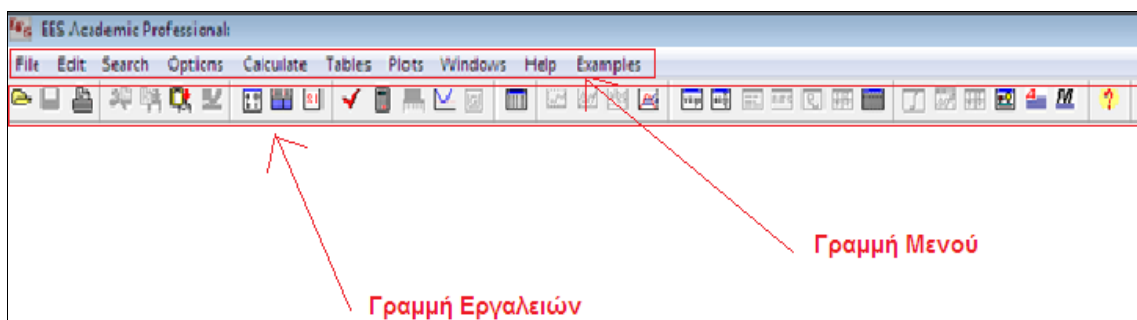
Σχήμα 5.1: Καρτέλα έναρξης προγράμματος

Αφού επιλέξουμε **Continue** ανοίγει το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος, στο οποίο μας επιτρέπεται να εισάγουμε τις εξισώσεις μας. Πρόκειται για το παράθυρο **Equation Window** το οποίο φαίνεται στο [Σχήμα 5.2](#) που ακολουθεί. Το συγκεκριμένο παράθυρο είναι η “καρδιά” του προγράμματος αφού εδώ παραθέτουμε τα δεδομένα του προβλήματος και τις απαραίτητες σχέσεις που απαιτούνται για την επίλυσή του. Ο κορμός του προβλήματος μπορεί να γραφτεί είτε με την μορφή εξισώσεων είτε με την μορφή κώδικα (functions, procedures, commands κτλ), όπως απαιτεί κάθε φορά η φύση του προβλήματος.



Σχήμα 5.2: Παράθυρο Εξισώσεων (Equations Window)

Εδώ εκτός από το παράθυρο των εξισώσεων εμφανίζεται η γραμμή μενού και η γραμμή εργαλείων όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.3](#).



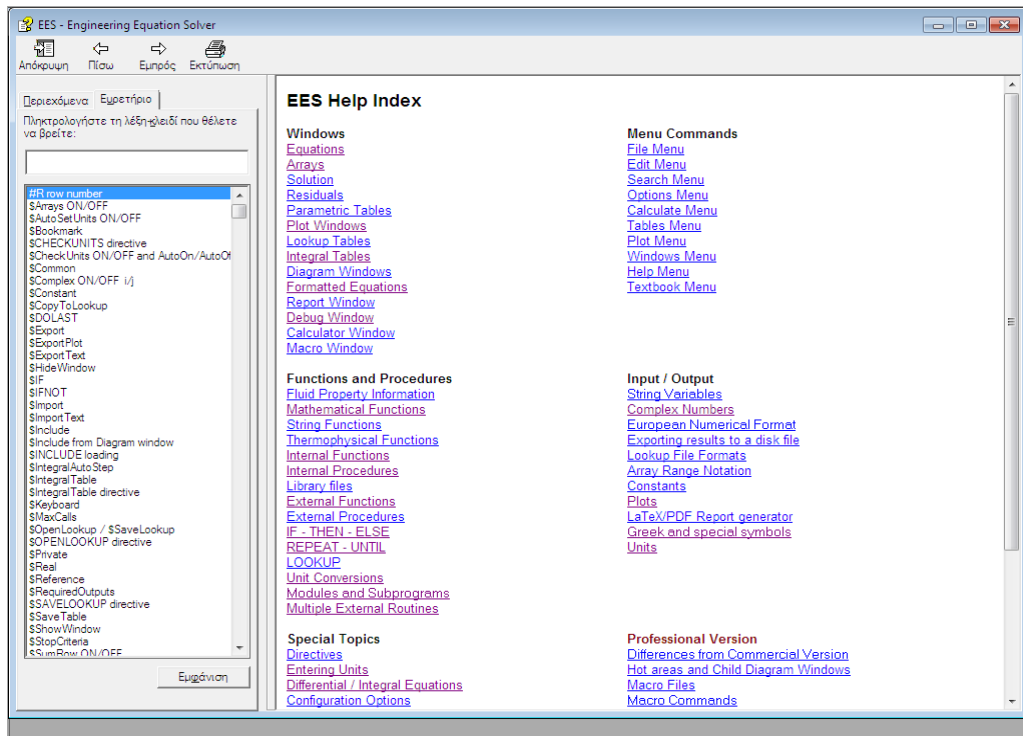
Σχήμα 5.3: Γραμμή Μενού και Γραμμή Εργαλείων

Η **γραμμή εργαλείων** περιέχει μικρά κουμπιά τα οποία παρέχουν γρήγορη πρόσβαση σε πολλές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εντολές του μενού. Αν μετακινήσουμε τον κέρσορα πάνω σε ένα κουμπί και αναμείνουμε για λίγα δευτερόλεπτα, τότε εμφανίζεται μια επεξήγηση της λειτουργίας του εν λόγω κουμπιού

Η **γραμμή μενού** περιέχει επιλογές όπως:

- **File** → παρέχει εντολές για τη φόρτωση νέου αρχείου, τη συγχώνευση και την αποθήκευση αρχείων εργασίας, τις βιβλιοθήκες και την εκτύπωση.
- **Edit** → παρέχει εντολές αναιρέσης, αντιγραφής και επικόλλησης πληροφοριών.
- **Search** → παρέχει εντολές εύρεσης και αντικατάστασης για χρήση στο παράθυρο εξισώσεων.


- **Options** → παρέχει εντολές προκειμένου:
 - να καθορίζουμε πιθανές τιμές (guess values) και όρια μεταβλητών μέσα από την επιλογή **Variable Info**,
 - να εισάγουμε μαθηματικές συναρτήσεις, θερμοδυναμικές ιδιότητες, ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και ροής ρευστών, δυνατότητα σχεδιασμού και βιβλιοθήκη με ρουτίνες (εσωτερικές ή εξωτερικές), μέσα από την επιλογή **Function Info**,
 - να μας δίνει πληροφορίες για την μετατροπή μονάδων μέσα από την επιλογή **Unit Conversion Info**,
 - να εισάγουμε παγκόσμιες σταθερές (όπως η επιτάχυνση της βαρύτητας, ο αριθμός "π" κτλ) μέσα από την επιλογή **Constants**,
 - να επιλέξουμε το σύστημα μονάδων που επιθυμούμε μέσα από την επιλογή **Unit System**,
 - να καθορίσουμε κριτήρια τερματισμού ή αριθμό επαναλήψεων που θα εκτελέσει το πρόγραμμα μέσα από την επιλογή **Stop Criteria**,
 - να εισάγουμε προεπιλεγμένες πληροφορίες από την επιλογή **Default Info**,
 - να καθορίσουμε ένα σύνολο προτιμήσεων-επιλογών (όπως για παράδειγμα αποθήκευση κάθε λίγα λεπτά, αυτόματο έλεγχο μονάδων κτλ) μέσα από την επιλογή **Preferences**,
 - να καθαρίζουμε-σβήνουμε μεταβλητές που δεν χρησιμοποιούνται μέσα από την επιλογή **Purge Unused Variables**.
- **Calculate** → παρέχει εντολές όπως:
 - ελέγχου δηλαδή αν είναι σωστά γραμμένες οι εξισώσεις μας ή υπάρχουν λάθη σύνταξης **-Check/Format**,
 - επίλυσης του προβλήματος **-Solve**,
 - ελαχιστοποίησης/μεγιστοποίησης κάποιας μεταβλητής **-Min/Max**,
 - ελέγχου μονάδων **- Check Units**,
 - επαναφοράς των ρυθμίσεων πιθανών τιμών **-Reset Guesses**,
 - επαναφοράς των ρυθμίσεων για τα όρια μεταβλητών **-Reset Limits**
- **Tables** → παρέχει εντολές προκειμένου να δημιουργήσουμε ή να τροποποιήσουμε το περιεχόμενο των παραμετρικών πινάκων (**Parametric Tables**) ή των πινάκων αναζήτησης (**Lookup Tables**) ή να κάνουμε γραμμική παλινδρόμηση στα δεδομένα τους. Εδώ ο παραμετρικός πίνακας παρομοιάζεται με ένα υπολογιστικό φύλλο στο οποίο μπορούμε μεταβάλλοντας κάποιες από τις παραμέτρους-δεδομένα να βλέπουμε πως μεταβάλλονται οι υπόλοιπες μεταβλητές. Ο πίνακας αναζήτησης κρατά αποθηκευμένα τα δεδομένα και μπορεί ανά πάσα στιγμή να τα ανακτήσει.
- **Plots** → παρέχει εντολές δημιουργίας (**New Plot**), τροποποίησης (**Modify**) ή επικαιροποίησης (**Overlay**) διαγραμμάτων μέσα από τα στοιχεία που παρέχουν οι παραμετρικοί πίνακες ή πίνακες αναζήτησης ή πίνακες διάταξης (**Array Tables**). Επίσης δίνει την δυνατότητα εμφάνισης της γραμμής τάσης (**Curve Fit**).
- **Windows** → περιέχει εντολές γρήγορης πρόσβασης σε ορισμένα παράθυρα όπως σε πίνακες, διαγράμματα, στο παράθυρο όπου μπορούμε να δούμε τις εξισώσεις μας γραμμένες με "μαθηματικό τρόπο" (**Formatted Equations**) κα.
- **Help** → παρέχει εντολές για την πρόσβαση σε μια βιβλιοθήκη ηλεκτρονικής τεκμηρίωσης στην οποία μπορούμε πληκτρολογώντας στο πεδίο αναζήτησης να βρούμε πληροφορίες για οποιαδήποτε λειτουργία του EES. Η καρτέλα που εμφανίζεται φαίνεται στο [Σχήμα 5.4](#).



Σχήμα 5.4: Βοηθητικό παράθυρο αναζήτησης πληροφοριών

- **Examples** → μέσα από την επιλογή αυτή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη με τη βοήθεια παραδειγμάτων να δει πως καταστρώνονται διάφορα προβλήματα στο EES και να μάθει μέσα από προσωπική εξάσκηση βασικές λειτουργίες του προγράμματος.

Η γραμμή εργαλείων περιέχει τα εξής κουμπιά:

Open  : ανοίγει ένα καινούριο αρχείο EES.

Save  : αποθηκεύει.


Print  : εκτυπώνει.


Cut  : κάνει αποκοπή.


Copy  : κάνει αντιγραφή.


Paste  : κάνει επικόλληση.

Hilite Text  : χρωματίζει το κείμενο που θα επιλέξουμε.

Variable Info  : καθορίζουμε πιθανές τιμές και όρια μεταβλητών.


Function Info  : εισάγουμε μαθηματικές συναρτήσεις, θερμοδυναμικές ιδιότητες, ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και ροής ρευστών, δυνατότητα σχεδιασμού και βιβλιοθήκη με ρουτίνες.


Unit System  : επιλέγουμε το σύστημα μονάδων που επιθυμούμε.


Check Equations  : κάνει έλεγχο σύνταξης και ελέγχει το πλήθος των εξισώσεων και το πλήθος των αγνώστων για να ξέρουμε αν το σύστημά μας έχει κάποιο βαθμό ελευθερίας ή όχι .


Solve  : επιλύει το πρόβλημα.


Solve Table  : επιλύει τον πίνακα που έχουμε κατασκευάσει.


Min/Max  : ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί κάποια αντικειμενική συνάρτηση /μεταβλητή, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα κάποιες άλλες μεταβλητές προκειμένου να κάνει βελτιστοποίηση.


Update Guesses  : ενημερώνει τις πιθανές τιμές των αγνωστων μεταβλητών με βάση τις πιο πρόσφατες υπολογισμένες τιμές.


New parametric Table  : κατασκευάζει έναν καινούργιο παραμετρικό πίνακα με τις μεταβλητές που θα επιλέξουμε.


New Plot Window  : κατασκευάζει ένα καινούργιο διάγραμμα βασιζόμενο σε έναν υπάρχων πίνακα.

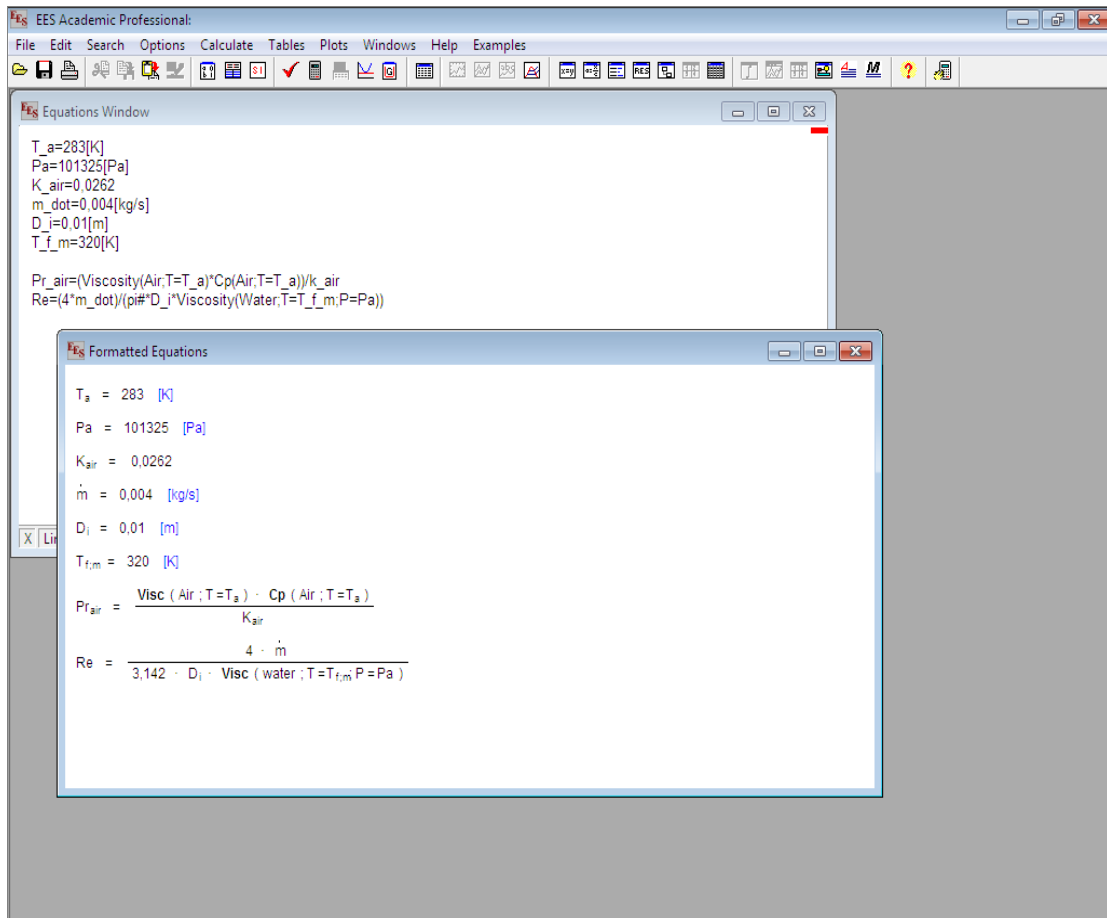
Overlay Plot  : “πλοτάρει” σε ένα διάγραμμα που έχουμε ήδη φτιάξει ένα επιπλέον γράφημα δίνοντας μας την δυνατότητα να δούμε για παράδειγμα πως μεταβάλλεται κάποια παράμετρος αν αλλάξουμε κάποιο δεδομένο.

Show/Hide Toolbar  : εμφανίζει ή αποκρύπτει μια γραμμή εργαλείων με την οποία μπορούμε να προσθέσουμε κείμενο, σχήματα, πλέγμα, κουμπιά εντολών ή ακόμα και βίντεο.


Property Plot  : δημιουργεί ένα καινούργιο διάγραμμα με θερμοδυναμικές ιδιότητες κάποιας επιλεγμένης ουσίας (όπως για παράδειγμα ένα T-s διάγραμμα για το νερό) .


Equations Window  : είναι το κεντρικό παράθυρο στο οποίο γράφουμε το πρόβλημά μας είτε με την μορφή εξισώσεων, είτε με την μορφή κώδικα.


Formatted Equations  : μας δείχνει τις εξισώσεις μας γραμμένες με “μαθηματικό τρόπο” όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.5](#) μέσα από ένα απλό παράδειγμα.




Σχήμα 5.5: Παράθυρο εμφάνισης του κώδικα με μαθηματικοποιημένο τρόπο (Formatted Equations)

Solution Window  : εμφανίζει την λύση μαζί με όλες τις τιμές των παραμέτρων που έχουμε ορίσει.

Residual window  : σε περίπτωση που στο πρόβλημα που έχουμε καταστρώσει υπολείπεται κάποια παράμετρος, το συγκεκριμένο παράθυρο μας βοηθά να εντοπίσουμε ποιο στοιχείο είναι αυτό που μας λείπει και εμποδίζει την επίλυση. Επιπλέον μας δίνει πληροφορίες σχετικά με το πόσες φορές καλείται κάποια εξίσωση (για να λυθεί για παράδειγμα ένα σύστημα), ποιες εξισώσεις έχουν “μπλοκαριστεί” προκειμένου να επιλυθούν με κάποια όρια ανοχής σε περίπτωση επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης (για να επιλυθεί επαναληπτικά ένα σύστημα, η επίλυση ξεκινά με μια υποτιθέμενη λύση και κάνει επαναλήψεις με τις ανανεωμένες κάθε φορά τιμές ώσπου να επιτευχθεί σύγκλιση).

Computational Flow Window  : εμφανίζει ένα διάγραμμα ροής στο οποίο φαίνεται η λογική σειρά επίλυσης. Εδώ διαχωρίζονται σε ομάδες οι εξισώσεις που μπορούν να επιλυθούν απ’

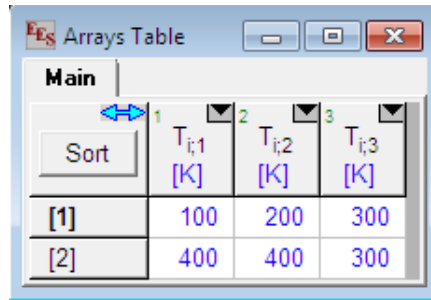
ευθείας (έναν άγνωστος) και οι εξισώσεις που είναι σε πεπλεγμένη μορφή και πρέπει να “μπλοκαριστούν” ώστε να επιλυθούν επαναληπτικά.

Array Table : εμφανίζει έναν πίνακα ο οποίος δημιουργήθηκε από την δήλωση κάποιας μεταβλητής με την μορφή πίνακα. Για παράδειγμα έστω ότι δηλώνουμε τις θερμοκρασίες

$$T[1;1..3]=[100[k];200[k];300[k]]$$

$$T[2;1..3]=[400[k];400[k];300[k]]$$


Τότε επιλέγοντας το συγκεκριμένο κουμπί εμφανίζονται οι θερμοκρασίες που δηλώσαμε σε μορφή πίνακα όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.6](#).

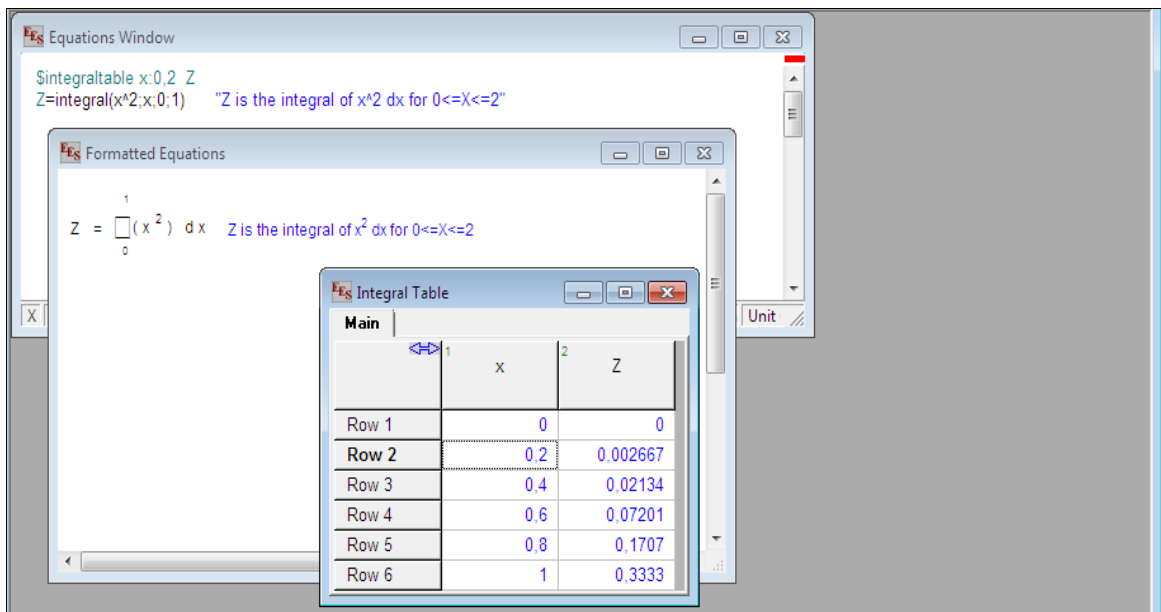


	1	2	3
Sort	$T_{i,1}$ [K]	$T_{i,2}$ [K]	$T_{i,3}$ [K]
[1]	100	200	300
[2]	400	400	300

[Σχήμα 5.6](#): Πίνακας διάταξης στοιχείων (Array Table)


Parametric Table : ανοίγει τους παραμετρικούς πίνακες που έχουμε κατασκευάσει.

Integral Table : σε περίπτωση που στο παράθυρο εξισώσεων χρησιμοποιείται συνάρτηση ολοκληρώματος τότε ενεργοποιείται το συγκεκριμένο εικονίδιο στο οποίο φαίνεται ο πίνακας με τις ενδιάμεσες τιμές του ολοκληρώματος. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο [Σχήμα 5.7](#) που ακολουθεί.



	1	2
	x	Z
Row 1	0	0
Row 2	0.2	0.002667
Row 3	0.4	0.02134
Row 4	0.6	0.07201
Row 5	0.8	0.1707
Row 6	1	0.3333

[Σχήμα 5.7](#): Πίνακας εμφάνισης ενδιάμεσων τιμών μετά από υπολογισμό ολοκληρώματος (Integral Table)

Plot Window  : εμφανίζει τα διαγράμματα που έχουμε κατασκευάσει.







Lookup Table  : εμφανίζει τους πίνακες αναζήτησης δηλαδή πίνακες που κρατούν αποθηκευμένα τα δεδομένα και μπορούν ανά πάσα στιγμή να ανακτηθούν.

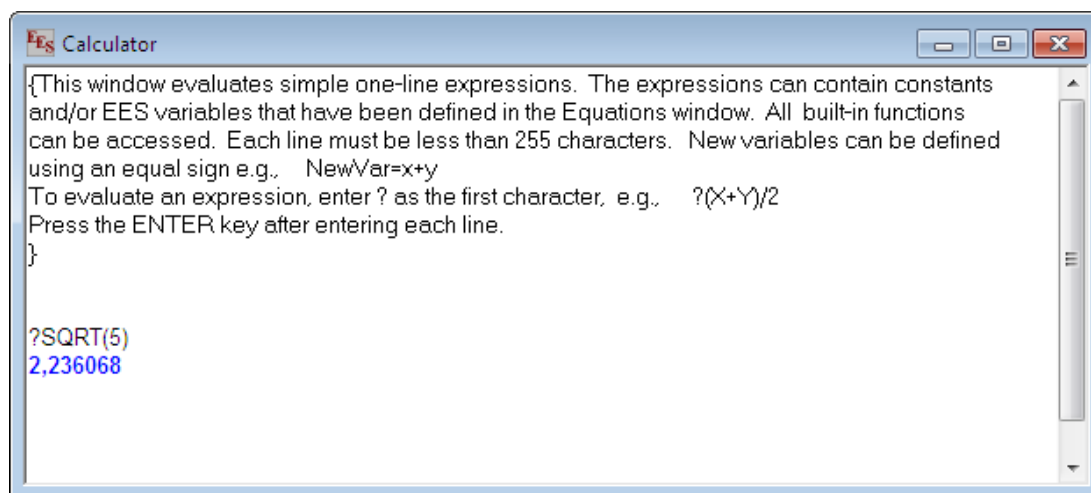
Diagram Window  : εμφανίζει ένα παράθυρο στο οποίο μπορούμε με την βοήθεια του Toolbar να προσθέσουμε κείμενο, διάφορα γραφικά, διαγράμματα, πλέγμα, κουμπιά εντολών ή ακόμα και βίντεο.

Report Window  : εμφανίζει ένα παράθυρο το οποίο είναι ουσιαστικά ένας επεξεργαστής κειμένου (όπως το Word) στο οποίο μπορούμε να γράψουμε και να επεξεργαστούμε κείμενο ή εξισώσεις ή να αντιγράψουμε εικόνες και διαγράμματα (τα οποία ενημερώνονται με κάθε αλλαγή που γίνεται αυτόματα).

Macro Window  : δημιουργεί ή καλεί μια μακροεντολή. Η επέκταση του ονόματος .emf στο αρχείο δημιουργεί ένα αρχείο μακροεντολών. Με μακροεντολές το EES μπορεί απ'ευθείας να επικοινωνήσει με αρχεία Microsoft Excel ή Word.

Help Index  : ανοίγει το παράθυρο της βοήθειας στο οποίο μπορούμε να βρούμε πληροφορίες για όλες τις λειτουργίες του EES.

Calculator  : ανοίγει ένα παράθυρο το οποίο μπορούμε να το χρησιμοποιούμε για πρόχειρους υπολογισμούς (υπολογισμοί μιας γραμμής όπως κάνει ο υπολογιστής τσέπης). Για παράδειγμα αν εισάγουμε ?sqrt(5) και πατήσουμε Enter τότε εμφανίζει στην επόμενη γραμμή το αποτέλεσμα όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 5.8](#).



Σχήμα 5.8: Παράθυρο πρόχειρων υπολογισμών (Calculator)

5.3 Μεταφέροντας το πρόβλημά μας στο EES

Η αρχική σκέψη ήταν να φτιαχτεί ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης με δεδομένες συνθήκες όπως:

- Οι συντελεστές εκπομπής του καλύμματος και του απορροφητή.
- Η διαπερατότητα του καλύμματος.
- Η απορροφητικότητα του απορροφητή.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη.
- Ο αριθμός σωλήνων νερού.
- Η κλίση του συλλέκτη.
- Θερμικές αγωγιμότητες νερού, σωλήνα, αέρα, και μόνωσης.
- Η συνολική παροχή νερού στους σωλήνες.
- Η θερμοκρασία εισόδου νερού.
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Η προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Επομένως τα αρχικά δεδομένα του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-1) επιλέχτηκαν ως εξής:

Πίνακας 5-1: Δεδομένα αρχικού προβλήματος

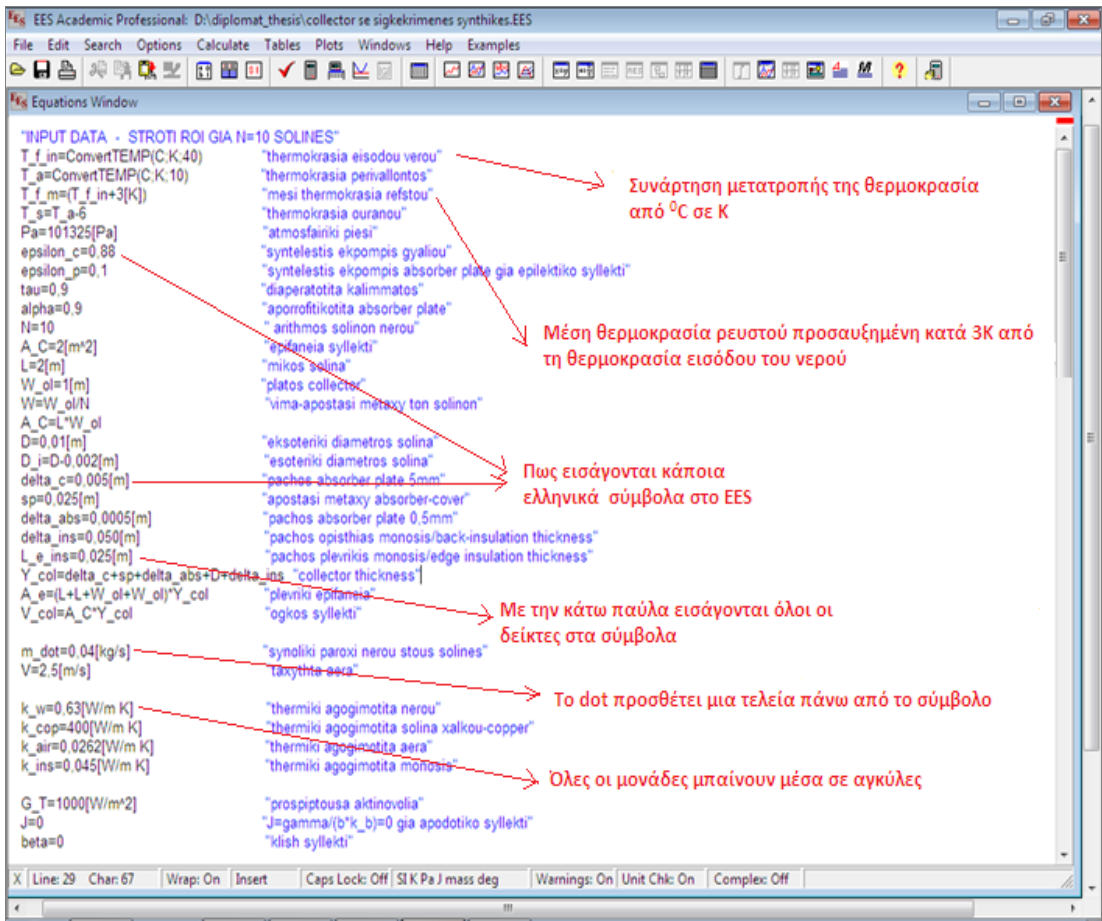
Θερμοδυναμικά μεγέθη		
$T_{f,in}$	$40^{\circ}C$	θερμοκρασία εισόδου ρευστού
T_a	$10^{\circ}C$	θερμοκρασία περιβάλλοντος
$T_{f,m}$	$T_{f,in} + 3$	μέση θερμοκρασία ρευστού
P_a	$101325Pa$	ατμοσφαιρική πίεση

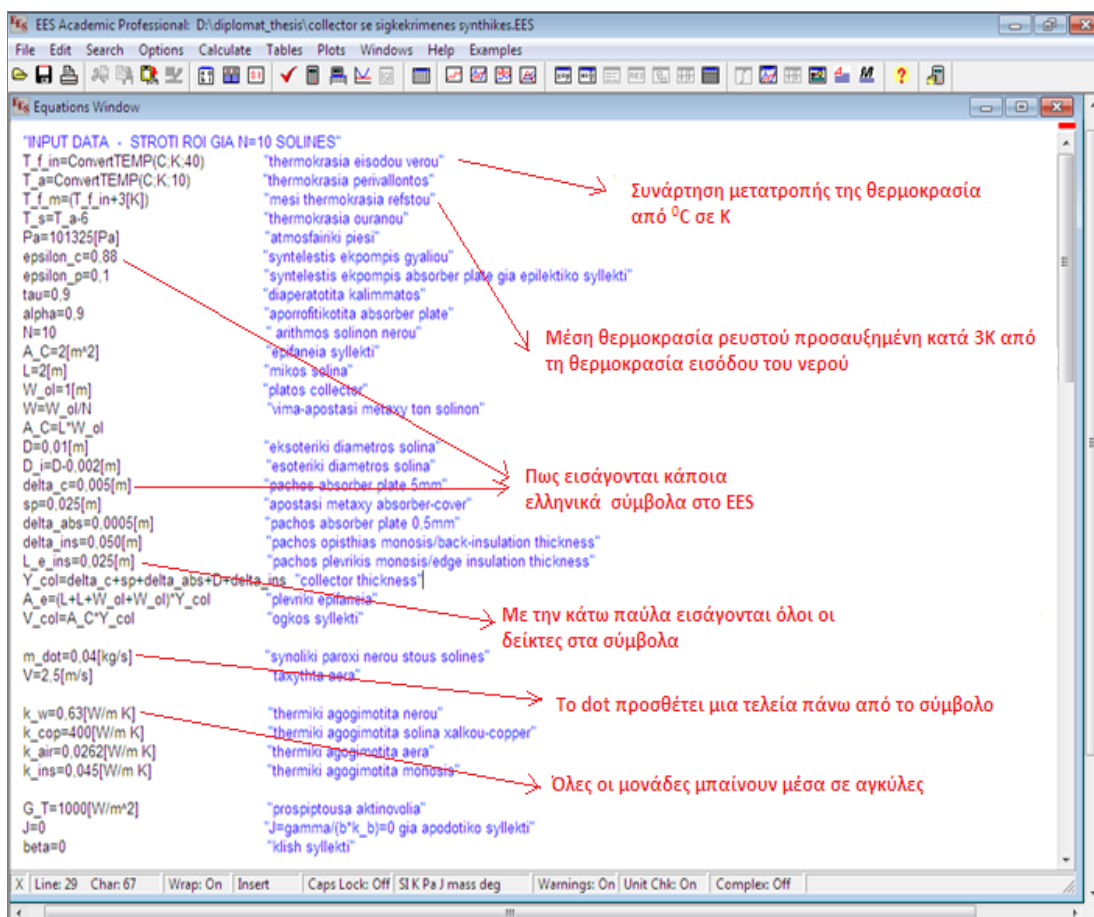
Ιδιότητες συλλέκτη		
ε_c	0,88	συντελεστές εκπομπής του καλύμματος
ε_p	0,1	συντελεστές εκπομπής του απορροφητή → επιλεκτικός συλλέκτης
τ	0,9	διαπερατότητα καλύμματος
α	0,9	απορροφητικότητα απορροφητή
$J = \frac{\gamma}{b \cdot k_b}$	0	(από την εξίσωση 4.22 του F') → για αποδοτικό συλλέκτη

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συλλέκτη		
A_c	$2m^2$	συλλεκτική επιφάνεια
L	$2m$	μήκος σωλήνων νερού/μήκος συλλέκτη
W_{col}	$1m$	πλάτος συλλέκτη
D	$0,01m$	διάμετρος σωλήνων
δ_c	$0,005m$	πάχος καλύμματος
δ_{abs}	$0,0005m$	πάχος απορροφητικής πλάκας
δ_{ins}	$0,05m$	πάχος οπίσθιας μόνωσης
$L_{e,ins}$	$0,025m$	πάχος πλευρικής μόνωσης
sp	$0,025m$	απόσταση μεταξύ καλύμματος και απορροφητή
β	0°	γωνία κλίσης του συλλέκτη

Διάφορα στοιχεία		
N	10	αριθμός σωλήνων νερού
\dot{m}	0,04 kg/s	συνολική παροχή νερού στους σωλήνες
V	2,5 m/s	ταχύτητα αέρα
G_T	1000 W/m ²	προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Θερμικές αγωγιμότητες		
k_W	0,63 W/m K	θερμική αγωγιμότητα νερού
k_{cop}	400 W/m K	θερμική αγωγιμότητα σωλήνων χαλκού
k_{air}	0,0262 W/m K	θερμική αγωγιμότητα αέρα
k_{ins}	0,045 W/m K	θερμική αγωγιμότητα μόνωσης

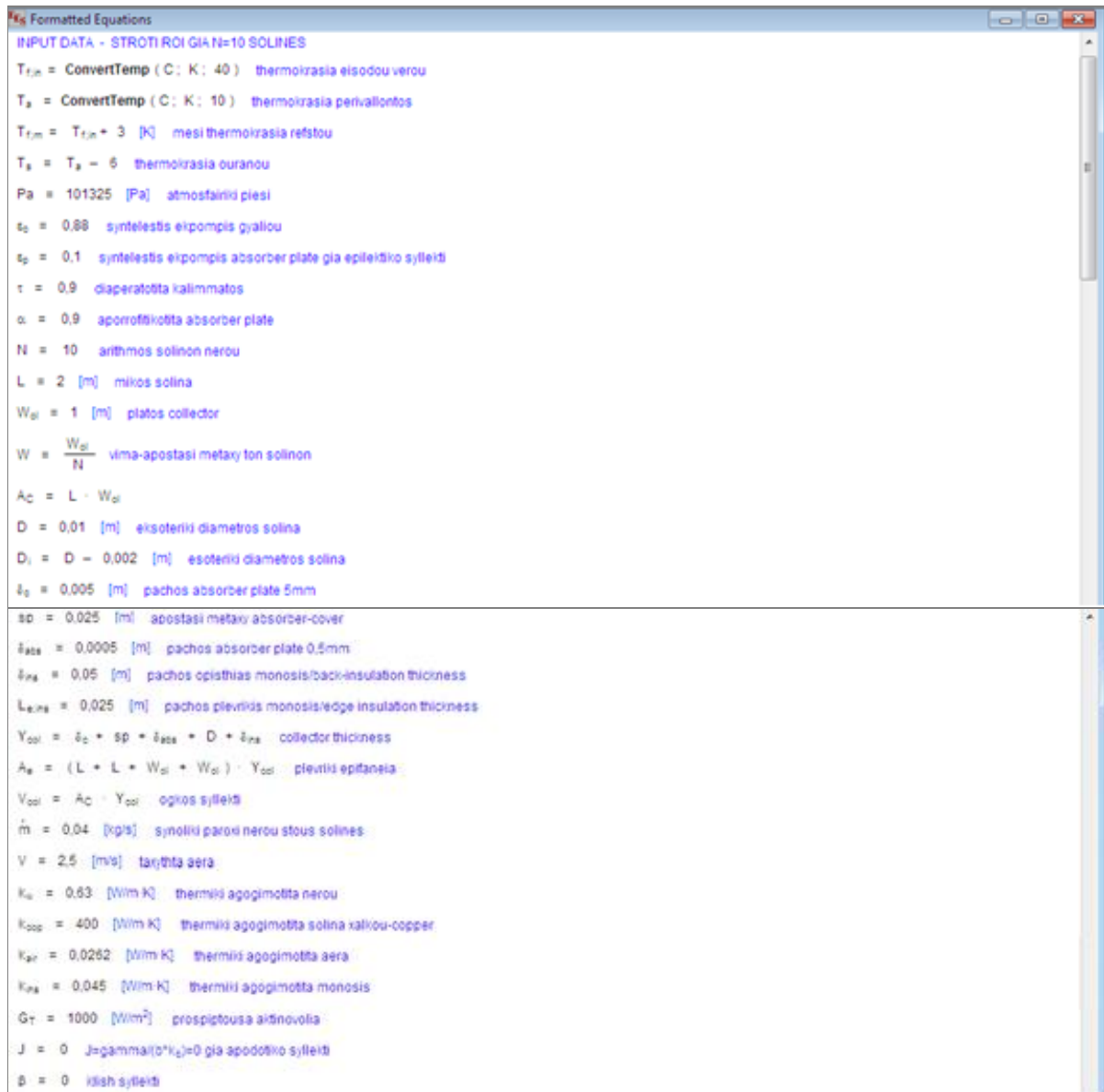
Στο [Σχήμα 5.9](#) φαίνεται η μορφή με την οποία εισήχθησαν τα παραπάνω δεδομένα στο παράθυρο εξισώσεων (Equation Window ). Δίπλα σε κάθε παράμετρο φαίνεται και μια σύντομη περιγραφή με λατινικούς χαρακτήρες (οι ελληνικοί χαρακτήρες δεν αναγνωρίζονται από το EES) τοποθετημένοι μέσα σε εισαγωγικά¹.



Σχήμα 5.9: Εισαγωγή δεδομένα στο Equation Window του EES

¹Ότι γράφεται μέσα σε άγκιστρα { } ή εισαγωγικά “ ” αναγνωρίζεται από το EES ως σχόλιο. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο είναι ότι τα τελευταία, δηλαδή ότι γράφεται μέσα σε εισαγωγικά είναι ορατό και στο Formatted Equations, ενώ τα άγκιστρα φαίνονται μόνο στο Equation Window.

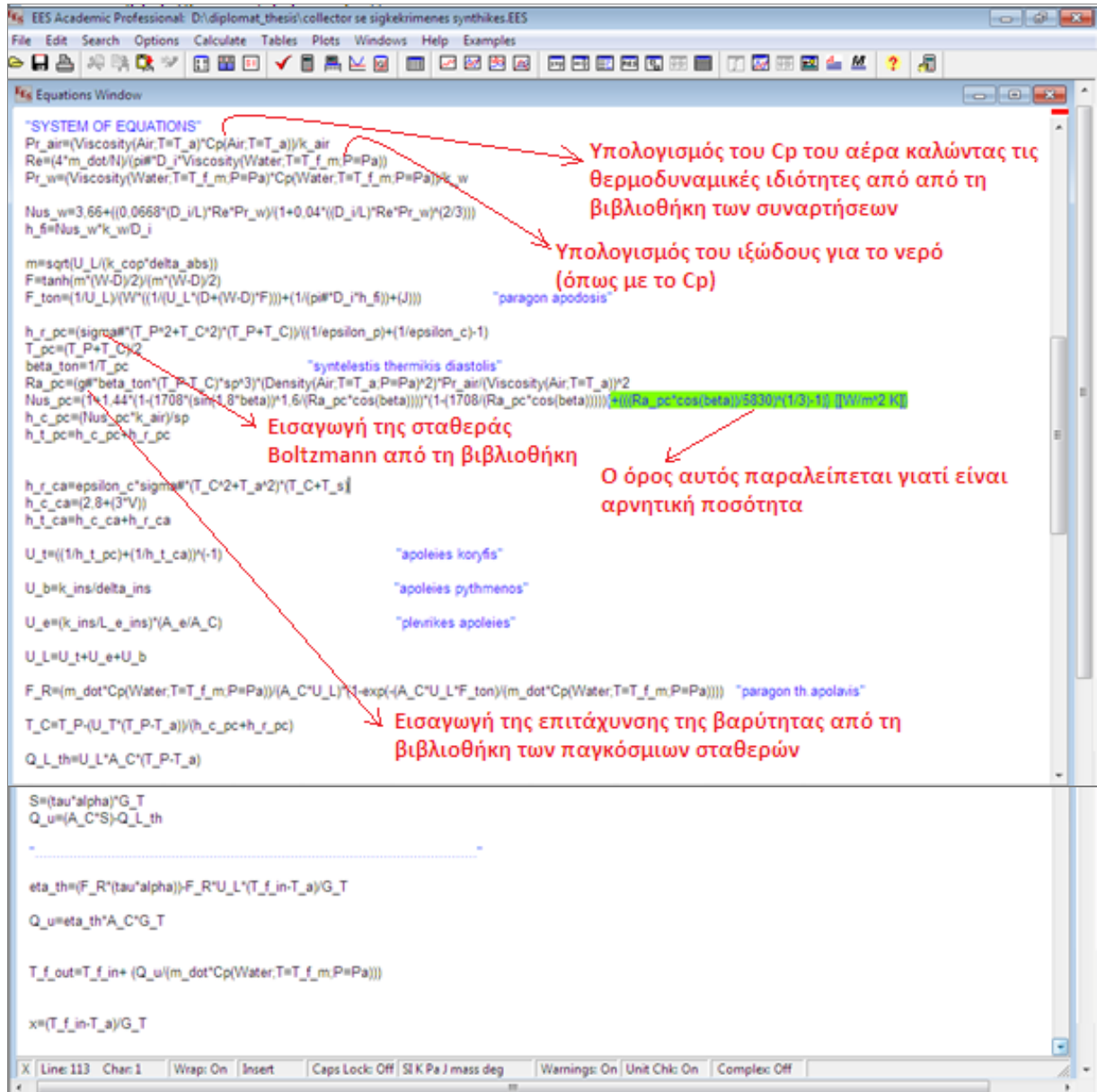
Επιπλέον στο [Σχήμα 5.10](#) προβάλλονται όλα τα δεδομένα με πιο μαθηματικοποιημένη μορφή, όπως μπορεί ο χρήστης να δει μέσα από το παράθυρο Formatted Equations [\[x=y\]](#). Εδώ μπορεί να δει κανείς μια πιο εποπτική εικόνα των όσων γράφτηκαν στο παράθυρο εξισώσεων, όπως για παράδειγμα αν γράφτηκαν σωστά τα ελληνικά σύμβολα, αν εισήχθησαν σωστά οι δείκτες στα σύμβολα, αν γράφτηκαν σωστά οι μονάδες μέτρησης.



Σχήμα 5.10: Εμφάνιση δεδομένων με μαθηματικοποιημένη μορφή στο παράθυρο Formatted Equations

Στη συνέχεια γράφτηκαν όλες οι εξισώσεις (4.1 ÷ 4.28) που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόβλημα, στο παράθυρο εξισώσεων . Το αποτέλεσμα φαίνεται στο [Σχήμα 5.11](#).

Διευκρινίζεται ότι ο όρος που έχει χρωματιστεί με πράσινο στη σχέση του αριθμού Nusselt (Nu_{pc}) παραλείπεται κατά τον υπολογισμό του, αφού όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα πρόκειται για αρνητική ποσότητα. Παρά ταύτα έχει γραφτεί μέσα σε άγκιστρα για πληρότητα του κειμένου.



Σχήμα 5.11: Εισαγωγή εξισώσεων στο παράθυρο εξισώσεων

Ακολουθεί το Σχήμα 5.12 όπου προβάλλονται όλες οι εξισώσεις με πιο μαθηματικοποιημένη μορφή. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύπλοκες σχέσεις σύνθετα κλάσματα, παραστάσεις με εκθέτες, ρίζες και πολλά άλλα μπορούν να επαληθευτούν και να επιβεβαιωθούν αν ανατρέξει κανείς στο Formatted Equations.

Formatted Equations

SYSTEM OF EQUATIONS

$$Pr_{air} = \frac{\text{Visc}(\text{Air}; T=T_a) \cdot Cp(\text{Air}; T=T_a)}{k_{air}}$$

$$Re = \frac{4 \cdot \frac{\dot{m}}{N}}{3,142 \cdot D_i \cdot \text{Visc}(\text{water}; T=T_{r,m}; P=Pa)}$$

$$Pr_w = \frac{\text{Visc}(\text{water}; T=T_{r,m}; P=Pa) \cdot Cp(\text{water}; T=T_{r,m}; P=Pa)}{k_w}$$

$$Nus_w = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot \frac{D_i}{L} \cdot Re \cdot Pr_w}{1 + 0,04 \cdot \left[\frac{D_i}{L} \cdot Re \cdot Pr_w \right]^{(2/3)}}$$

$$h_i = Nus_w \cdot \frac{k_w}{D_i}$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_{top} \cdot \delta_{top}}}$$

$$F = \frac{\tanh\left[m \cdot \left(\frac{W-D}{2}\right)\right]}{m \cdot \left(\frac{W-D}{2}\right)}$$

$$F_{ton} = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot (D + (W-D) \cdot F)} + \frac{1}{3,142 \cdot D_i \cdot h_i} + J \right]} \quad \text{paragon apodosis}$$

$$h_{r,po} = \frac{5,670E-08 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4] \cdot (T_p^2 + T_c^2) \cdot (T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1}$$

$$T_{pc} = \frac{T_p + T_c}{2}$$

$$\beta_{ton} = \frac{1}{T_{pc}} \quad \text{synteletis thermikis diastolis}$$

$$Ra_{po} = 9,807 \text{ [m/s}^2] \cdot \beta_{ton} \cdot (T_p - T_c) \cdot sp^3 \cdot \rho(\text{Air}; T=T_a; P=Pa)^2 \cdot \frac{Pr_{air}}{\text{Visc}(\text{Air}; T=T_a)^2}$$

$$Nus_{po} = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - 1708 \cdot \frac{\sin^{1,6}(1,8 \cdot \beta)}{Ra_{po} \cdot \cos(\beta)} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra_{po} \cdot \cos(\beta)} \right]$$

$$h_{c,po} = \frac{Nus_{po} \cdot k_{air}}{sp}$$

$$h_{c,oa} = h_{c,po} + h_{r,po}$$

$$h_{r,oa} = \epsilon_o \cdot 5,670E-08 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4] \cdot (T_c^2 + T_a^2) \cdot (T_c + T_a)$$

$$h_{c,oa} = 2,8 + 3 \cdot V$$

$$h_{c,oa} = h_{c,oa} + h_{r,oa}$$

$$U_1 = \left[\frac{1}{h_{c,po}} + \frac{1}{h_{c,oa}} \right]^{-1} \quad \text{apoteles korifis}$$

$$U_b = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}} \quad \text{apoteles pythmenos}$$

$$U_a = \frac{k_{ins}}{L_{k,ins}} \cdot \frac{A_k}{A_c} \quad \text{plevrikes apoteles}$$

$$U_L = U_1 + U_a + U_b$$

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot Cp(\text{water}; T=T_{r,m}; P=Pa)}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c \cdot U_L \cdot F_{ton}}{\dot{m} \cdot Cp(\text{water}; T=T_{r,m}; P=Pa)}\right) \right] \quad \text{paragon th apotaxis}$$

$$T_c = T_p - \left[\frac{U_L \cdot (T_p - T_a)}{h_{c,po} + h_{r,po}} \right]$$

$$\dot{Q}_{L,th} = U_L \cdot A_c \cdot (T_p - T_a)$$

$$S = \tau \cdot \alpha \cdot G_T$$

$$Q_u = A_c \cdot S - \dot{Q}_{L,th}$$


$$\eta_{th} = F_R \cdot \tau \cdot \alpha - F_R \cdot U_L \cdot \left[\frac{T_{r,m} - T_a}{G_T} \right]$$

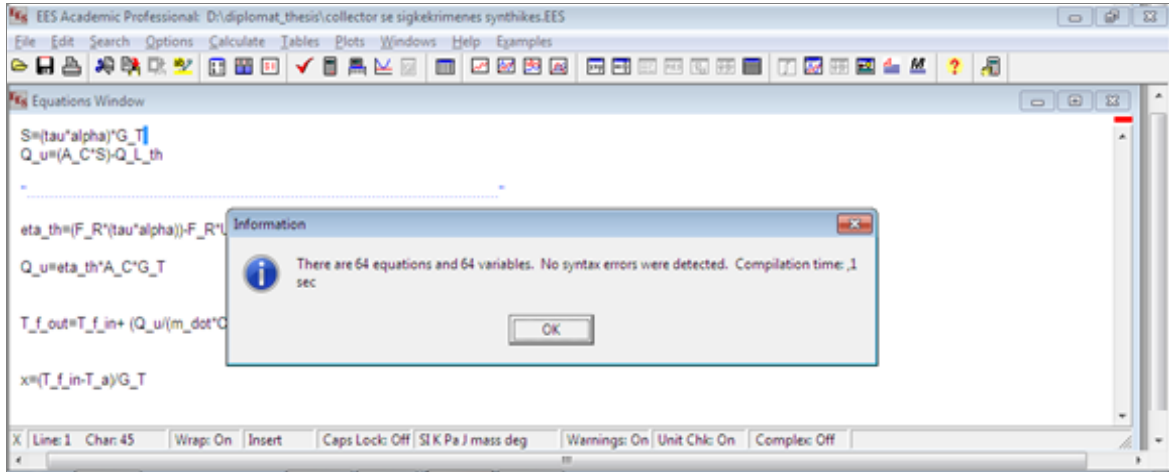
$$Q_u = \eta_{th} \cdot A_c \cdot G_T$$

$$T_{r,out} = T_{r,in} + \frac{Q_u}{\dot{m} \cdot Cp(\text{water}; T=T_{r,m}; P=Pa)}$$


$$x = \frac{T_{r,m} - T_a}{G_T}$$

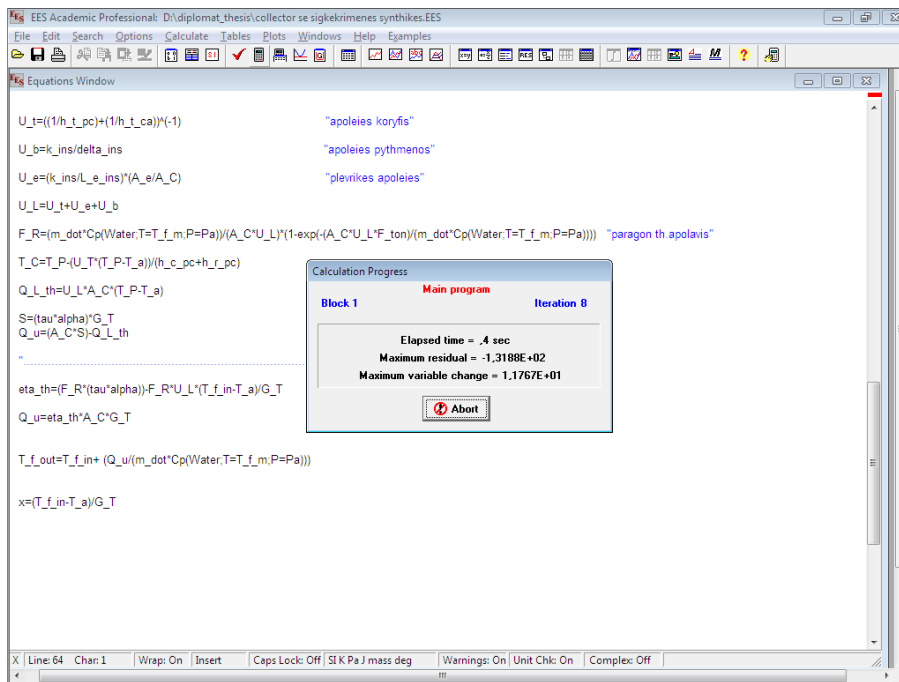
Σχήμα 5.12: Εμφάνιση εξισώσεων στο Formatted Equations

Αφού εισήχθησαν όλα τα δεδομένα και οι εξισώσεις του προβλήματος, με τη βοήθεια του κουμπιού  (**check equations**) γίνεται έλεγχος αν υπάρχει κάποιο λάθος σύνταξης ή αν υπολείπεται κάποια εξίσωση (δηλαδή αν ο αριθμός των εξισώσεων ισούται με των αριθμό των παραμέτρων), όπως δείχνει και το [Σχήμα 5.13](#).



Σχήμα 5.13: Έλεγχος σύνταξης και πληρότητας του συστήματος

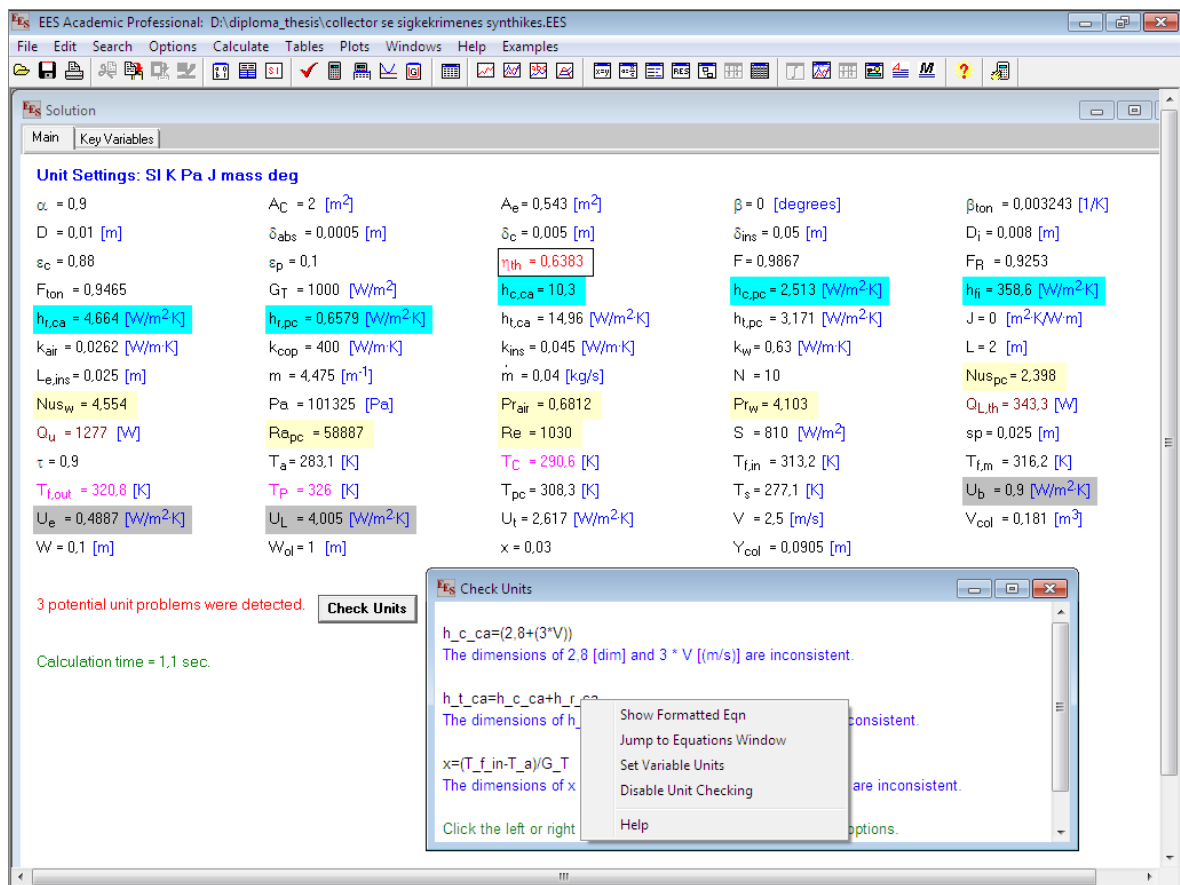
Εφόσον ο έλεγχος έδειξε ότι το σύστημα μπορεί να επιλυθεί, με το κουμπί  (solve) ή **Calculate** → **Solve**, το πρόγραμμα ξεκινά την επίλυση του συστήματος. Σε αυτή τη φάση εμφανίζεται στην οθόνη ένα παράθυρο που δείχνει την πρόοδο των υπολογισμών, σαν αυτό στο [Σχήμα 5.14](#).



Σχήμα 5.14: Παράθυρο πρόοδου υπολογισμών

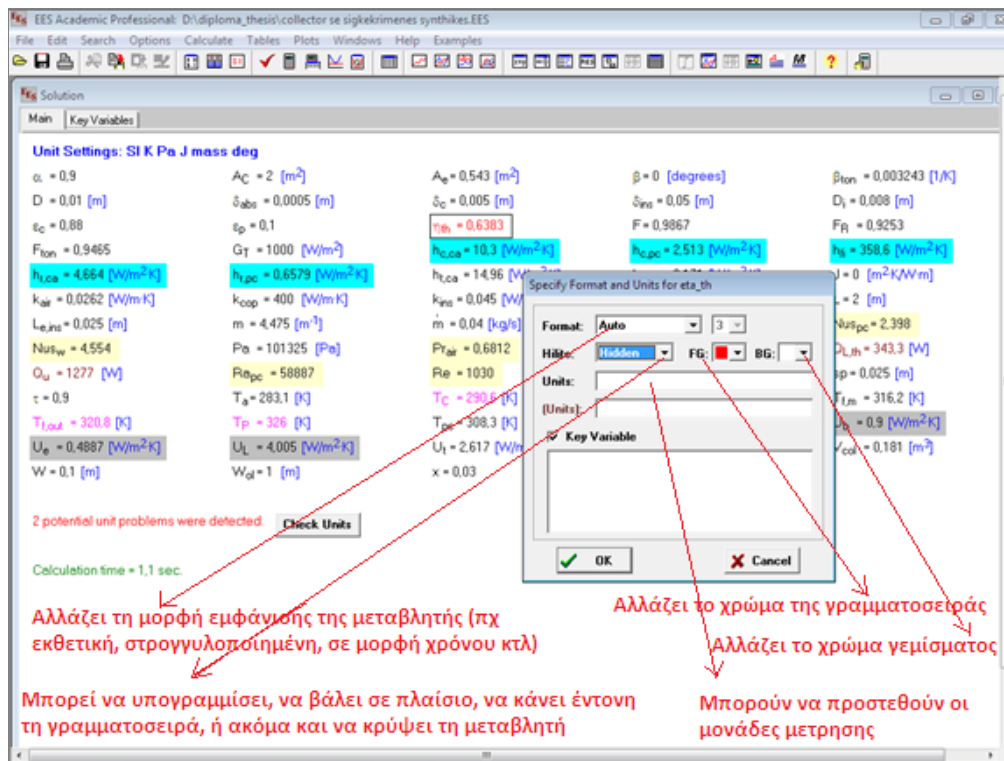
Το παράθυρο προόδου υπολογισμών δείχνει τον αριθμό των επαναλήψεων που εκτελεί το πρόγραμμα (αφού η επίλυση γίνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας) καθώς και το χρόνο που κρατά η διαδικασία επίλυσης. Όταν το πρόγραμμα καταλήξει στο σωστό αποτέλεσμα, η επιλογή **Abort** (επιτρέπει στο χρήστη να «διαφύγει» από την διαδικασία της επίλυσης και να διαβάσει τα αποτελέσματα ως εκείνη τη στιγμή/επανάληψη) που βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου, μετατρέπεται σε επιλογή **Continue** και επιτρέπει στο χρήστη να έχει πρόσβαση στην καρτέλα με τα αποτελέσματα ή αλλιώς στο παράθυρο Solution όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.15](#).

Στο συγκεκριμένο παράθυρο εκτός από τα αποτελέσματα εμφανίζονται και κάποια μηνύματα. Το ένα αφορά το χρόνο που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση των υπολογισμών και το άλλο έχει να κάνει με πιθανές ασυμφωνίες στις μονάδες μέτρησης. Κάνοντας κλικ στην επιλογή **Check Units** ανοίγει μια καρτέλα στην οποία φαίνεται σε ποια παράμετρο δεν συμφωνούν οι μονάδες. Για παράδειγμα στην περίπτωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-περιβάλλοντος δια συναγωγής $h_{c,ca} = 2,8 + 3 \cdot V$, το πρόγραμμα δεν μπορεί να αντιληφθεί τι μονάδες πρέπει να δώσει όταν προστίθεται ένας σταθερός όρος με κάποιον άλλον που έχει μονάδες. Επομένως ο χρήστης μπορεί να προσθέσει τις σωστές μονάδες χειροκίνητα είτε από το συγκεκριμένο παράθυρο επιλέγοντας **Set Variable Units** (αντίστροφα μπορεί να επιλέξει **Disable Unit Checking** και να σβήσει το μήνυμα), είτε όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 5.16](#) κάνοντας δεξί κλικ πάνω στη μεταβλητή, είτε από τη γραμμή μενού **Options** → **Variable Units** → **πεδίο Units**.



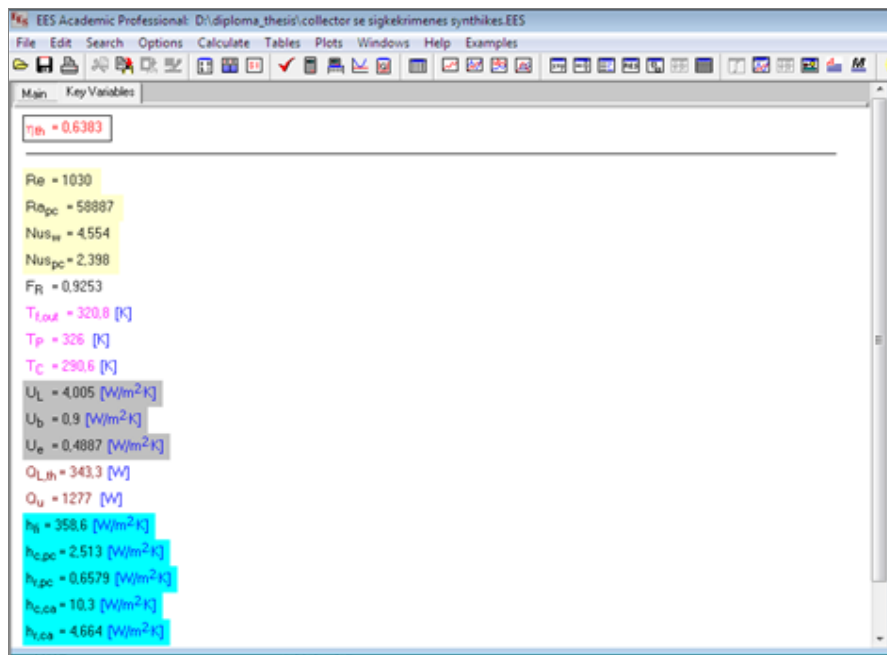
Σχήμα 5.15: Παράθυρο αποτελεσμάτων

Παρατηρείται ότι ορισμένα από τα αποτελέσματα είναι χρωματισμένα με διαφορετικά χρώματα. Αυτό γίνεται για λόγους διευκόλυνσης του χρήστη. Κάνοντας δεξί κλικ πάνω σε κάποια παράμετρο εμφανίζεται ένα βοηθητικό παράθυρο όπως στο [Σχήμα 5.16](#) με το οποίο δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας της εμφάνισης των αποτελεσμάτων. Παρακάτω φαίνονται όλες οι επιλογές που δίνει το συγκεκριμένο παράθυρο.



Σχήμα 5.16: Παράθυρο επεξεργασίας της εμφάνισης των αποτελεσμάτων

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι στο παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων υπάρχει και η επιλογή **Key Variable**. Αυτή η επιλογή επιτρέπει τη δημιουργία μιας νέας καρτέλας Key Variable όπως στο [Σχήμα 5.17](#) στην οποία εμφανίζονται συγκεντρωμένα όσα από τα αποτελέσματα έχει επιλέξει ο χρήστης να ξεχωρίζουν προς δική του διευκόλυνση. Εδώ μπορεί να προστεθεί δίπλα στη μεταβλητή κάποιο βοηθητικό κείμενο ή κάποια διαχωριστική γραμμή που θα κατηγοριοποιεί τα αποτελέσματα σε ομάδες.



Σχήμα 5.17: Παράθυρο Key Variables

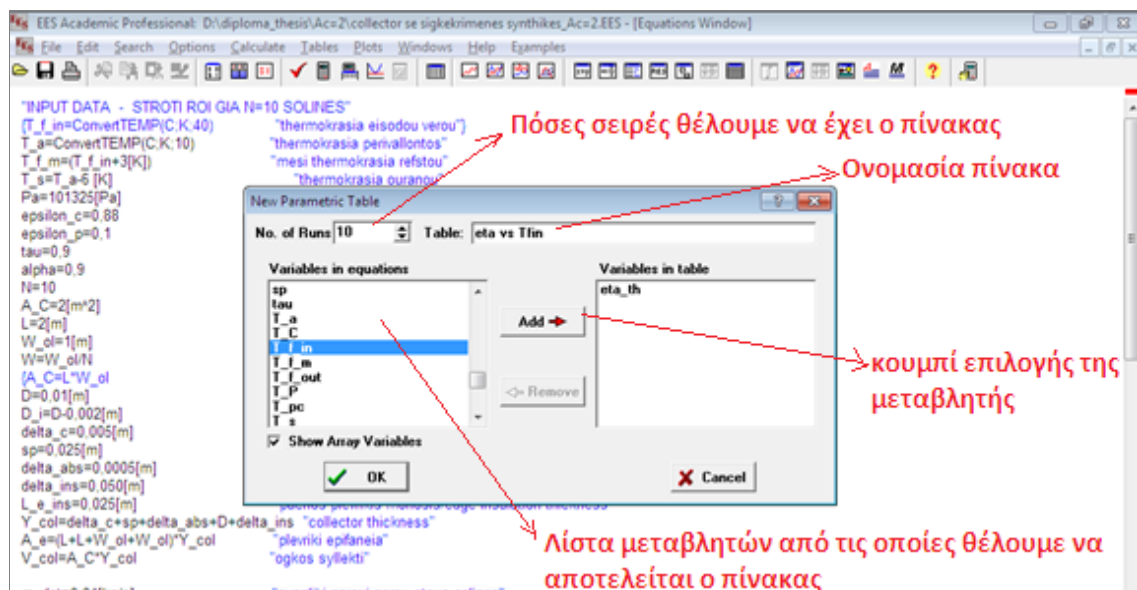
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-2) συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα του προβλήματος που τέθηκε με συγκεκριμένες συνθήκες.

Πίνακας 5-2: Τα κυριότερα αποτελέσματα του αρχικού προβλήματος

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη		Χαρακτηριστικά συλλέκτη	
η_{th}	0,6383	F_R	0,9253
Συντελεστές μετάδοσης θερμότητας		F'	0,9465
h_{fi}	358,6 W/m ² K	Θερμότητες	
$h_{c,ca}$	10,3 W/ m ² K	Q_U	1277 W
$h_{r,ca}$	4,664 W/ m ² K	$Q_{L,th}$	343,3 W
$h_{c,pc}$	2,513 W/ m ² K	S	810 W/m ²
$h_{r,pc}$	0,6579 W/ m ² K	Θερμοκρασίες	
Συντελεστές θερμικών απωλειών		T_P	326 K
U_L	4,005 W/ m ² K	T_C	290,6 K
U_b	0,9 W/ m ² K	$T_{f,OUT}$	320,8 K
U_e	0,4887 W/ m ² K		
Αδιάστατοι αριθμοί			
Re_{Di}	1030		
Ra_{pc}	58887		
Nu_{pc}	2,398		
Nu_w	4,554		

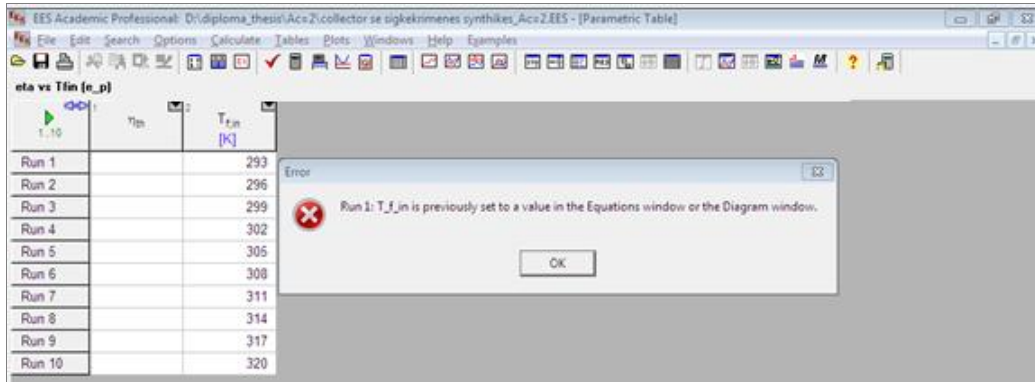
Στη συνέχεια προκειμένου να αναπαραχθούν ορισμένα διαγράμματα απαιτείται προηγουμένως η δημιουργία παραμετρικών πινάκων. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να φτιαχτεί το πρώτο διάγραμμα. Τα υπόλοιπα έγιναν με παρόμοιο τρόπο.

Αρχικά σκοπός είναι να φτιαχτεί ένα διάγραμμα του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού για διάφορες τιμές του συντελεστή εκπομπής της απορροφητικής πλάκας. Από τη γραμμή μενού επιλέγουμε **Tables** → **New Parametric Table** και εμφανίζεται μια νέα καρτέλα σαν αυτή στο [Σχήμα 5.18](#). Επιλέγουμε τις μεταβλητές η_{th} , $T_{f,in}$ από τη λίστα μεταβλητών και με το κουμπί **Add** μετατρέπονται σε στήλες του πίνακα.



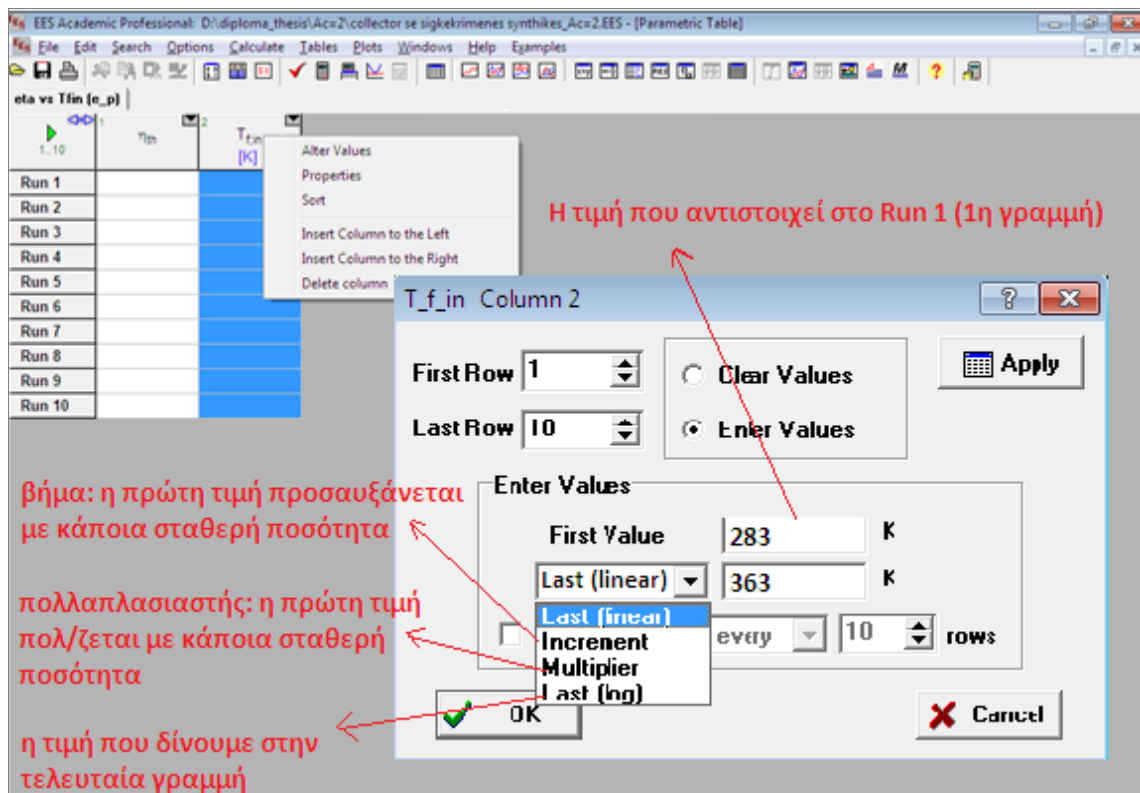
Σχήμα 5.18: Καρτέλα για τη δημιουργία παραμετρικού πίνακα

Επομένως φτιάχτηκε ο πρώτος παραμετρικός πίνακας. Το επόμενο βήμα είναι να δώσουμε τιμές στη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Σε αυτό το σημείο επιστρέφουμε στο παράθυρο εξισώσεων και βάζουμε σε άγκιστρα (ή εισαγωγικά) τη θερμοκρασία $T_{f,in}$ ώστε το πρόγραμμα να την αντιληφθεί ως σχόλιο όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 5.18](#) (αυτή η επισήμανση μπορεί και να προηγηθεί του παραμετρικού πίνακα). Αυτό γίνεται για να μπορέσει το πρόγραμμα να μας δώσει τιμές του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας. Αν ξεχάσουμε να κάνουμε κάτι τέτοιο εμφανίζεται ένα μήνυμα όπως στο [Σχήμα 5.19](#) το οποίο γράφει ότι η θερμοκρασία είναι έχει ήδη οριστεί.



Σχήμα 5.19: Εμφάνιση μηνύματος ότι στην παράμετρο έχει δοθεί ήδη κάποια τιμή

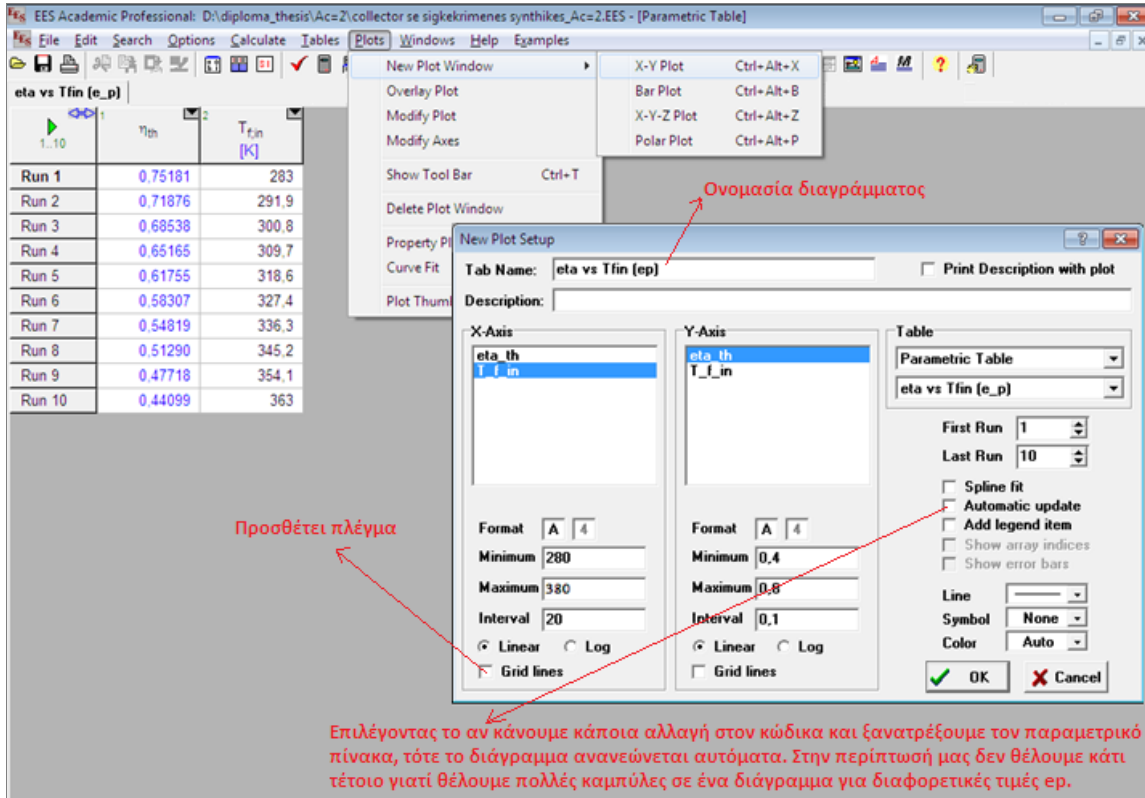
Κάνοντας δεξί κλικ πάνω στη θερμοκρασία $T_{f,in}$ εμφανίζεται μια καρτέλα όπως στο Σχήμα 5.20, στην οποία επιλέγοντας **Alter Values**, ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο μπορούμε να δώσουμε τιμές στην $T_{f,in}$. Επιλέξαμε αρχική τιμή τους 283K και τελική τιμή του 363K (δηλαδή τιμή τελευταίας γραμμής – Run 10 οι 363K).



Σχήμα 5.20: Καρτέλα δημιουργίας παραμετρικού πίνακα

Επιλέγοντας **OK** η στήλη της θερμοκρασίας γεμίζει με τις τιμές που δώσαμε. Έπειτα πατώντας το κουμπί (play) το πρόγραμμα ξεκινά και η στήλη του βαθμού απόδοσης γεμίζει. Αφού

συμπληρώθηκε ο πίνακας, το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του διαγράμματος. Από τη γραμμή μενού **Plots** → **New Plot Window** → **X-Y Plot** ανοίγει μια καρτέλα όπως στο [Σχήμα 5.21](#) στην οποία επιλέγουμε τη θερμοκρασία εισόδου να εμφανίζεται στον Χ-άξονα και τον βαθμό απόδοσης να εμφανίζεται στον Υ-άξονα.



Σχήμα 5.21: Καρτέλα δημιουργίας διαγράμματος

Επιλέγοντας **OK** δημιουργείται το πρώτο διάγραμμα (μια καμπύλη για μια τιμή του e_p). Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή του συντελεστή εκπομπής της απορροφητικής πλάκας e_p . Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο [Διάγραμμα 6-1](#).

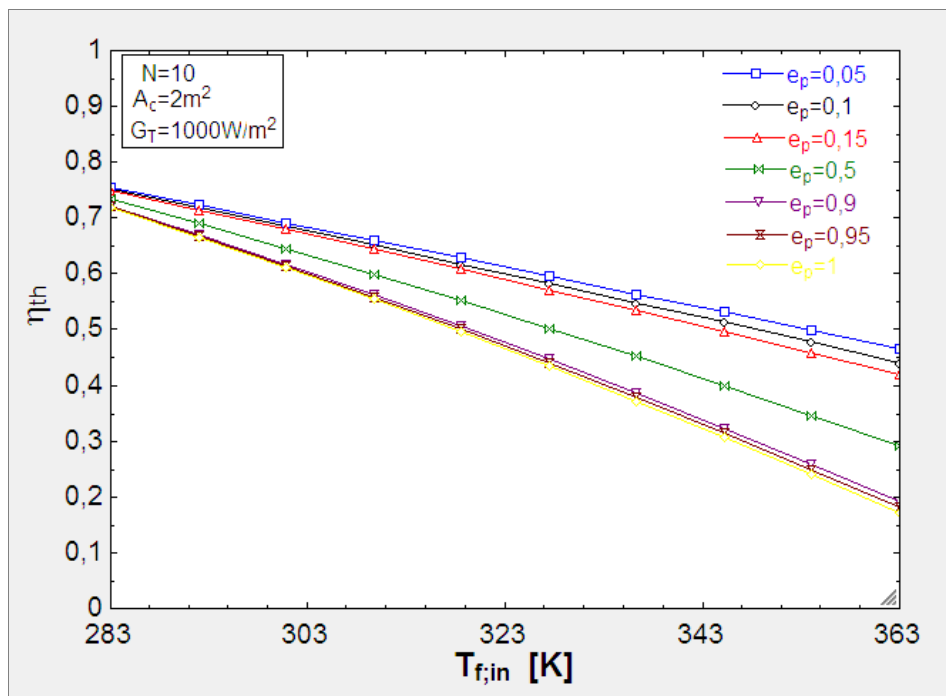
6 Αποτελέσματα - Σχολιασμός

6.1 Μελέτη αλληλεπίδρασης διαφόρων παραμέτρων, επί του αρχικού προβλήματος. ($A_c=2\text{m}^2$, $W_{ol}=1\text{m}$, $L=2\text{m}$)

6.1.1 Επίδραση του συντελεστή εκπομπής απορροφητικής πλάκας (e_p)

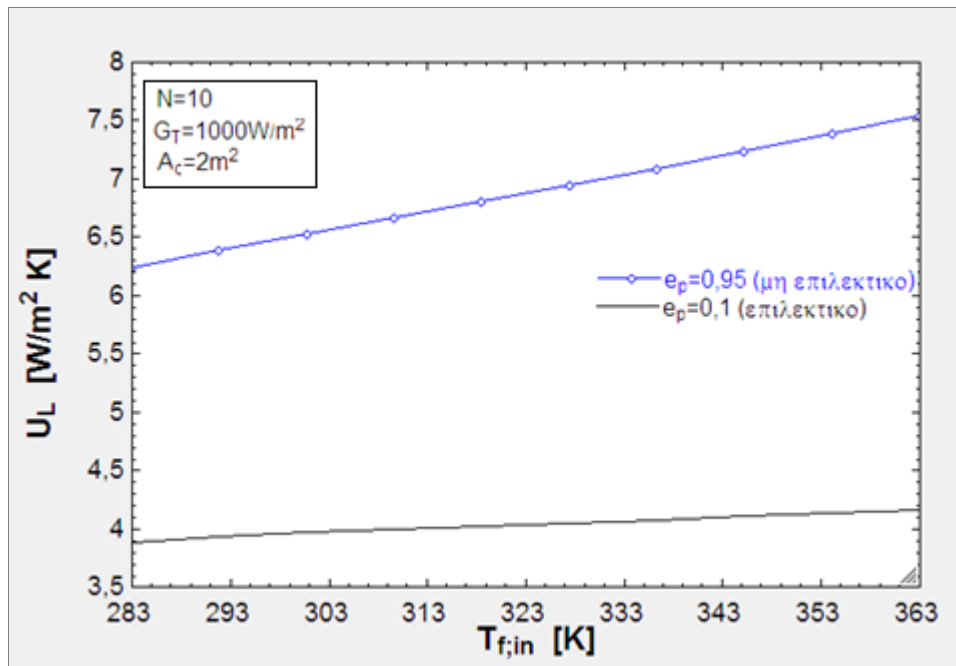
Στο [Διάγραμμα 6-1](#) που ακολουθεί φαίνεται ότι όσο μειώνεται ο συντελεστής εκπομπής της απορροφητικής πλάκας τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Κάτι τέτοιο είναι απολύτως λογικό αφού μια "επιλεκτική" επιφάνεια που έχει χαμηλό συντελεστή εκπομπής στην μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια ($e_p=0.1$), έχει υψηλή απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, άρα και καλύτερο βαθμό απόδοσης αφού μειώνονται οι θερμικές απώλειες.

Επίσης στο [Διάγραμμα 6-1](#) γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη τόσο μειώνεται ο βαθμός απόδοσής του. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όσο πιο θερμό είναι το νερό που εισέρχεται, τόσο λιγότερη θερμότητα απάγει από την πλάκα και άρα τόσο λιγότερο θερμαίνεται. Άρα όταν το νερό εισέρχεται με χαμηλότερη θερμοκρασία τόσο πιο αποδοτικός είναι ο συλλέκτης.



Διάγραμμα 6-1: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$) για διάφορες τιμές του συντελεστή εκπομπής της απορροφητικής πλάκας (e_p)

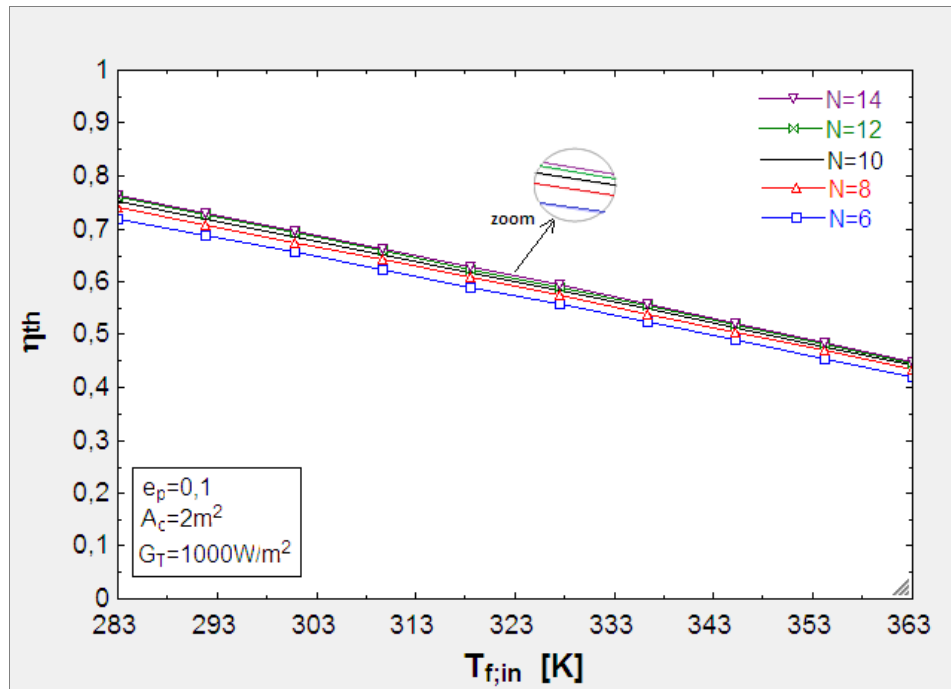
Στο [Διάγραμμα 6-2](#) παρατίθενται οι καμπύλες μεταβολής του συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών για επιλεκτικό και μη επιλεκτικό συλλέκτη συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι ένας μη επιλεκτικός συλλέκτης εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερες απώλειες ακτινοβολίας από έναν επιλεκτικό. Επίσης η καμπύλη που αφορά τον μη επιλεκτικό συλλέκτη αποκλίνει από την αντίστοιχη καμπύλη του επιλεκτικού με αυξανόμενο ρυθμό. Δηλαδή ένας επιλεκτικός συλλέκτης όχι μόνο παρουσιάζει μικρότερες απώλειες ακτινοβολίας αλλά επιπλέον οι απώλειες αυτές παρουσιάζουν μικρή αύξηση αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του νερού.



Διάγραμμα 6-2: Καμπύλη μεταβολής του συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών (U_L) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$) για επιλεκτικό ($e_p=0,1$) και μη επιλεκτικό ($e_p=0,95$) συλλέκτη

6.1.2 Επίδραση του αριθμού των σωλήνων νερού (N)

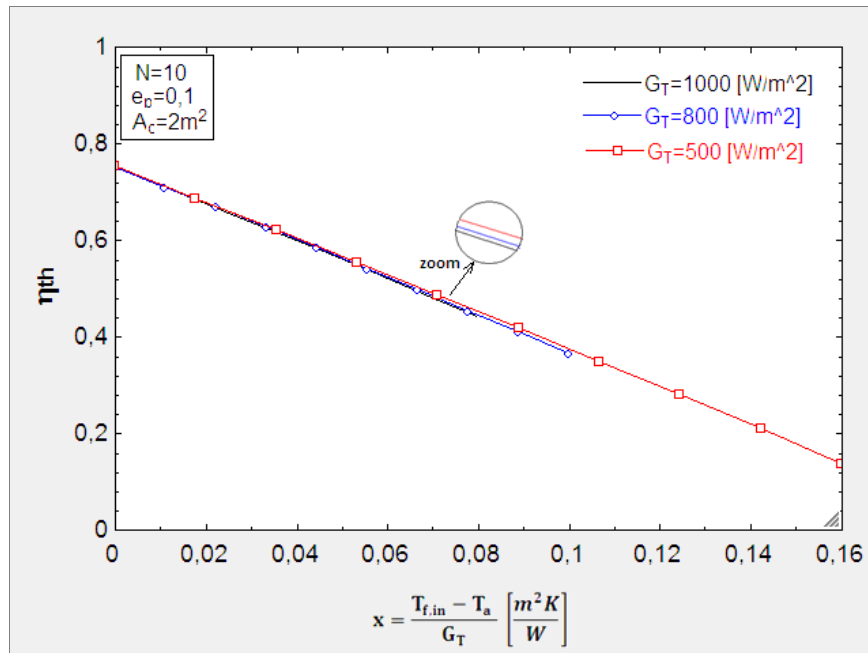
Στο [Διάγραμμα 6-3](#) παρατηρείται ότι αύξηση του αριθμού των σωλήνων νερού συνεπάγεται και αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη. Μέσα από τις εξισώσεις είναι φανερό ότι αύξηση του αριθμού των σωλήνων N οδηγεί σε μείωση του αριθμού Re (Εξίσωση 4.25), άρα σε μείωση του αριθμού Nu_w (Εξίσωση 4.24), επομένως σε αύξηση του παράγοντα απόδοσης F' (Εξίσωση 4.22) άρα και του παράγοντα θερμικής απολαβής F_R (Εξίσωση 4.21) που οδηγεί τελικά σε αύξηση του βαθμού απόδοσης (Εξίσωση 4.27). Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, από κάποιον αριθμό σωλήνων και μετά η αύξηση του βαθμού απόδοσης γίνεται με πιο αργό ρυθμό.



Διάγραμμα 6-3: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$) για διάφορες τιμές του αριθμού των σωλήνων νερού (N)

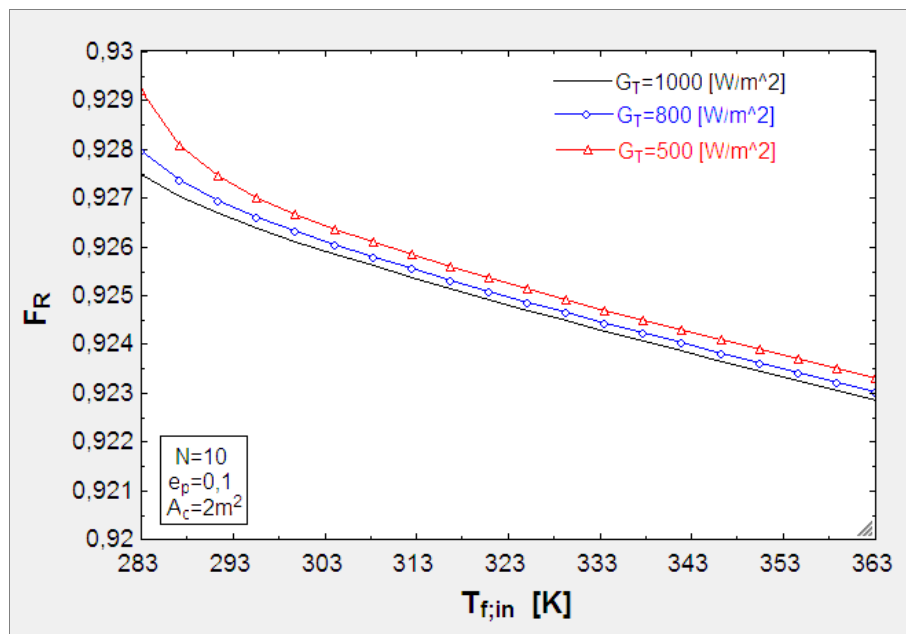
6.1.3 Επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T)

Στο [Διάγραμμα 6-4](#) που έπεται δίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της μεταβλητής $x = \frac{T_{f,in} - T_a}{G_T} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$ για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία σημαίνει μικρότερη θερμοκρασία εισόδου του νερού, συνεπώς και λιγότερες απώλειες κάτι που οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (πχ για $x=0,08$ και $G_T=500 \rightarrow T_{f,in}=50^\circ C \rightarrow \eta_{th}=0,45254$ / για $x=0,08$ και $G_T=1000 \rightarrow T_{f,in}=90^\circ C \rightarrow \eta_{th}=0,44038$). Προφανώς για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του νερού, αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει αύξηση και στον βαθμό απόδοσης.



Διάγραμμα 6-4: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της μεταβλητής x για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T)

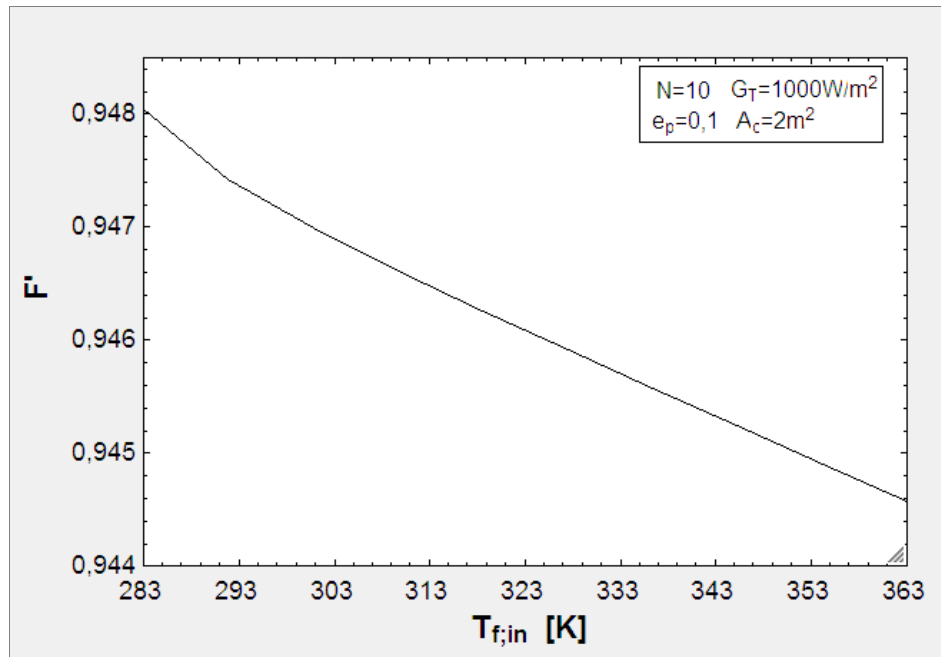
Παρόμοια στο [Διάγραμμα 6-5](#) παρατηρείται μικρή αύξηση του παράγοντα θερμικής απολαβής που οφείλεται στη μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η αύξηση του παράγοντα θερμικής απολαβής οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης όπως φάνηκε και στο [Διάγραμμα 6-4](#).



Διάγραμμα 6-5: Καμπύλες μεταβολής του παράγοντα θερμικής απολαβής (F_R) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου νερού ($T_{f,in}$) για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T)

6.1.4 Επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$)

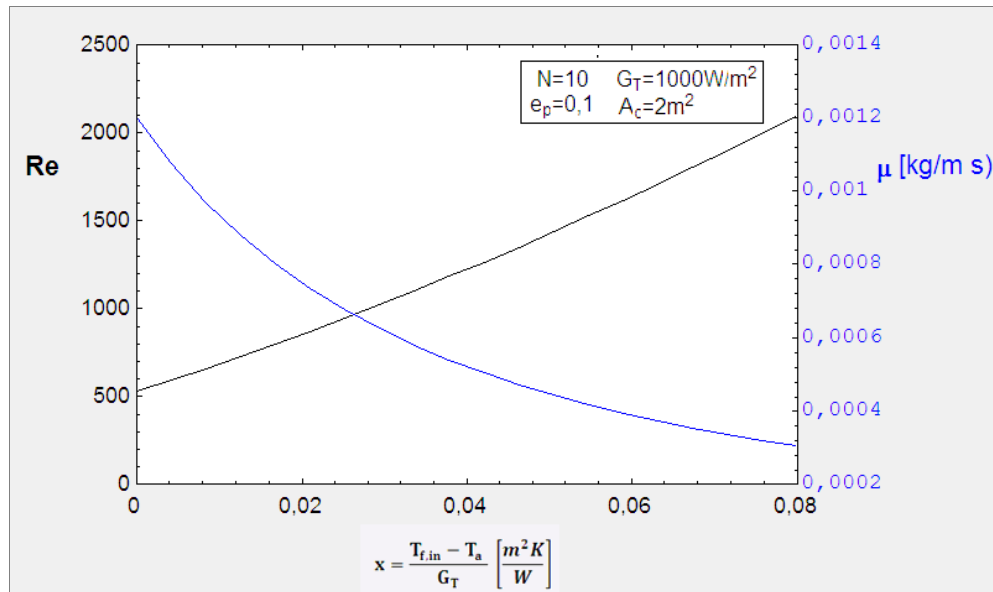
Το [Διάγραμμα 6-6](#) αναπαριστά τη μείωση που υφίσταται ο παράγων απόδοσης εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου του νερού. Η μείωση αυτή δικαιολογείται από τη δυσκολία του εισερχόμενου νερού να απάγει θερμότητα από την απορροφητική πλάκα όταν εισέρχεται με υψηλότερη θερμοκρασία όπως προαναφέρθηκε.



Διάγραμμα 6-6: Καμπύλη μεταβολής του παράγοντα απόδοσης (F') συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού ($T_{f,in}$)

Στο [Διάγραμμα 6-7](#) απεικονίζεται η αύξηση του αριθμού Reynolds αυξανόμενης της μεταβλητής $\frac{T_{f,in}-T_a}{G_T}$. Η αύξηση του αριθμού Re οφείλεται στην εξάρτησή του από το δυναμικό ιξώδες του ρευστού δηλαδή του νερού. Από τη σχέση που διέπει τον αριθμό Re $Re = \frac{V \cdot x}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot x}{\mu}$ είναι φανερό η εξάρτηση αυτή. Το ιξώδες με τη σειρά του είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας δηλαδή $\mu=f(T_{f,in})$.

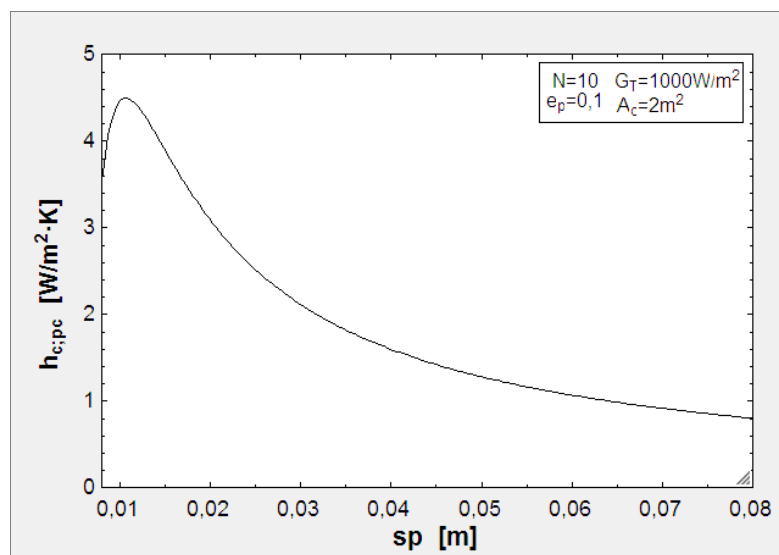
Όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, από το [Διάγραμμα 6-7](#) είναι φανερό ότι το δυναμικό ιξώδες του νερού μειώνεται με την αύξηση της μεταβλητής $\frac{T_{f,in}-T_a}{G_T}$, δηλαδή με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού (αφού η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G_T παραμένουν σταθερά). Επομένως μείωση του ιξώδους του νερού επιφέρει αύξηση του αριθμού Re.



Διάγραμμα 6-7: Καμπύλη μεταβολής του αριθμού Reynolds (Re) συναρτήσει της μεταβλητής x λόγω εξάρτησης της καμπύλης μεταβολής του δυναμικού ιξώδους (μ) συναρτήσει της μεταβλητής x

6.1.5 Επίδραση του διακένου (sp)

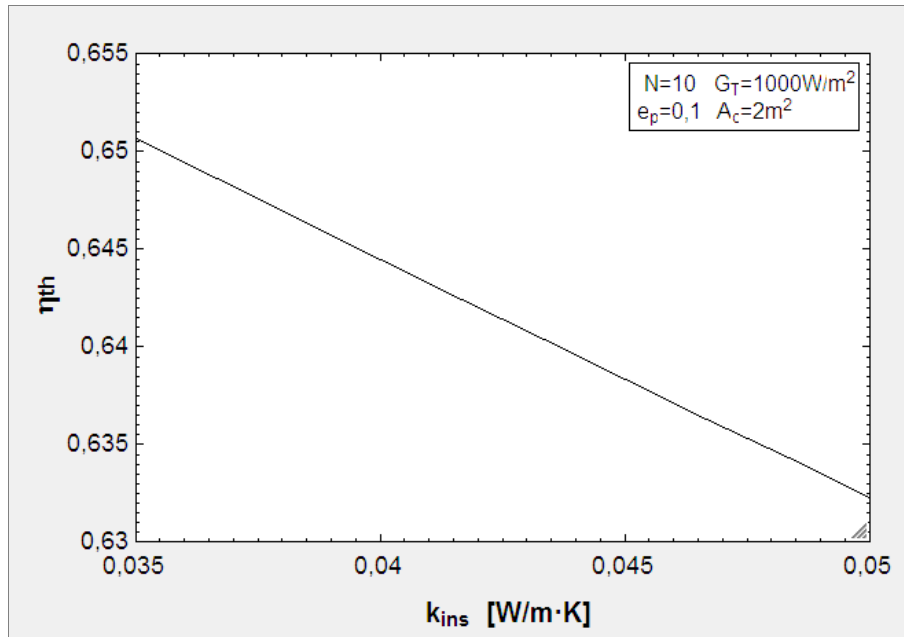
Η απόσταση μεταξύ του καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το ποσοστό των θερμικών απωλειών. Όπως προκύπτει και από το [Διάγραμμα 6-8](#), αύξηση του διακένου επιφέρει μείωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-απορροφητή δια συναγωγής και κατ' επέκταση μείωση των απωλειών κορυφής (όπως περιγράφηκε και από την εξίσωση 4.6), άρα και των θερμικών απωλειών (εξίσωση 4.3)



Διάγραμμα 6-8: Καμπύλη μεταβολής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-απορροφητή δια συναγωγής ($h_{c,pc}$) συναρτήσει της απόστασης μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας (sp)

6.1.6 Επίδραση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης (k_{ins})

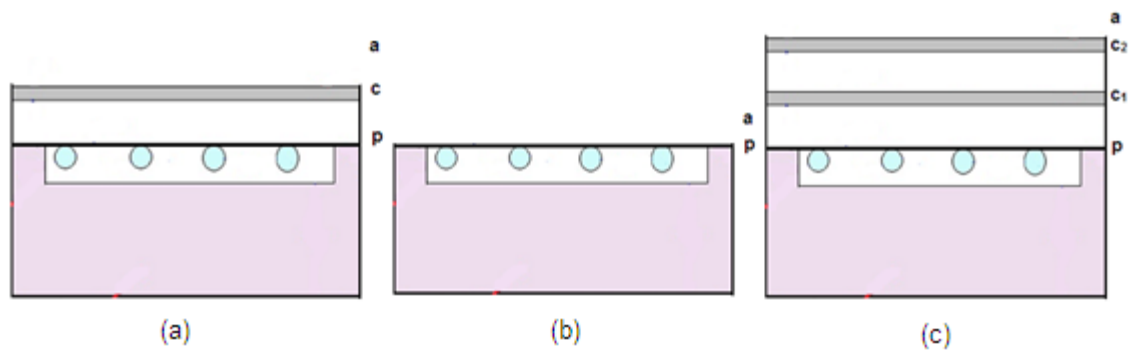
Όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 1.3.1 η μόνωση των πλάγιων και πίσω πλευρών του συλλέκτη χρησιμοποιείται ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Στο [Διάγραμμα 6-9](#) φαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Επομένως όσο μικρότερη θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζει η μόνωση τόσο πιο αποδοτικά συμπεριφέρεται ο συλλέκτης.



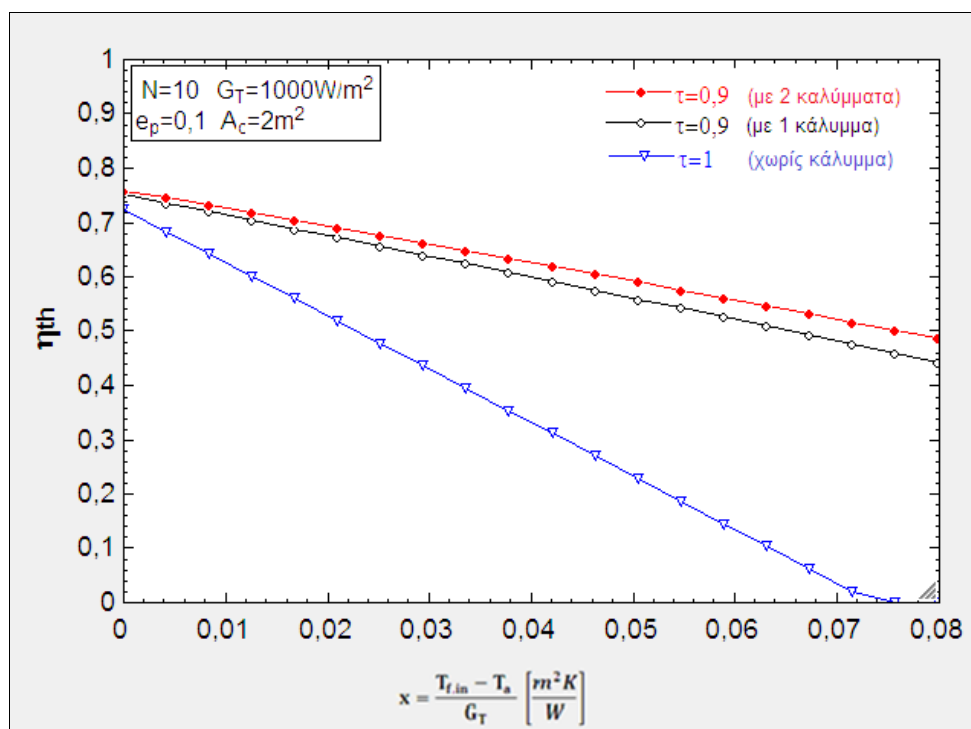
Διάγραμμα 6-9: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης

6.1.7 Επίδραση καλύμματος

Το [Διάγραμμα 6-10](#) παρουσιάζει την επίδραση του καλύμματος στην απόδοση του συλλέκτη. Όπως αναμέναμε, για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ο συλλέκτης με ένα ή δύο καλύμματα είναι ξεκάθαρα πιο αποδοτικός από τον αντίστοιχο συλλέκτη χωρίς κάλυμμα. Αντίθετα για θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασίες περιβάλλοντος η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρότερη. Επιπλέον ο συλλέκτης με δύο καλύμματα είναι ελαφρώς πιο αποδοτικός από εκείνον με ένα κάλυμμα ενώ για πολύ υψηλές θερμοκρασίες όπως φαίνεται και από το [διάγραμμα 6.1](#) μεγαλώνει (η καμπύλη του συλλέκτη με δύο καλύμματα έχει μεγαλύτερη κλίση). Το [Σχήμα 6.1](#) δείχνει τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη με ένα κάλυμμα, με δύο καλύμματα, ή χωρίς κάλυμμα.



Σχήμα 6.1: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (a) με 1 κάλυμμα (b) χωρίς κάλυμμα (c) με 2 καλύμματα



Διάγραμμα 6-10: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης (η_{th}) συναρτήσει της μεταβλητής x για συλλέκτη με 1 κάλυμμα, με 2 καλύμματα ή χωρίς κάλυμμα

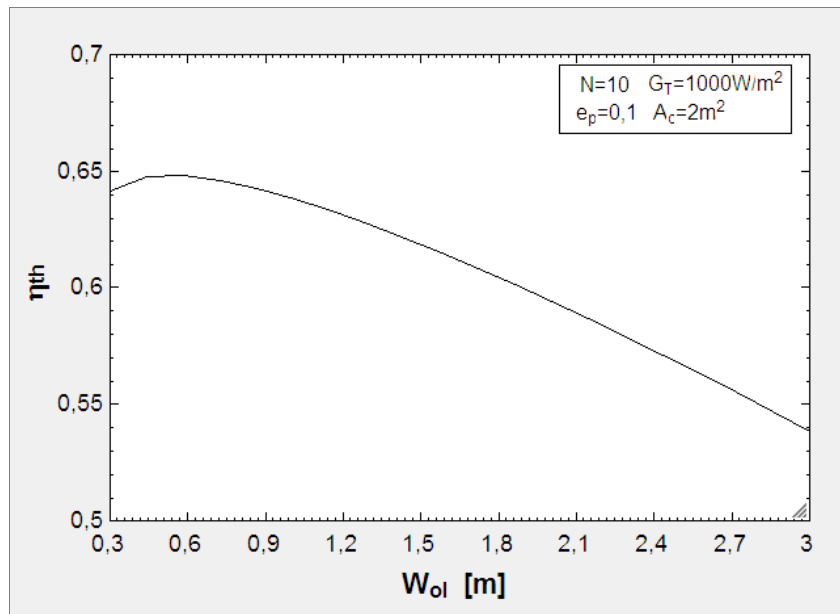
6.2 Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων (W_{ol} , L , sp) μέσω διαγραμμάτων για $A_c=2m^2$, $G_T=1000W/m^2$, $N=10$, $e_p=0,1$

Σε αυτήν την παράγραφο έγινε μια προσπάθεια να βελτιστοποιηθούν ορισμένα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη. Το πλάτος του συλλέκτη, το μήκος των σωλήνων νερού, το διάκενο μεταξύ του καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας και το πάχος της μόνωσης είναι τα κυριότερα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν μιας και ο σχεδιασμός ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη παίζει καθοριστικό παράγοντα στην απόδοσή του αλλά και στο

κόστος του. Τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν την αλληλεπίδραση αυτών των μεγεθών με τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.

6.2.1 Επίδραση του πλάτους του συλλέκτη (W_{oi})

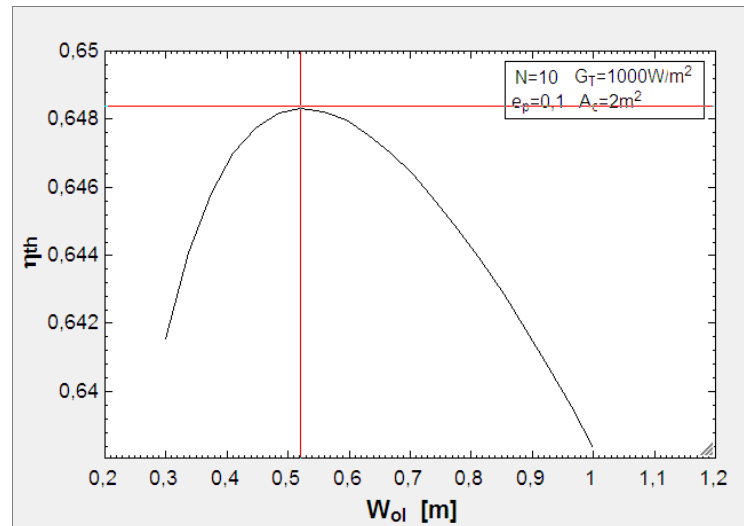
Παρακάτω παρατηρείται πως μεταβάλλεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη αλλάζοντας το πλάτος του. Θέτοντας κάποια όρια στο πλάτος του συλλέκτη (0,3m ÷ 3m) και τρέχοντας το πρόγραμμα, όπως δείχνει και το [Διάγραμμα 6-11](#) υπάρχει κάποιο μέγιστο κοντά στα 0,5-0,6m.



Διάγραμμα 6-11: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του πλάτους του (W_{oi})

Για να εντοπιστεί ακριβώς το μέγιστο κατασκευάστηκε το [Διάγραμμα 6-12](#) όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι για πλάτος συλλέκτη $W_{oi}=0,525\text{m}$, ο βαθμός απόδοσης είναι $\eta_{th}=0,64831$. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι αρχικά ο βαθμός απόδοσης ήταν $\eta_{th}=0,6383$ για πλάτος συλλέκτη $W_{oi}=1\text{m}$. Επομένως μεταβάλλοντας το πλάτος, ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη βελτιώνεται

κατά $\frac{\eta_{th}^{new}-\eta_{th}^{old}}{\eta_{th}^{old}} = \frac{0,64831-0,6383}{0,6383} \cdot 100\% = 1,568\%$.

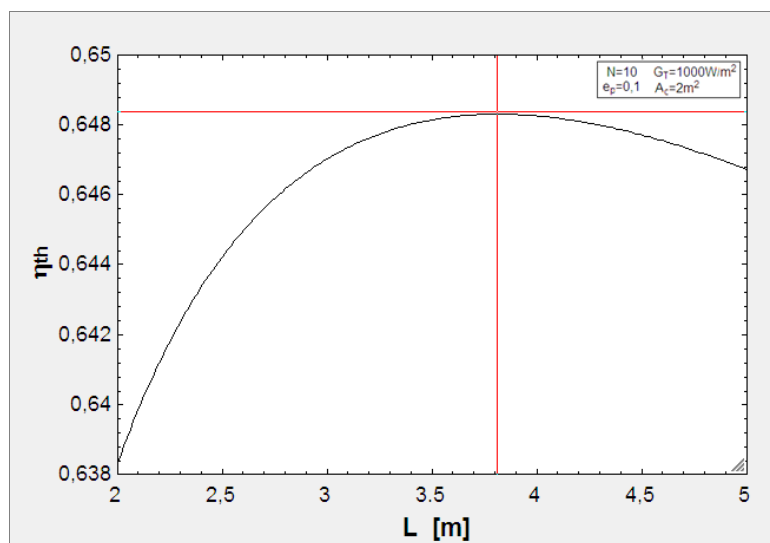


Διάγραμμα 6-12: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του πλάτους του (W_{ol}) που εντοπίζει ακριβώς που παρατηρείται μέγιστο πλάτος

6.2.2 Επίδραση του μήκους του συλλέκτη (L)

Στο [Διάγραμμα 6-13](#) φαίνεται ότι υπάρχει ακρότατο στην καμπύλη μεταβολής του μήκους του συλλέκτη για το οποίο επιτυγχάνεται βέλτιστη τιμή του βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα για μήκος συλλέκτη $L=3,81m$ προκύπτει βαθμός απόδοσης $\eta_{th}=0,64831$ έναντι του βαθμού απόδοσης $\eta_{th}=0,6383$ που είχε προκύψει αρχικά (χωρίς βελτιστοποίηση) για μήκος $L=2m$.

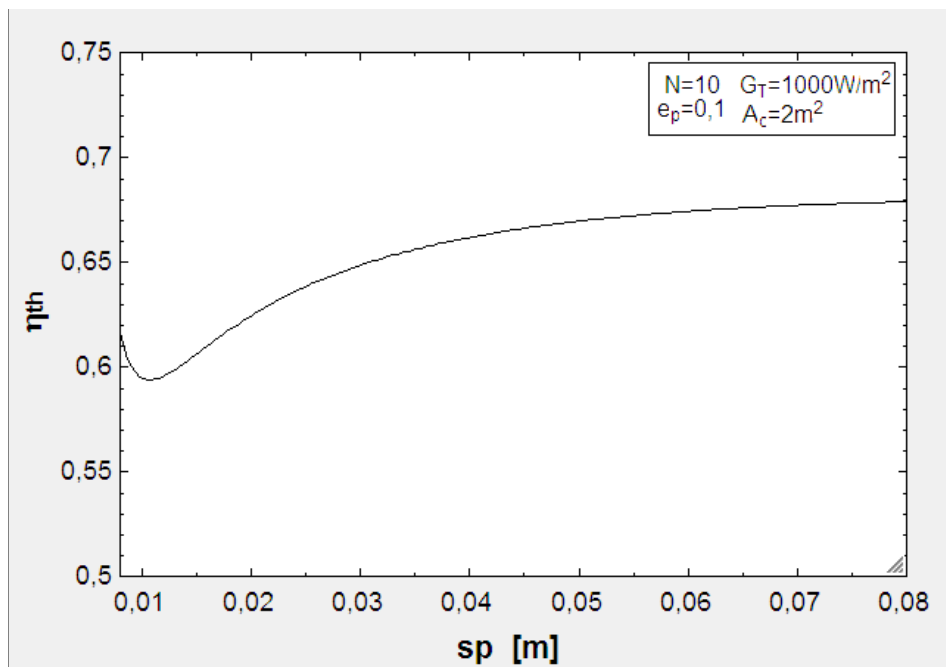
Η βελτιστοποιημένη τιμή του μήκους του συλλέκτη θα μπορούσε να προκύψει και με απλό υπολογισμό $L = \frac{A_c}{W_{ol}}$, αφού η συλλεκτική επιφάνεια διατηρήθηκε σταθερή $A_c=2m^2$. Θεωρήθηκε όμως σκόπιμο να επαληθευτεί μέσα από ένα νέο διάγραμμα.



Διάγραμμα 6-13: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του μήκους του (L)

6.2.3 Επίδραση του διάκενου μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας (sp)

Από το Διάγραμμα 6-14 παρατηρούμε ότι γενικότερα υπάρχει περιθώριο βελτίωσης της απόστασης μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας. Από τα 70mm περίπου και μετά η βελτίωση του βαθμού απόδοσης είναι πιο αργή. Το συμπέρασμα που εξάγεται από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι ότι μεγαλύτερο διάκενο συνεπάγεται ότι ο αέρας που περικλείεται ανάμεσα στο κάλυμμα και την απορροφητική πλάκα τείνει να είναι ακίνητος. Οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων του ακίνητου αέρα καθυστερούν τη μετάδοση θερμότητας μέσα στη μάζα του επομένως με μεγαλύτερο διάκενο επιτυγχάνουμε λιγότερες απώλειες προς το περιβάλλον.



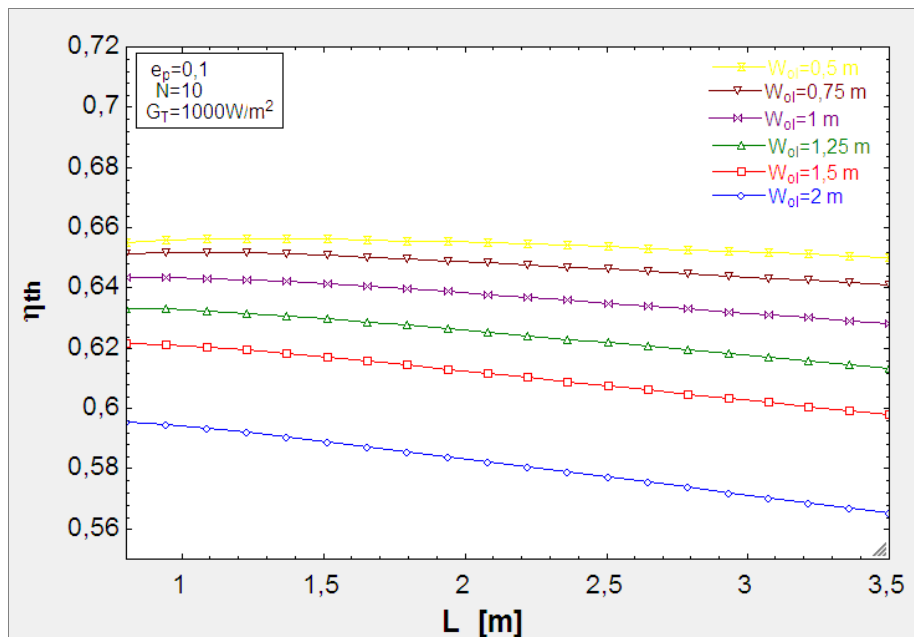
Διάγραμμα 6-14: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της απόστασης μεταξύ καλύμματος και απορροφητικής πλάκας (sp)

6.3 Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων W_{oi} και L , μέσω διαγράμματος για $G_T=1000W/m^2$, $N=10$, $e_p=0,1$

6.3.1 Επίδραση της συλλεκτικής επιφάνειας A_c (και κατ'έπекταση του πλάτους και του μήκους του συλλέκτη)

Στο Διάγραμμα 6-15 φαίνονται διάφορες καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του μήκους του (L) για διάφορες τιμές του πλάτους (W_{oi}). Εδώ

προφανώς η επιφάνεια του συλλέκτη μεταβάλλεται ($0,4 \div 7 \text{m}^2$). Παρατηρούμε ότι καλύτερος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται για πλάτος συλλέκτη $W_{oi} = 0,5 \text{m}$ με μήκος $L < 2,7 \text{m}$ περίπου, ενώ για μήκη $L > 2,7 \text{m}$ έχουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης για πλάτος $W_{oi} = 0,75 \text{m}$.



Διάγραμμα 6-15: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει του μήκους του (L) για διάφορες τιμές του πλάτους (W_{oi})

6.4 Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

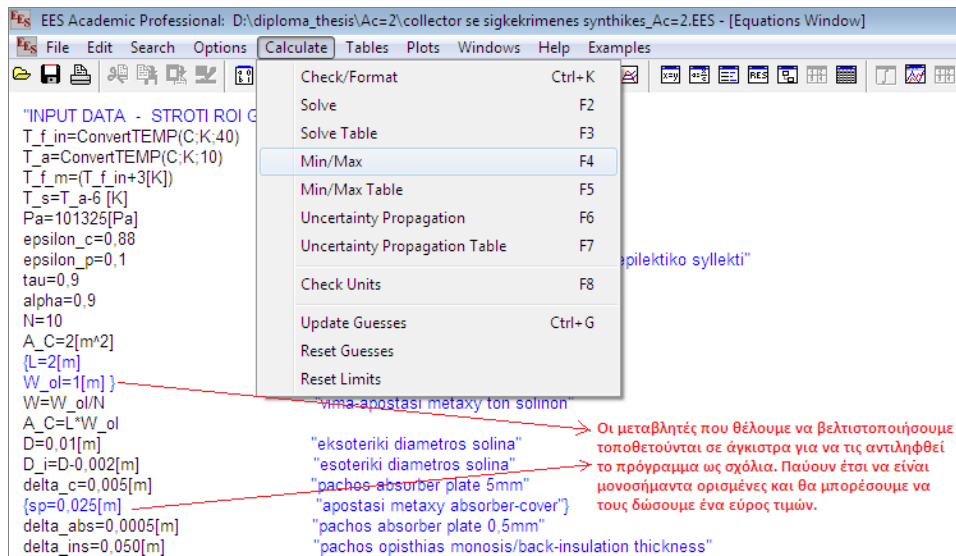
6.4.1 Παράμετροι βελτιστοποίησης: Πλάτος συλλέκτη W_{oi} και διάκενο καλύμματος - απορροφητικής πλάκας s_p (για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 2 \text{m}^2$)

Με τη βοήθεια του λογισμικού EES επιχειρήθηκε να εντοπιστεί ένας βέλτιστος συνδυασμός για το πλάτος του συλλέκτη και την απόσταση που θα πρέπει να έχει το κάλυμμα από την απορροφητική πλάκα. Η αντικειμενική συνάρτηση που θέλουμε να βελτιστοποιηθεί είναι η σχέση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη, δηλαδή:


$$\eta_{th} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_{f,in} - T_a}{G_T} \quad (\text{εξίσωση 6.1})$$

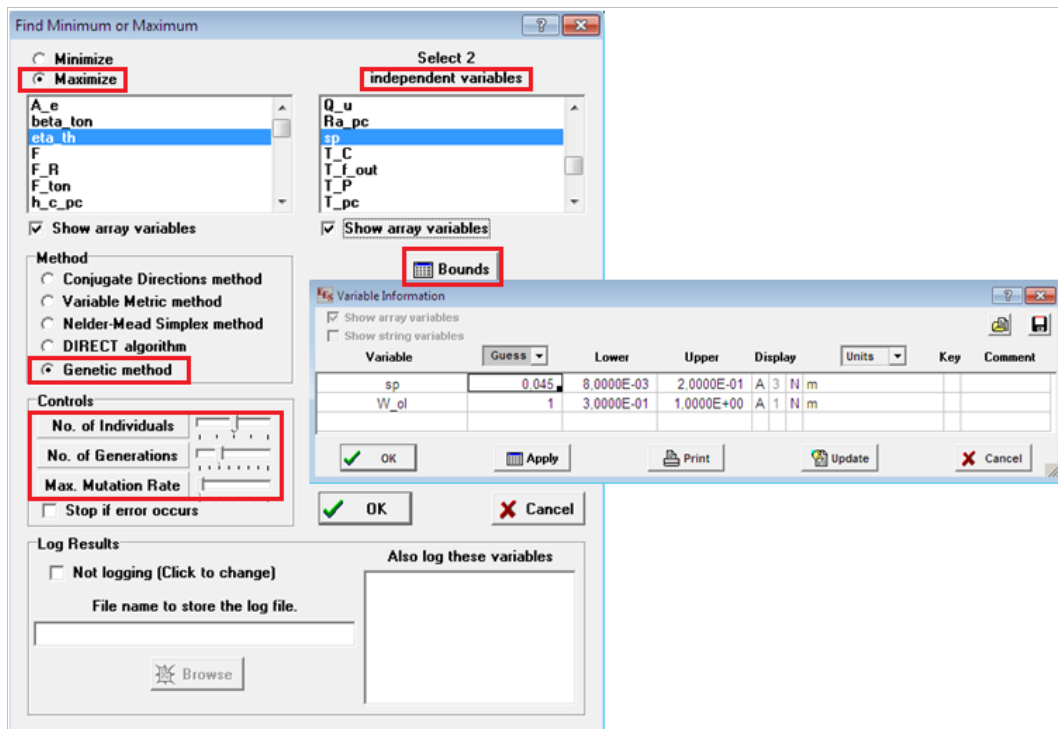
Από το παράθυρο εξισώσεων και δουλεύοντας πάνω στον αρχικό κώδικα της ενότητας 5.3, το πλάτος του συλλέκτη W_{oi} και το διάκενο s_p τοποθετήθηκαν σε άγκιστρα όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 6.2](#), προκειμένου το πρόγραμμα να τα αντιλαμβάνεται ως σχόλια. Με αυτό τον τρόπο οι

συγκεκριμένες μεταβλητές παύουν να είναι μονοσήμαντα ορισμένες και μπορούν πλέον να πάρουν ένα εύρος τιμών.



Σχήμα 6.2: Παράθυρο επεξήγησης για τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στη συνέχεια επιλέγοντας από τη γραμμή μενού **Calculate** → **Min/Max** (ή απευθείας από το κουμπί ) , ανοίγει ένα παράθυρο όπως στο Σχήμα 6.3, στο οποίο επιλέγουμε μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (**Maximize** → η_{th}) και παράλληλα ως ανεξάρτητες μεταβλητές επιλέγονται το πλάτος W_{ol} και το διάκενο sp (**independent variables** → W_{ol} , sp).



Σχήμα 6.3: Παράθυρο έναρξης διαδικασίας βελτιστοποίησης

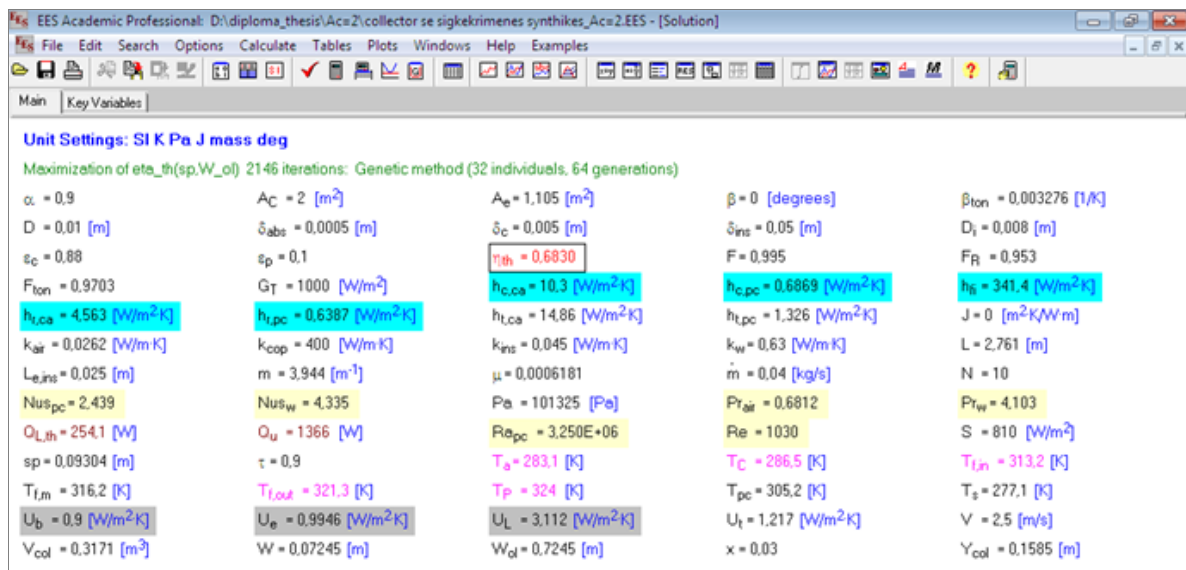
Στη συνέχεια καθορίζουμε ένα εύρος τιμών στο οποίο φράζουμε τις μεταβλητές πλάτους και διακένου (**bounds** → **Lower** , **Upper**). Για το πλάτος επιλέχθηκε $0,3\text{m} < W_{oi} < 1\text{m}$ (σε αυτό μας βοήθησε το [Διάγραμμα 6-12](#)), ενώ για το διάκενο $8\text{mm} < sp < 200\text{mm}$.

Έπειτα από τις εναλλακτικές των μεθόδων βελτιστοποίησης που μας δίνει το πρόγραμμα, επιλέγουμε **Genetic Method** (μέθοδος Γενετικών Αλγορίθμων). Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε:

- το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού **No. of Individuals** (το σύνολο δηλαδή των χρωμοσωμάτων). Στο πρόβλημά μας τα χρωμοσώματα είναι το σύνολο πιθανών σετ τιμών.
- το μέγεθος των γενιών **No. of Generations** (δηλαδή πόσοι κύκλοι νέων πληθυσμών θα προκύψουν μετά από επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη). Διασταυρώνοντας τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων, θα προκύψει ένα πλήθος από "σετ" τιμών, που το καθένα μαζί με όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος, θα δίνουν και μια λύση (δηλαδή έναν βαθμό απόδοσης).
- το ποσοστό μετάλλαξης **Max. Mutation Rate** (δηλαδή η συχνότητα με την οποία αλλάζει αυθαίρετα μια ή περισσότερες τιμές των απογόνων). Είναι σημαντικό η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μετάλλαξη να είναι αρκετά μικρή γιατί σε αντίθετη περίπτωση ο Γενετικός Αλγόριθμος εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο.

Πατώντας **OK** το πρόγραμμα ξεκινά τις επαναλήψεις λύνοντας το πρόβλημα μέσα στο εύρος τιμών που του έχουμε δώσει. Οι συνδυασμοί των W_{oi} και sp είναι τυχαίοι, όμως κάθε φορά που ο αλγόριθμος εντοπίζει μια μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης την αποθηκεύει και τη συγκρίνει με τις επόμενες. Αν κάποια από τις επόμενες είναι καλύτερη (δηλαδή μεγαλύτερη) αποθηκεύει πλέον αυτή κ.ο.κ.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναζήτηση παρουσιάζονται αναλυτικά στο [Σχήμα 6.4](#) ενώ τα κυριότερα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα ([Πίνακας 6-1](#)).



Σχήμα 6.4: Παράθυρο αποτελεσμάτων μετά από βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης (η_{th}) ως προς το πλάτος του συλλέκτη (W_{oi}) και το διάκενο (sp)

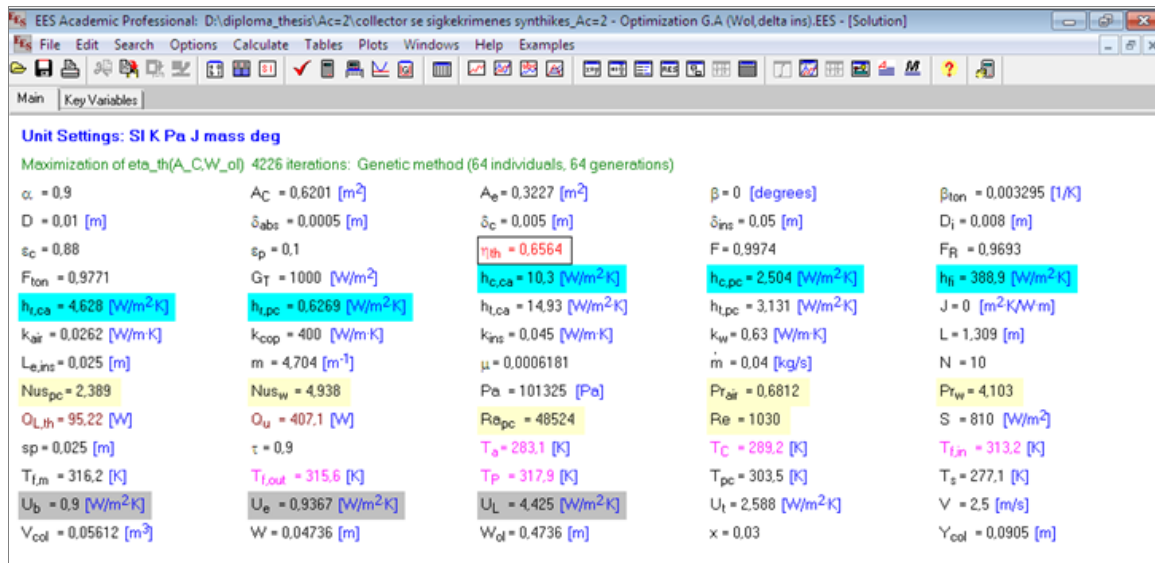
Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με ΓΑ για $A_c=2m^2$ και παραμέτρους βελτιστοποίησης το πλάτος του συλλέκτη W_{oi} και το διάκενο καλύμματος-απορροφητικής πλάκας sp

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη		Χαρακτηριστικά συλλέκτη	
η_{th}	0,683	F_R	0,953
Συντελεστές μετάδοσης θερμότητας		F'	0,9703
h_{fi}	341,4	Θερμότητες	
$h_{c,ca}$	10,3 W/m ² K	Q_U	1366 W
$h_{r,ca}$	4,563 W/m ² K	$Q_{L,th}$	254,1 W
$h_{c,pc}$	0,6867 W/m ² K	S	810 W/m ²
$h_{r,pc}$	0,6387 W/m ² K	Θερμοκρασίες	
Συντελεστές θερμικών απωλειών		T_p	324 K
U_L	3,111 W/m ² K	T_c	286,5 K
U_b	0,9 W/m ² K	$T_{f,out}$	321,3 K
U_e	0,9942 W/m ² K	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
Αδιάστατοι αριθμοί		W_{oi}	0,7251m
Re_{Di}	1030	L	2,758m
Ra_{pc}	3253000	sp	0,09307
Nu_{pc}	2,439	V_{col}	0,3171m ³
Nu_w	4,335	A_c	2m ²

Παρατηρούμε λοιπόν ότι με τη βοήθεια του λογισμικού EES και τη μέθοδο των Γενετικών Αλγορίθμων που παρέχει, ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη βελτιώθηκε από 0,6383 που είχε προκύψει αρχικά (χωρίς βελτιστοποίηση για μήκος $W_{oi}=1m$, $L=2m$, $sp=25mm$) σε 0,683 δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 7%. ($\frac{\eta_{th}^{new}-\eta_{th}^{old}}{\eta_{th}^{old}} = \frac{0,683-0,6383}{0,6383} \cdot 100\% = 7\%$).

6.4.2 Παράμετροι βελτιστοποίησης: Πλάτος συλλέκτη W_{oi} και συλλεκτική επιφάνεια A_c

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με προηγουμένως και επιλέγοντας ως ανεξάρτητες παραμέτρους βελτιστοποίησης το πλάτος του συλλέκτη και τη συλλεκτική επιφάνεια προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:



Σχήμα 6.5: Παράθυρο αποτελεσμάτων μετά από βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης (η_{th}) ως προς το πλάτος του συλλέκτη (W_{ol}) και τη συλλεκτική επιφάνεια (A_c)

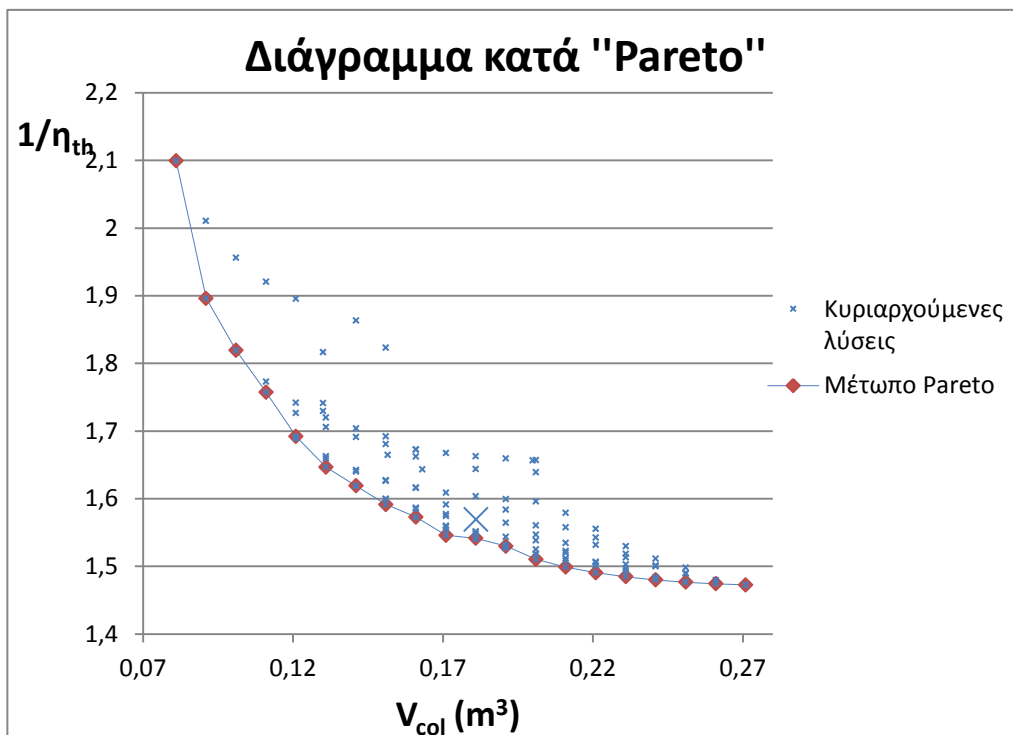
Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με ΓΑ και παραμέτρους βελτιστοποίησης το πλάτος του συλλέκτη W_{ol} και τη συλλεκτική επιφάνεια A_c

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη		Χαρακτηριστικά συλλέκτη	
η_{th}	0,6564	F_R	0,9693
Συντελεστές μετάδοσης θερμότητας		F'	0,9771
h_{fi}	388,9	Θερμότητες	
$h_{c,ca}$	10,3 W/m ² K	Q_U	407,1W
$h_{r,ca}$	4,628W/m ² K	$Q_{L,th}$	95,22 W
$h_{c,pc}$	2,504W/m ² K	S	810 W/m ²
$h_{r,pc}$	0,6269W/m ² K	Θερμοκρασίες	
Συντελεστές θερμικών απωλειών		T_p	317,9 K
U_L	4,425 W/m ² K	T_c	289,2 K
U_b	0,9 W/m ² K	$T_{f,OUT}$	315,6 K
U_e	0,9367 W/m ² K	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
Αδιάστατοι αριθμοί		W_{ol}	0,4736m
Re_{Di}	1030	L	1,309m
Ra_{pc}	48524	sp	0,025
Nu_{pc}	2,389	V_{col}	0,05612m ³
Nu_w	4,938	A_c	0,6201m ²

6.5 Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων με τη βοήθεια του «Μετώπου Pareto»

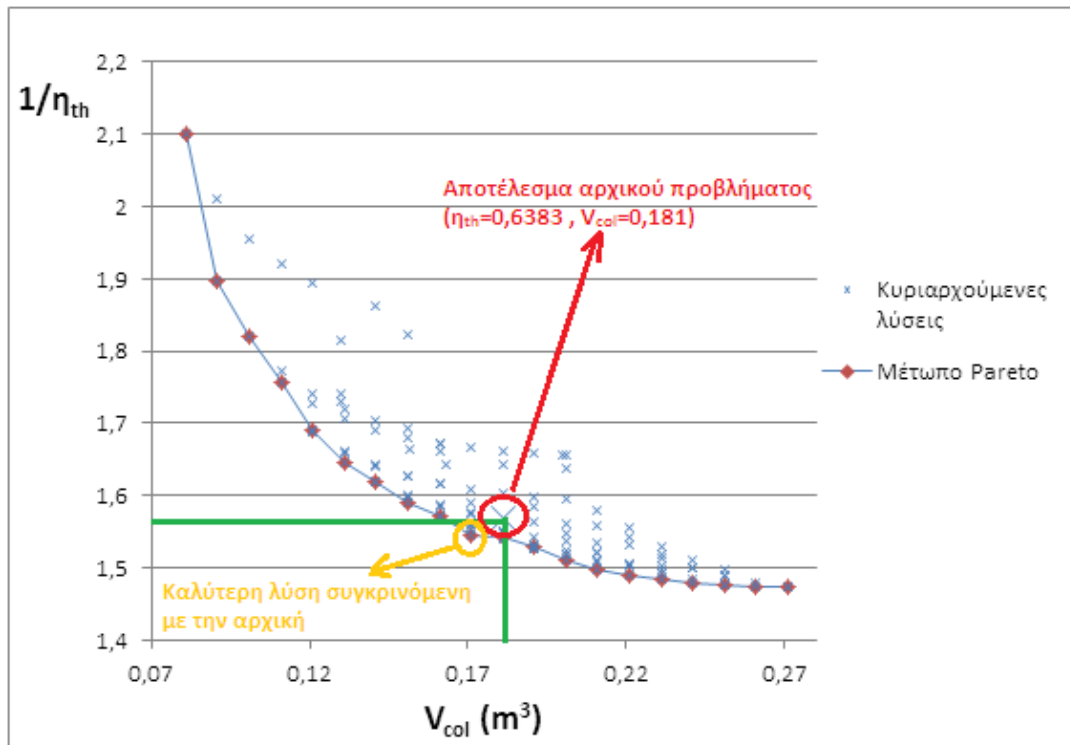
Στις προσπάθειες που προηγήθηκαν για βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη, παρατηρήθηκε ότι βελτιώνοντας τον βαθμό απόδοσης μεγάλωνε ο όγκος του, άρα και οι διαστάσεις του (άρα και το κόστος). Επομένως στο πρόβλημά μας υπεισέρχεται και ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας πέραν της αποδοτικότητας του συλλέκτη, αυτός των διαστάσεών του. Συνεπώς στο πρόβλημά μας υπάρχουν δυο αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, όπου η βελτιστοποίηση της μιας συνάρτησης έχει σαν αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της άλλης.

Τρέχοντας το πρόγραμμα για μια ευρεία γκάμα σετ διαστάσεων του διακένου ($15\text{mm} < s_p < 50\text{mm}$) και του πάχους μόνωσης ($10\text{mm} < \delta_{\text{ins}} < 70\text{mm}$), καταλήξαμε στο [Διάγραμμα 6-16](#). Στόχος του διαγράμματος είναι να εντοπίσουμε τα σημεία που παρουσιάζουν βελτιωμένο βαθμό απόδοσης (δηλαδή μειωμένο $1/\eta_{\text{th}}$) και βελτιωμένο όγκο συλλέκτη (δηλαδή μειωμένο V_{col}). Το σύνολο των "πιο αριστερών λύσεων", δηλαδή των μη κυριαρχούμενων λύσεων αποτελεί το μέτωπο Pareto. Πρόκειται για τα σημεία-λύσεις που κυριαρχούν των υπόλοιπων λύσεων αφού είναι τα καλύτερα και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Επιτυγχάνουν δηλαδή μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης (μικρότερο $1/\eta_{\text{th}}$) και μικρότερο όγκο συλλέκτη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σημεία.



Διάγραμμα 6-16: Διάγραμμα κατά Pareto για διαφορετικά διάκενα ($15\text{mm} < s_p < 50\text{mm}$) και πάχη μόνωσης ($10\text{mm} < \delta_{\text{ins}} < 70\text{mm}$)

Παρότι όπως προαναφέρθηκε τα μέλη του μετώπου Pareto είναι αδύνατο να συγκριθούν γιατί καμία λύση δεν κυριαρχεί επί της άλλης, μέσα από το [Διάγραμμα 6-16](#) θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε μια βελτιωμένη λύση από αυτή του αρχικού προβλήματος της ενότητας 5.3. Αυτή η λύση φαίνεται στο [Διάγραμμα 6-17](#).



Διάγραμμα 6-17: Διάγραμμα εύρεσης βελτιωμένης λύσης από το μέτωπο Pareto

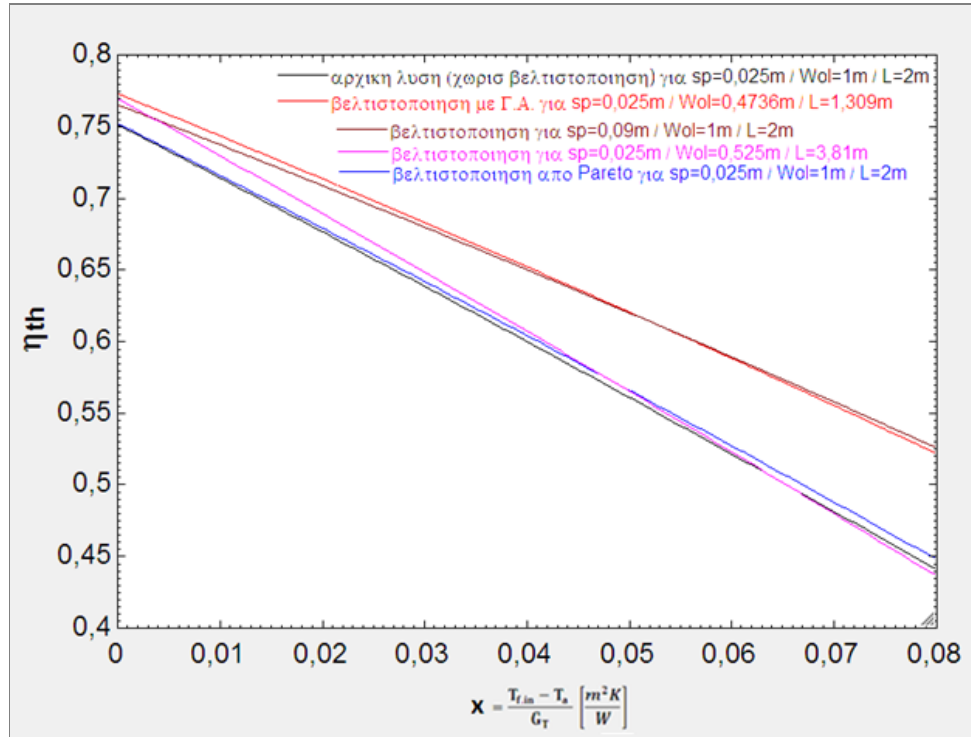
Το βελτιωμένο σημείο που προκύπτει από το [Διάγραμμα 6-17](#), παρουσιάζει ο [Πίνακας 6-3](#):

Πίνακας 6-3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σχεδιαστικών παραμέτρων με τη βοήθεια του Μετώπου Pareto

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη	
η_{th}	0,647
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
V_{col}	0,171m ³
sp	30mm
δ_{ins}	40mm

6.6 Σύνοψη των μεθόδων βελτιστοποίησης

Το [Διάγραμμα 6-18](#) συγκεντρώνει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις διάφορες μεθόδους που ακολουθήσαμε προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.



Διάγραμμα 6-18: Καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) συναρτήσει της μεταβλητής $x = \frac{(T_{f, in} - T_a)}{G_T} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$ που προέκυψαν για διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης

Στον ακόλουθο πίνακα ([Πίνακας 6-4](#)) συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης:

Πίνακας 6-4: Κύρια συγκεντρωτικά αποτελέσματα από διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης

	η_{th}	$V_{col} (m^3)$	Μεταβολή % η_{th}	Μεταβολή % V_{col}
Αρχική λύση (χωρίς βελτιστοποίηση)	0,6383	0,181	-	-
Βελτιστοποίηση με Γ.Α.	0,683	0,3171	↑7,00	↑75,19
Βελτιστοποίηση για $sp=0,09m / Wol=1m / L=2m$	0,6796	0,311	↑6,47	↑71,82
Βελτιστοποίηση για $sp=0,025m / Wol=0,525m /$ $L=3,81m$	0,6483	0,181	↑1,57	0
Βελτιστοποίηση από Pareto	0,647	0,171	↑1,36	↓5,52

7 Συμπεράσματα - Προοπτικές

7.1 Βασικά συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω ενότητες συνοψίζονται εδώ οι σημαντικότερες παρατηρήσεις και συμπεράσματα που εξήχθησαν για τα διάφορα σενάρια:

Αρχικό πρόβλημα

- Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη αυξάνεται με τη μείωση του συντελεστή εκπομπής της απορροφητικής πλάκας. Κάτι τέτοιο είναι απολύτως λογικό αφού μια "επιλεκτική" επιφάνεια που έχει χαμηλό συντελεστή εκπομπής στην μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια ($\epsilon_p=0.1$), έχει υψηλή απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, άρα και καλύτερο βαθμό απόδοσης αφού μειώνονται οι θερμικές απώλειες.
- Αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στο συλλέκτη συνεπάγεται μείωση του βαθμού απόδοσής του. Όσο πιο θερμό είναι το νερό που εισέρχεται, τόσο λιγότερη θερμότητα απάγεται από την πλάκα και άρα τόσο λιγότερο θερμαίνεται.
- Ένας μη επιλεκτικός συλλέκτης εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερες απώλειες ακτινοβολίας από έναν επιλεκτικό.
- Αύξηση του αριθμού των σωλήνων νερού επιφέρει και αύξηση στον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη ($\uparrow N \Rightarrow \downarrow Re \Rightarrow \downarrow Nu_w \Rightarrow \uparrow F' \Rightarrow \uparrow F_R \Rightarrow \uparrow \eta_{th}$). Από κάποιο αριθμό σωλήνων και μετά η αύξηση του βαθμού απόδοσης γίνεται με πιο αργό ρυθμό.
- Μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία σημαίνει μικρότερη θερμοκρασία εισόδου του νερού, συνεπώς και λιγότερες απώλειες κάτι που οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη. Προφανώς για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του νερού, αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει αύξηση και στον βαθμό απόδοσης.
- Ο παράγων απόδοσης μειώνεται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου του νερού. Η μείωση αυτή δικαιολογείται από τη δυσκολία του εισερχόμενου νερού να απάγει θερμότητα από την απορροφητική πλάκα όταν εισέρχεται με υψηλότερη θερμοκρασία όπως προαναφέρθηκε.
- Ο αριθμός Reynolds αυξάνεται, αυξανόμενης της μεταβλητής $x = \frac{T_{f,in}-T_a}{G_T}$. Η αύξηση του οφείλεται στην εξάρτησή του από το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, το οποίο είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας δηλαδή $\mu=f(T_{f,in})$ και μειώνεται με την αύξηση της μεταβλητής $x = \frac{T_{f,in}-T_a}{G_T}$. Επομένως μείωση του ιξώδους του νερού επιφέρει αύξηση του αριθμού Re.
- Η απόσταση μεταξύ του καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας επηρεάζει το ποσοστό των θερμικών απωλειών. Αύξηση του διακένου επιφέρει μείωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας καλύμματος-απορροφητή δια συναγωγής και κατ'

επέκταση μείωση των απωλειών κορυφής, άρα και των θερμικών απωλειών.

- Η μόνωση των πλάγιων και πίσω πλευρών του συλλέκτη χρησιμοποιείται ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Επομένως όσο μικρότερη θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζει η μόνωση τόσο πιο αποδοτικά συμπεριφέρεται ο συλλέκτης.
- Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ο συλλέκτης με ένα ή δύο καλύμματα είναι ξεκάθαρα πιο αποδοτικός από τον αντίστοιχο συλλέκτη χωρίς κάλυμμα. Αντίθετα για θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασίες περιβάλλοντος η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρότερη.

Βελτιστοποίηση με τη βοήθεια διαγραμμάτων για $A_c=2m^2$, $G_T=1000W/m^2$, $N=10$, $e_p=0,1$

- Θέτοντας κάποια όρια στο πλάτος του συλλέκτη ($0,3m \div 3m$) και τρέχοντας το πρόγραμμα, εντοπίστηκε μέγιστο για το πλάτος του συλλέκτη $W_{oi}=0,525m$ ενώ ο βαθμός απόδοσης είναι $\eta_{th}=0,64831$. Αρχικά ο βαθμός απόδοσης ήταν $\eta_{th}=0,6383$ για πλάτος συλλέκτη $W_{oi}=1m$. Επομένως μεταβάλλοντας το πλάτος, ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη βελτιώνεται κατά 1,568%.
- Επίσης υπάρχει ακρότατο στην καμπύλη μεταβολής του μήκους του συλλέκτη για το οποίο επιτυγχάνεται βέλτιστη τιμή του βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα για μήκος συλλέκτη $L=3,81m$ προκύπτει βαθμός απόδοσης $\eta_{th}=0,64831$ έναντι του βαθμού απόδοσης $\eta_{th}=0,6383$ που είχε προκύψει αρχικά (χωρίς βελτιστοποίηση) για μήκος $L=2m$.
- Μεγαλύτερο διάκενο συνεπάγεται ότι ο αέρας που περικλείεται ανάμεσα στο κάλυμμα και την απορροφητική πλάκα τείνει να είναι ακίνητος. Οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων του ακίνητου αέρα καθυστερούν τη μετάδοση θερμότητας μέσα στη μάζα του. Επομένως με μεγαλύτερο διάκενο επιτυγχάνουμε λιγότερες απώλειες προς το περιβάλλον.

Βελτιστοποίηση με τη βοήθεια διαγραμμάτων για $G_T=1000W/m^2$, $N=10$, $e_p=0,1$ και μεταβλητή

A_c

- Μεταβάλλοντας την συλλεκτική επιφάνεια ($0,4 \div 7m^2$) παρατηρούμε ότι καλύτερος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται για πλάτος συλλέκτη $W_{oi} = 0,5m$ με μήκος $L < 2,7m$ περίπου, ενώ για μήκη $L > 2,7m$ έχουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης για πλάτος συλλέκτη $W_{oi} = 0,75m$.

Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

- Διατηρώντας σταθερή τη συλλεκτική επιφάνεια $A_c=2m^2$ «μπλοκάρουμε» τις μεταβλητές πλάτους και διακένου μεταξύ των τιμών $0,3m < W_{oi} < 1m$ και $8mm < sr < 200mm$. Με τη βοήθεια του λογισμικού EES και τη μέθοδο των Γενετικών Αλγορίθμων παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη βελτιώθηκε από 0,6383 που είχε προκύψει αρχικά (χωρίς βελτιστοποίηση για μήκος $W_{oi}=1m$, $L=2m$, $sr=25mm$) σε 0,683 δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 7%.
- Μεταβάλλοντας τη συλλεκτική επιφάνεια και το πλάτος του συλλέκτη μεταξύ των τιμών $0,3m < W_{oi} < 3,5m$ και $0,3m^2 < A_c < 8m^2$ και με τη βοήθεια του λογισμικού EES και τη μέθοδο των Γενετικών Αλγορίθμων παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη βελτιώθηκε από 0,6383 που είχε προκύψει αρχικά (χωρίς βελτιστοποίηση για $W_{oi}=1m$, $L=2m$, $sr=25mm$, $A_c=2m^2$) σε 0,6564 (για $A_c=0,6201m^2$) δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 2,84%.

Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων με τη βοήθεια του «Μετώπου Pareto»

- Στις προσπάθειες που προηγήθηκαν για βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη, παρατηρήθηκε ότι βελτιώνοντας τον βαθμό απόδοσης μεγάλωνε ο όγκος του, άρα και οι διαστάσεις του. Συνεπώς στο πρόβλημά μας υπάρχουν δυο αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, όπου η βελτιστοποίηση της μιας συνάρτησης είχε σαν αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της άλλης. Τρέχοντας το πρόγραμμα για μια ευρεία γκάμα σετ διαστάσεων του διακένου ($15mm < sr < 50mm$) και του πάχους μόνωσης ($10mm < \delta_{ins} < 70mm$), και με τη βοήθεια του μετώπου Pareto προσπαθήσαμε να εντοπίσουμε μια πιο βελτιωμένη λύση από αυτή του αρχικού προβλήματος. Παρότι όμως τα μέλη του μετώπου Pareto είναι αδύνατο να συγκριθούν γιατί καμία λύση δεν κυριαρχεί επί της άλλης, εντοπίσαμε ένα σημείο πάνω στο μέτωπο, με βαθμό απόδοσης 0,647 (έναντι του 0,6383) και όγκο συλλέκτη $0,171m^3$ (έναντι του $0,181m^3$).

7.2 Προοπτικές βελτίωσης

Μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διάφορες επιμέρους βελτιώσεις όπως αυτές που επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω:

- Η επανάληψη της όλης διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, για τις διάφορες κατηγορίες των συγκεντρωτικών συλλεκτών, θα αποτελούσε ένα αξιολογικό μέτρο σύγκρισης.
- Αξιολογή θα ήταν επίσης η συνεισφορά μιας πειραματικής διαδικασίας και η σύγκρισή της με το υπολογιστικό μοντέλο για μια ρεαλιστικότερη εικόνα των αποτελεσμάτων.
- Εκτός από τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης και την μείωση του συνολικού όγκου του συλλέκτη, μια οικονομική ανάλυση θα ήταν εξίσου αναγκαία.
- Η προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης και κατανάλωσης θα μπορούσε να δώσει μια πιο

ολοκληρωμένη εικόνα της αποδοτικότητας ολόκληρου του θερμικού ηλιακού συστήματος.

- Η αξιοποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων που θα λάμβανε το Engineering Equation Solver από κάποιο άλλο λογισμικό θα έδινε την δυνατότητα για λεπτομερή ανάλυση των θερμοροών και του βαθμού απόδοσης για κάθε στιγμή της ημέρας αλλά και ετησίως γενικότερα.

8 Βιβλιογραφία

- [1] J.A. Duffie, W.A. Beckman “Solar Engineering of Thermal Processes” 3rd Edition, John Wiley and sons, INC, 1991
- [2] S.A. Kalogirou, “Solar Energy Engineering : Processes and Systems”, 1st Edition, Elsevier, 2009
- [3] Κ.Α. Αντωνόπουλος, “Θερμικά Ηλιακά Συστήματα”, Μέρος Πρώτο, 2011
- [4] Γ.Ο. Μαρτινόπουλος, Διδακτορική Διατριβή “Σχεδίαση, κατασκευή και αξιολόγηση πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατάλληλου για ψυχρά κλίματα”, 2009
- [5] Η. Παπανικολάου, Ζ. Wang, Β. Μπελεσιώτης, “Μελέτη των αεροδυναμικών και ενεργειακών χαρακτηριστικών συλλέκτη αέρα με σωλήνες κενού διπλού τοιχώματος”, Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου του ΙΗΤ για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 29-31 Μαρτίου 2006.
- [6] Sargent & Lundy LLC Consulting Group Chicago, Illinois, “Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts”, National Renewable Energy Laboratory, 2003;SR 550-35060
- [7] Κ.Χ.Γιαννάκογλου, “Μέθοδοι αιτιοκρατικής και Στοχαστικής Βελτιστοποίησης”
- [8] Σ.Λυκοθανάσης, “Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους”, 2001
- [9] D.E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1989
- [10]Varun, Siddhartha, “Thermal performance optimization of a flat plate solar air heater using genetic algorithm”, Applied Energy 2010;87(5):1793-1799
- [11]S.A Kalogirou, “Optimization of solar systems using artificial neural networks and genetic algorithms”, Applied Energy 2004;77(4):383-405
- [12]D. Njomo, M. Daguinet, “Sensitivity analysis of thermal performances of flat plate solar air heater”, Heat Mass Transfer 2006;42:1065-1081
- [13]Z. Jiandong, T. Hanzhong, C. Susu, “Numerical simulation for structural parameters of flat-plate solar collector”, Solar Energy 2015;117:192-202
- [14]C.S. Meena, S. Meena, Dr.V.K.Bajpai, “Correlation between absorber plate thickness δ and collector efficiency factor F' of solar flat-plate collector”, Applied Mechanics and Materials 2014;592-594:2341-2344
- [15]Shouquat Hossain, A.W. Abbas, J. Selvaraj, Ferdous Ahmed, Nasrudin Bin Abd Rahim, “Experiment of a flat plate solar water heater collector with modified design and thermal performance analysis”, Applied Mechanics and Materials 2014;624:332-338
- [16]H. Dagdougui, A. Ouammi, M. Robba, R. Sacile, “Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Tetouan (Morocco)”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011;15:630-638
- [17]Θερμικά Ηλιακά Συστήματα (Περιγραφή-Εφαρμογές-Οδηγίες Συντήρησης), Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
- [18]Γ. Κατσίγιαννης, “Ηλιακοί Συλλέκτες”
- [19]Κ. Παπάζογλου, Διπλωματική Εργασία “Προσομοίωση πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με

- ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα”, 2013
- [20]Α. Ντάτσης, Διπλωματική Εργασία “Υδροθερμική συνεργασία σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με αυξημένη διείσδυση φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών συστημάτων”, 2011
- [21] Α.Μαντήκος, Διπλωματική Εργασία “Προσομοίωση ηλιοθερμικού σταθμού παραγωγής ηλιακής ενέργειας τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων”, 2011
- [22]Δ. Κορρές, Διπλωματική Εργασία “Σχεδίαση και προσομοίωσης ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με τη βοήθεια του λογισμικού Solidworks”, 2014
- [23]http://www.ebhe.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=86&Itemid=206&lang=el (Ενωση Βιομηχάνων Ηλιακής Ενέργειας)
- [24]Δ.Κ. Ασημακόπουλος, Β.Ι. Λυγερού, Γ.Α. Αραμπατζής, “Μεταφορά θερμότητας και μάζας”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2012
- [25]Ξ. Κακάτσιος, “Αρχές μεταφοράς θερμότητας και μάζας”, Εκδόσεις Συμεών, 2006
- [26]Y.A. Cengel, A.J. Ghajar, “Heat and Mass Transfer, Fundamentals and Applications”, 4th Edition
- [27]S.A. Klein, “Manual of Engineering Equation Solver”
- [28]<http://www.homepower.com/articles/solar-water-heating/equipment-products/solar-collectors-behind-glass>
- [29]<http://www.eoearth.org/view/article/156097/>
- [30]<http://icex.technologyreview.com/articles/2012/07/producing-energy-renewably/>
- [31]<http://www.evwind.es/2012/10/07/worlds-largest-linear-fresnel-solar-power-station-commences-operation/24364>