Ε Θ Ν Ι Κ Ο Μ Ε Τ Σ Ο Β Ι Ο Π Ο Λ Υ Τ Ε Χ Ν Ε Ι Ο

Σ Χ Ο Λ Η Μ Η Χ Α Ν Ο Λ Ο Γ Ω Ν Μ Η Χ Α Ν Ι Κ Ω Ν

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

Μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης υβριδικών (φωτοβολταϊκών / θερμικών) ηλιακών συλλεκτών αέρα

Όνομα φοιτητη : Καράμπαμπας Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής : Τζιβανίδης Χρήστος

Αθήνα,Σεπτέμβριος 2008

Ε Θ Ν Ι Κ Ο Μ Ε Τ Σ Ο Β Ι Ο Π Ο Λ Υ Τ Ε Χ Ν Ε Ι Ο

Σ Χ Ο Λ Η Μ Η Χ Α Ν Ο Λ Ο Γ Ω Ν Μ Η Χ Α Ν Ι Κ Ω Ν

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

Μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης υβριδικών (φωτοβολταϊκών / θερμικών) ηλιακών συλλεκτών αέρα

Όνομα φοιτητη : Καράμπαμπας Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής : Τζιβανίδης Χρήστος

Αθήνα,Σεπτέμβριος 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφαλαιο 1 : Από τα ορυκτά καυσιμα στις ΑΠΕ **ΣΕΛ.**

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα 2-3
1.2 Το πρόβλημα της ρύπανσης από τα ορυκτά καύσιμα 3-4
1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 5
1.3.1 Η Ηλιακή ενέργεια 6
1.3.2 Η Αιολική ενέργεια 6-7
1.3.3 Η Βιομάζα 7-8
1.3.4 Η Γεωθερμία 8
1.3.5 Μικρά Υδροηλεκτρικά 8-9
1.3.6 Μελλοντικές προοπτικές των ΑΠΕ στη Ελλάδα και την Ευρώπη 9

Κεφαλαιο 2 : Ο ήλιος και η ηλιακή ακτινοβολία

2.1 Εισαγωγή 11
2.2 Η δομή του ήλιου 12-13
2.3 Βασικές γωνίες 14
2.3.1 Υπολογισμός βασικών γωνιών 15
2.4 Η ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας 15-16
2.4 Η απορρόφηση της ακτινοβολίας απο την ατμόσφαιρα 16-17
2.5 Το ηλιακό δυναμικό 17-18

Κεφαλαιο 3 : Στοιχεία θεωρίας των φ/β κυττάρων

3.1 Εισαγωγή 20
3.2 Αρχές λειτουργίας των φ/β στοιχείων 21
3.2.1 Αγωγοί , μονωτές και ημιαγωγοί 21-23
3.2.2 Ημιαγωγοί τύπου p και n 23-24
3.2.3 Η δίοδος p-n 24-25
3.2.4 Η πόλωση της διόδου p-n 25-26
3.2.5 Συμπεριφορά των ημιαγωγών υπό φωτισμό - Η φωτοδίοδος 26-27
3.2.6 Το φωτοβολταικό στοιχείο διόδου p-n 27
3.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φβ στοιχείου
3.3.1 Πρώτη προσέγγιση 27-29
3.3.2 Δεύτερη προσέγγιση 29-30
3.4 Απώλειες σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο 30-31
3.4.1 Η επίδραση του ηλεκτρικού φορτίου στην απόδοση 31-32
3.4.2 Η επίδραση της θερμοκρασίας στο βαθμό απόδοσης 32-33
3.4.3 Η επίδραση της έντασης της ακτινοβολίας στο βαθμό απόδοσης 33-34
3.4.4 Η συμπεριφορά του στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες 34
3.4.5 Αξιολόγηση των ημιαγωγών για ηλιακές φωτοβολταϊκές εφαρμογές 35-36

Κεφαλαιο 4 : Τα Φωτοβολταϊκά πλαίσια

4.1 Γενικά 38
4.2 Υλικά και τρόπος κατασκευής του πλαισίου 38-39
4.3 Ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου (PACKING FACTOR) 39-40
4.4 Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του πλαισίου 40
4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του πλαισίου 40-41
4.6 Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ πλαισίου 42

4.7 Παραδείγμα πραγματικού ΦΒ πλαισίου πολ/ικού πυριτίου 42
4.8 Παράδειγμα πραγματικού ΦΒ πλαισίου άμορφου πυριτίου 43
4.9 Φωτοβολταϊκά πάνελ και συστοιχίες 43-44
4.10 Διασυνδεδεμένα(on grid) και μή δισυνδεδεμένα(off grid) 44-45
4.11 Διάφορα υποσυστήματα της φ/β εγκατάστασης 45-49

Κεφαλαιο 5 : Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Θερμικά συστήματα

5.1 Εισαγωγή 51-52
5.2 BIPV 52-53
5.3 BIPV και ΦΒ Θερμικά συστήματα 54-55
5.3.1 Σχεδιαστικές παράμετροι για PV/T 55
5.3.2 Τα υβριδικα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα και οι εφαρμογές τους 55-57
5.3.3 Τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού 58-59
5.3.4 Τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού-αέρα 59
5.4 Η χρήση των φβ/θ συστημάτων σε διάφορες εφαρμογές 60
5.5 Η χρήση ΦΒ/Θ σε μικρές εγκαταστάσεις 60-61

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ Α

Α 1.1 Εισαγωγή 63
Α.1.2 Οι διατάξεις REF,TMS,FIN 64
Α 1.3 Ο ρόλος της μόνωσης 64
Α.1.4 Ο ρόλος του διάφανου καλύμματος 65
ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ 66-67
Α 1.5 Αναλυτική εξίσωση φβ συλλέκτη και παραδοχές 67-71
Α 1.6 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενης διάταξης 71-72
Α.1.7 Προεπισκόπηση και σχόλια 72-73

Α .2 Η ΔΙΑΤΑΞΗ PVT REF 73

Α.2.1. REF UNGLAZED 73-74
Α.2.1.1 Εξισώσεις PV/T REFU 74-79
Α.2.1.2 Βέλτιστη παροχή $\dot{m}_o$ και μεγιστη παροχή 79
Α.2.1.3 Επίλυση των εξισώσεων 80-81
Α.2.1.4 Μεταβολή παραμέτρων με το πάχος της μόνωσης dins 81
Α.2.1.5 Μεταβολή παραμέτρων με την ταχύτητα του ανέμου 81-82
Α.2.1.6 Μεταβολή παραμέτρων με το βάθος του αγωγού d 82
Α.2.1.7 Μεταβολή παραμέτρων με το μήκος του συλλέκτη 83
Α.2.1.8 Μεταβολή των κυρίων παραμέτρων με την παροχή (REFU) 84-86
Α.2.1.9 Συγκριτικά αποτελέσματα (REF) 86-87
Α.2.1.10 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων-συπεράσματα 87

Α.2.2. REF GLAZED
Α.2.2.1 Η χρήση υαλοπίνακα 88-89
Α.2.2.2 Εξισώσεις PV/T REFGL 90-91
Α.2.2.3 Μεταβολή των κυρίων παραμέτρων με την παροχή (REFG) 91-93

Α.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REFU-REFG
Α.2.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – συμπεράσματα 94

A.3 Η ΔΙΑΤΑΞΗ PVT TMS 95

A.3.1 TMS UNGLAZED 95-96
A.3.1.1 Εξισώσεις PV/T TMSUNGL 96-97
A.3.1.2 Μεταβολή των κυρίων παραμέτρων με την παροχή (TMSU) 98-99
A.3.1.3 Σύγκριση βαθμών απόδοσης για d=0,05 , d=0,10 και d=0,15 100

A.3.2 TMS GLAZED 101
A.3.2.1 Μεταβολή των κυρίων παραμέτρων με την παροχή (TMSG) 101-102

A.4 Η ΔΙΑΤΑΞΗ PVT FIN 103

A.4.1 Στοιχεία θεωρίας πτερυγίων 103-107
A.4.2 FIN UNGLAZED 107
A.4.2.1 Εξισώσεις PV/T FIN UNGL
A.4.2.2 Μεταβολή των κυρίων παραμέτρων με την παροχή (FINU) 108
A.4.2.3 Συγκριση βαθμων αποδοσης για d=0,05 , d=0,10 και d=0,15 109-112

A.4.3 FIN GLAZED 112
A.4.3.1 Μεταβολή των κυρίων παραμέτρων με την παροχή (FING) 113
A.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ 114
A.5.1 Σύγκριση REF – TMS – FIN UNGL ως προς τον ηλεκτρικό β.α για τυπικές συνθήκες 114-115
A.5.2 Σύγκριση REF – TMS – FIN UNGL ως προς τον θερμικό β.α(nth) για τυπικές συνθήκες 115
A.5.3 Σύγκριση REF – TMS – FIN GL ως προς την απόδοση 116-117
A.5.4 Σύγκριση των διτάξεων σε διαφορετικές συνθήκες 118-119
A.5.5 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 119

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΜΕΡΟΣ Β'

B.1 Εισαγωγή 121
B.2 Υπολογισμός ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδουγια το τυπικό έτος (ΑΘΗΝΑ 1962-1980) 121
B.2.1 Υπολογισμός των Gb,Gd και G 122-123
B.2.2 Υπολογισμός του GT μέσω των συντελεστών Rb και Rd 123-125
B.2.2.1 Υπολογισμός του Rb 126
B.2.2.2 Υπολογισμός του Rd 126-127
B.2.2.3 Υπολογισμός του GT 127-128
B.3 Δοκιμή φβ συλλέκτη FINU σε πραγματικές συνθήκες για m=0,05 kg/sec 128-129
B.3.1 Απόδοση του συλλέκτη για την 21η Μαΐου του τυπικού έτους 130
B.3.2 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη REFU (21η Μαΐου) 131
B.3.3 Σύγκριση REFU – FINU για την 21η Μαΐου 131
B.3.4 Απόδοση του συλλέκτη για την 22α Δεκεμβρίου του τυπικού έτους 132-133
B.3.5 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη REFU (22 Δεκεμβρίου) 133-134
B.3.6 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη FINU (22 Δεκεμβρίου) 134
B.3.7 Σύγκριση REFU – FINU για την 22α Δεκεμβρίου 134
B.3.8 Απόδοση του συλλέκτη TMSG 135-136
B.3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 136

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο σκοπό να διερευνήσει τη βελτίωση που προκύπτει στην απόδοση της τυπικής διάταξης ενός φωτοβολταϊκού-θερμικού συλλέκτη αέρα,με τη χρήση διατάξεων που αυξάνουν την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.

Οι υπο μελέτη βελτιώσεις είναι η τοποθέτηση μιας μεταλλικής επιφάνειας στον αγωγό ροής του αέρα και η τοποθέτηση μεταλλικών πτερυγίων στην εσωτερική πλευρά της πλάτης του συλλέκτη.

Της υπολογιστικής μελέτης ωστόσο προηγούνται κάποια μικρά θεωρητικά κεφάλαια που κρίθηκε απαραίτητο να υπάρχουν ως εισαγωγή.

Συγκεκριμένα,στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες από τις αιτίες που μας οδηγούν στη λύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και οι κυριότερες μορφές των ΑΠΕ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται κάποιες χρήσιμες πληροφορίες για τη φύση και τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας και στο τρίτο παρουσιάζονται κάποια στοιχεία από τη θεωρία των φ/β κυττάρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο βρίσκονται κάποια στοιχεία για τα φ/ πλαίσια που είναι η δομική μονάδα κάθε φ/β γεννήτριας και στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχουν κάποιες πληροφορίες για τα φ/β θερμικά συστήματα και τις πρακτικές εφαρμογές τους.

Ακολουθεί το πρώτο τμήμα των υπολογισμών στο οποίο και θεμελιώνεται το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται ,γίνεται η σύγκριση των διατάξεων ως προς την απόδοση τους και εξάγονται κάποια συμπεράσματα.

Στο δεύτερο τμήμα των υπολογισμών έχουν επιλεγεί κάποιες διατάξεις για να δοκιμαστούν σε μεταβλητές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας για δύο ημέρες του τυπικού έτους.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι λόγω των παραδοχών που έχουν γίνει για την απλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από εκείνα άλλων και ίσως πιό πολύπλοκων μοντέλων , ωστόσο κρίνεται τελικά πως αρκεί για να καταδείξει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε διάταξης και να μας δώσει κατά προσέγγιση τις τιμές της ωφέλιμης θερμικής και ηλεκτρικής απολαβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΠΟ ΤΑ ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΙΣ Α.Π.Ε

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Τις τελευταίες δεκαετίες γινόμαστε όλοι μάρτυρες μιας αλματώδους προόδου του τεχνολογικού πολιτισμού που έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του τρόπου ζωής του ανθρώπου γεγονός που αποτυπώνεται στις καθημερινές μας συνήθειες.

Θα πρέπει να παραδεχτούμε πως τεχνολογικά επιτεύγματα όπως το αυτοκίνητο μας , πολλές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές καθώς και εγκαταστάσεις θέρμανσης και κλιματισμού είναι αναπόσπαστο στοιχείο τις καθημερινότητας μας, έχουν βελτιώσει το επίπεδο άνεσης μας και μας έχουν γίνει απαραίτητες.

Όλη όμως αυτή η πρόοδος, που αφορά κυρίως τις χώρες του λεγόμενου δυτικού κόσμου, έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μια ολοένα και αυξανόμενη,σχεδόν ακόρεστη, ζήτηση για ενέργεια.

Από την άλλη υπάρχει ραγδαία αύξηση του πληθυσμού κυρίως στις υπό ανάπτυξη χώρες ενώ χώρες –πληθυσμιακοί γίγαντες όπως είναι η Κίνα και η Ινδία, έχουν εισέλθει δυναμικά στη παγκόσμια βιομηχανική παραγωγή με πολύ υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης .

Οι χώρες αυτές φαντάζουν ενεργειακά αδηφάγες και δεν δείχνουν ασφαλώς πρόθυμες να περιορίσουν τους ρυθμούς ανάπτυξης τους για χάρη της εξοικονόμησης ενέργειας. Προσπαθούν να αναπτυχθούν με βάση το μοντέλο με το οποίο άνθησαν οι βιομηχανικές οικονομίες της Δύσης παλαιότερα .

Μια βασική συνιστώσα του μοντέλου αυτού είναι και η αλόγιστη χρήση κάθε είδους ενεργειακού πόρου με πρώτο υποψήφιο φυσικά τα πετρελαιοειδή και τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα.

Αυτοί οι παράγοντες κάνουν σχεδόν απρόβλεπτη για το απώτερο μέλλον την πρόβλεψη σχετικά με τις παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις και το μόνο στο οποίο συμφωνούν οι αναλυτές είναι πως αργά ή γρήγορα τα διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων θα αρχίσουν να λιγοστεύουν επικίνδυνα.

Πως όμως φθάσαμε σε αυτό το σημείο;

Για να φθάσει η παραγωγή ενέργειας στα σημερινά επίπεδα ακολουθήθηκε μια στρατηγική βάναυσης εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων αυτών.

Η αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια απαίτησε και την εγκατάσταση νέων θερμοηλεκτρικών κυρίως μονάδων παραγωγής ενέργειας που καταναλώνουν πετρέλαιο , γαιάνθρακες (λιγνίτη, λιθάνθρακα) αλλά και φυσικό αέριο .

Η ενεργειακή πολιτική του σύγχρονου ανθρώπου μεχρι τις μερες μας, προσπαθούσε να αντισταθμίζει την αυξανόμενη ζήτηση με αύξηση της προσφοράς και συνεπώς υπεράντληση των ορυκτών αποθεμάτων.

Ο πλανήτης αντιμετωπιζόταν εως πρόσφατα ως μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ορυκτού πλούτου και σχεδόν όλοι αγνοούσαν το προφανές: ότι δηλαδή τα ορυκτα καύσιμα χρειάστηκαν εκατομμύρια χρόνια για να σχηματισθούν από απολιθώματα κάτω από πολύ υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες στο εσωτερικό της γης.

Συνεπώς η ποσότητα τους ειναι πεπερασμένη και ο φυσικός ρυθμός παραγωγής τους είναι εξαιρετικά βραδύς .

Όπως ανφέρθηκε και προηγουμένως όλοι οι ειδικοί συμφωνούν πως αν στηρίξουμε την τεχνολογική μας πρόοδο στην κατασπατάληση των ορυκτών πόρων, φυσιολογικά θα έρθουμε αντιμέτωποι με μια ενεργειακή κρίση .

Από τη στίγμη που ο ρυθμός παράγωγης θα φθάσει στην κορύφωση του τότε θα γίνει ορατος και ο χρονικός ορίζοντας εξάντλησης των αποθεμάτων.

Ωστόσο η πραγματική κρίση θα εμφανιστεί αρκετά πιο νωρίς τη στιγμή δηλαδή που η παραγωγή ορυκτών καυσίμων θα αδυνατεί να καλύψει τη ζήτηση τους.

Όλες οι ενδείξεις είναι προς την κατεύθυνση πως όλα τα μεγάλα κοιτάσματα πετρελαίου έχουν ήδη ανακαλυφθεί και βρίσκονται στις χώρες του ΟΠΕΚ.

Οι περισσότερες προσπάθειες ανακάλυψης νέων έχουν σχεδόν εγκαταλειφθεί.

Συνεπώς οι χώρες που δεν έχουν ορυκτό πλούτο και που στην πλειοψηφία τους έχουν στηρίξει την ενεργειακή πολιτική τους στις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων βρίσκονται υπό καθεστώς ενεργειακής ομηρίας κάθε φορά που

εμφανίζεται στο παγκόσμιο προσκήνιο κάποια ενεργειακή κρίση με το πρόσχημα , όπως και πρόσφατα αποδείχτηκε, της αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης πετρελαίου.

Τέτοιες ενεργειακές κρίσεις εμφανίσθηκαν μέχρι σήμερα πολλές και ξεπεράστηκαν όλες αποτελεσματικά αν και όχι πάντα εντελώς ανώδυνα.

Αυτό σημαίνει πως ήταν όλες τεχνητές και δημιουργήθηκαν για αν προκαλέσουν αναταραχή στην παγκόσμια οικονομία και να εξυπηρετήσουν φαύλους οιονομικούς και γεωπολιτικούς σκοπούς.

Πάντως φαίνεται ότι ο άνθρωπος ακολουθώντας ίσως το αρχέγονο ένστικτο της αυτοσυντήρησης φαίνεται να παίρνει μετρα μόνο όταν βρίσκεται ενώπιον του φάσματος της καταστροφής.

Έτσι εντείνει την αναζήτηση νέων ενεργειακών πηγών αλλά και την προσπάθεια αποδοτικότερης αξιοποίησης των πηγών που ήδη υπάρχουν,τότε μόνο όταν κάτω από την πίεση του φάσματος μιας ενεργειακής κρίσης, αντιλαμβάνεται την ανεπάρκεια της ενεργειακής βάσης σε σχέση με τις αυξανόμενες ενεργειακές τις ανάγκες .

Πρώτες οι δυτικές χώρες πρεπει να υιοθετήσουν πολιτική εξοικονόμησης και να επενδύσουν σε ήπιες μορφές ενέργειας, ενώ παράλληλα ο ρυθμός εκβιομηχάνισης στις "αναπτυσσόμενες" χώρες να κρατηθεί χαμηλός, ωστε η ζήτηση πετρελαίου να αυξάνεται με αργούς ρυθμούς

Το ενεργειακό προβλημα μαζί με τις κλιματικές αλλαγές τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και τον υποστιτισμό που μαστιζει τις φτωχές χώρες,είναι οι μεγάλες προκλήσεις που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα .

Κάθως αυτά τα προβλήματα έχουν κοίνες παραμέτρους είναι απαραίτητο για όλες τις χώρες να εφαρμόσουν μια ενιαία στρατηγική αντιμετώπισής τους

1.2 Το πρόβλημα της ρύπανσης από τα ορυκτά καύσιμα

Λέγοντας ρύπανση εννοούμαι την εκπομπή ρυπαντών ,από την ανθρώπινη δραστηριότητα ,που διαταράσουν την ισορροπία του οικοσυστήματος.

Γενικά η ρύπανση διαχωρίζεται σε ρύπανση του αέρα , των υδάτων και σε ηχητική ρύπανση.

Η κυριότερη συνέπεια από την καύση ορυκτών καυσίμων είναι η αέριος ρύπανση που μπορεί να είναι βιομηχανική ή αστική ανάλογα με το αν την προκαλεί η λειτουργία κάποιας βιομηχανίας ή οι δραστηριότητες των κατοίκων ενός μεγάλου αστικού κέντρου.

Οι αέριοι ρυπαντές χωρίζονται σε πρωτογενείς ρυπαντές ,όπως είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2),το μονοξείδιο του άνθρακα(CO),οι υδρογονάνθρακες(HC) και τα αιωρούμενα σωματίδια και σε δευτερογενείς ρυπαντές όπως είναι τα Nox και τα οξειδωτικά φωτοχημικά .

Η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει άμεσα την ψυχοσωματική υγεία των ανθρώπων , προκαλώντας τσούξιμο των οφθαλμών ,βήχα,σοβαρά αναπνευστικά, τοξικολογικά και νευρικά προβλήματα.

Η καύση των ορυκτών καυσίμων όπως είναι το πετρέλαιο και οι γαιάνθρακες κυρίως σε μεγάλα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια,προκαλεί σημαντική υποβάθμιση του περιβάλλοντος της περιοχής στην οποία βρίσκεται και το μέγεθος της είναι ανάλογο του μεγέθους της ηλεκτροπαραγωγής και του είδους του καυσίμου(πετρέλαιο, λιθάνθρακας, φυσικό αέριο).

Καπνός , σωματίδια , οξείδια του θείου και του αζώτου και υδρογονάνθρακες βρίσκονται στη λίστα των ρυπαντών που παράγουν τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και σε αυτά προστίθεται συχνά και η θερμική ρύπανση παρακείμενων λιμνών.

Σε μακροσκοπική κλίμακα ωστόσο σοβαρές είναι οι επιδράσεις της ρύπανσης στο κλίμα της γης.

Η τοπική ρύπανση λοιπόν φαίνεται να είναι απλώς η κορυφή του παγόβουνου καθώς οι συνέπειες τις οξύνουν προβλήματα παγκοσμίου ενδιαφέροντος όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η όξινη βροχή και η τρύπα του όζοντος.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Πρόκειται ίσως για το πιό πολυσυζητημένο φαινόμενο στους κόλπους των οικολογικών κινημάτων και όχι μόνο, καθώς καθημερινά γίνονται πιό αισθητές οι κοινωνικές και πολιτικές προεκτάσεις του.

Καθώς όλα δείχνουν,το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ανθρωπογενή εκπομπή των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου εκ των οποίων τα κυριότερα είναι το διοξείδιο του άνθρακα ,τα οξείδια του αζώτου και το μεθάνιο.

Αυτά προέρχονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων.

Κυρίως η έκλυση CO2 έχει φτάσει να ξεπεράσει σημαντικά την ικανότητα των χερσαίων φυτών να το απορροφήσουν με αποτέλεσμα να σχηματίζει ένα θερμομωνοτικό κάλυμμα στην ατμόσφαιρα.

Το κάλυμμα αυτό είναι διαπερατό από την μικροκυματική ηλιακή ακτινοβολία αλλά όχι πλήρως διαφανές για την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η γη. Έτσι αυξάνεται η αντίσταση της ροής θερμότητας από τη γη προς την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας.

Υπάρχουν ενδείξεις ότι η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης αυξήθηκε κατά 0,5 ^{o}C αυτόν τον αιώνα.

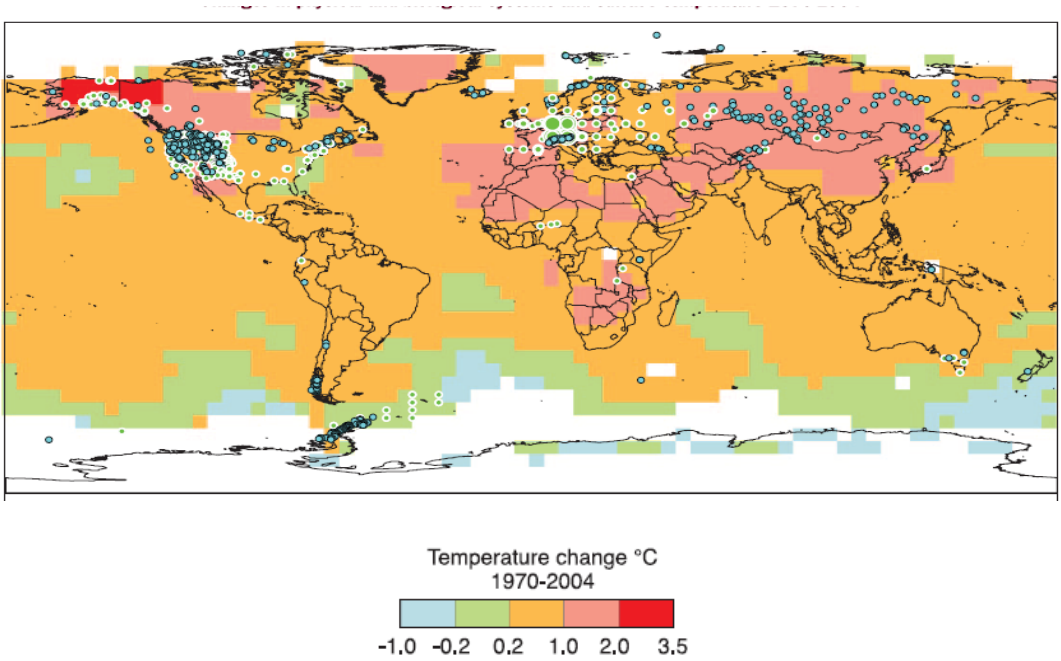
Έστω και αν αυτή είναι φαινομενικά μια μικρή αύξηση,είναι ικανή να ανατρέψει τελείως τη θερμοδυναμική του ισορροπία του πλανήτη,καθώς μπορεί να προκαλέσει το λιώσιμο των πολικών πάγων με αποτέλεσμα την πλημμύριση των παράκτιων περιοχών όπως και πολλά ακραία καιρικά φαινόμενα δηλαδη π.χ παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας , καταιγίδες κ.λ.π.

Πιν.1.1 Αέρια θερμοκηπίου με τη μεγαλύτερη αύξηση συγκέντρωσης (Πηγή: IPCC)

Αέριο	**Επίπεδα 1998**	**Αύξηση από το 1750**	**Ποσοστό αύξησης**
Διοξείδιο του άνθρακα	365 ppm	87 ppm	31%
Μεθάνιο	1,745 ppb	1,045 ppb	150%
Οξείδιο του Αζώτου	314 ppb	44 ppb	16%

Από όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας καταλαμβάνει την πρώτη θέση στην παραγωγή CO2.

Αντίθετα το μεγαλύτερο μέρος του CH_4 παράγεται από την καλλιέργεια ριζιού καθώς και από φυσικές δραστηριότητες.



Σχ. 1.1 Παγκόσμιος χάρτης μεταβολής της θερμοκρασίας

1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Στις δύο προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν επιγραμματικά τα δύο σημαντικότερα προβλήματα από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας : Η ρύπανση του περιβάλλοντος από την καύση τους και η εξάρτηση του ρυθμού ανάπτυξης των σύγχρονων κοινωνιών από μια μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Τονίστηκε επίσης ότι υπάρχει αδήριτη ανάγκη για συναίνεση όλων των κρατών, και πρώτα απο όλα των λεγόμενων ανεπτυγμένων,για κατάρτιση μιας κοινής στρατηγικής μείωσης της ενεργειακής εξάρτησης της ανθρωπότητας από τα ορυκτά καύσιμα.

Όπως είναι γνωστό έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες σε διακρατικό επίπεδο για συμφωνίες που έχουν ως στόχο τη μείωση της παραγωγής ρυπογόνων ουσιών καύσης ή και την υποχρεωτική ενσωμάτωση συγκεκριμένων τεχνολογιών απορρύπανσης.

Η πιό σημαντική συμφωνία είναι αυτή που επετεύχθει στο Κιότο της Ιαπωνίας το 1997 και δεσμεύει νομικά τις χώρες πυ την υπέγραψαν να μειώσουν δραστικά την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου

Τουλάχιστο φαίνεται πως τα κράτη έχουν αντιληφθεί τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που απειλούν άμεσα τον πλανήτη μας .

Ταυτόχρονα πληθαίνουν οι πρωτοβουλίες σε εθνικό επίπεδο και για την μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων μέσω πολιτικών εξοικονόμησης ενέργειας .

Το μεγαλύτερο ωστόσο όπλο που διαθέτει ο σύγχρονος άνθρωπος στη μάχη για την ενεργειακή του αυτονομία είναι οι λεγόμενες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Αυτές επίσης ονομάζονται και «ανανεώσιμες» για να τονισθεί η αντίθεση τους με τα πετρελαιοειδή ή και ήπιες μορφές διοτι η χρήση τους δεν αφήνει επιβλαβή κατάλοιπα.

Πρόκειται για πηγές ενέργειας που εκμεταλλεύονται πρακτικά ανεξάντλητα αποθέματα όπως ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια) και η γεωθερμία(η εκμετάλλευση της θερμότητας της γης) ή περιοδικά επαναλαμβανόμενους φυσικους κύκλους οπως του άνεμου (αιολική ενέργεια) και του νερου (υδροηλεκτρική ενεργεια). Τέλος στην κατηγορία αυτή υπάγεται και η ενεργειακή εκμετάλλευση προιόντων φυσικών διεργασιών (βιομάζα)

Οι ΑΠΕ λόγω της δεδομένης ραγδαίας ανόδου της τιμής των συμβατικών καυσίμων,γίνονται μια ακόμα ελκυστικότερη πηγή ενέργειας. Σχεδόν όλες οι μορφές μπορούν να βρουν εφαρμογή τόσο σε μικρή κλίμακα (οικιακές εγκαταστάσεις) όσο και σε μεγαλύτερης κλίμακας έργα. (ΦΒ πάρκα, Αιολικά πάρκα κ.ο.κ)

Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.

Θα πρέπει να τονισθεί με κάθε τρόπο ως στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν περιλαμβάνεται η πυρηνική , ακριβώς γιατί δεν θεωρείται ήπια και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας , λόγω των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγουν τα πυρηνικά εργοστάσια

Παρόλο που η παρούσα εργασία σχετίζεται με την ηλιακή ενέργεια και συγκεκριμένα την φωτοβολταικη μετατροπή , αξίζει να αφιερωθεί λίγος χώρος από το εισαγωγικό αυτό καφάλαιο , στην περιγραφή όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.3.1 Η Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου.

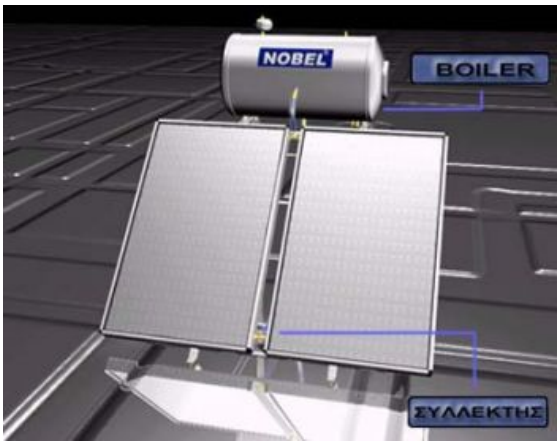
Οι κυριότερες εφαρμογές αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας με τη χρήση μηχανικών μέσων είναι η θερμική και η φωτοβολταικη.

Στην πρώτη εκμεταλλευόμαστε τη θερμότητα της ακτινοβολίας για να ζεστάνουμε κάποιο ρευστό , συνήθως νερό, ενώ στη δεύτερη εκμεταλλευόμαστε το φωτοβολταικό φαινόμενο για να μετατρέψουμε μέρος της ενέργειας της ακτινοβολίας αυτής σε ηλεκτρική ισχύ.

Μία άλλη εφαρμογή που κερδίζει έδαφος είναι ο σχεδιασμός ηλιακών παθητικών κτιρίων , δηλαδή κτιρίων που εκμεταλλεύονται στο έπακρο τη θερμότητα και το φώς του ήλιου για να μειώσουν τις ενεργιεακέ τους ανάγκες σε θέρμανση, ψυξη κια φωτισμό. Τα ηλιακά παθητικά κτίρια αποτελούν μέρος της φιλοσοφίας της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής .

Η εκμετάλλευση του ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας θα αποτελέσει τμήμα της επόμενης παραγράφου που αφορά την ηλιακή ακτινοβολία.

Σχ.1.2 **Μονάδα ηλεκτροπαραγωγής από φβ πλαίσια** (πηγή : www.global-energy.eu)



Σχ.1.3 **Τυπικός θερμικός ηλιακός συλλέκτης**(πηγή : www.alexstore.gr)

1.3.2 Η Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται απο την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου.

Αν αναλογοστούμε ότι ο άνεμος οφείλεται στην ανομοιόμορφη θέρμανση των διαφόρων περιοχών,τότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η ηλιακή ακτινοβολία είναι και πάλι υπεύθυνη για τη δημιουργία του ανέμου.

Την αιολική ενέργεια την εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος από την αρχαιότητα, αρχικά με τη χρήση ιστίων στα πλοία και στη συνέχεια με την κατασκευή ανεμόμυλων.

Σήμερα εκμετάλλευση το αιολικού δυναμικού, γίνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου , σε ηλεκτρισμό.

Η τεχνολογια των ανεμογεννητριών είναι από τις πλέον ώριμες και μάλιστα στην Ελλάδα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ξεπερνά τα 750MW.

Εκτός από τα αιολικά πάρκα που τροφοδοτούν απευθείας το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπου είναι εγκατεστημένες μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος 80kW-3MW, εγκαθίστανται και οι μικρές Α/Γ για εφαρμογές μικρής κλίμακας,κυρίως την ικανοποίηση οικιακών καταναλώσεων.

Η εγκατάσταση τους γίνεται σε μη αστικές περιοχές με ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό και γύρω τους απαιτείται να υπάρχει μια έκταση χωρίς εμπόδια.

Σχ.1.4 **Αιολικό πάρκο στην Ευβοια**
(πηγή : www.tovima.gr)

Σχ.1.5 **Συνδυασμός Α/Γ και ηλιακών συλλεκτών σε συγκρότημα κατοικιών**

Η χώρα μας, με μεγάλη παράδοση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, προσφέρεται ιδιαίτερα για την αξιοποίηση αυτής της ανανεώσιμης και καθαρής πηγής αφού διαθέτει ισχυρούς ανέμους, βουνοκορφές και απομονωμένα νησιά.

Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

1.3.3 Η Βιομάζα

Η βιομάζα είναι η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που περιλαβάνει υλικά φυτικής ή ζωικής προέλευσης,όπως δασικά γεωργικά και αγροβιομηχανικά υπολείμματα , προϊόντα ενεργειακών καλλιεργειών αλλά ακόμα και κτηνοτροφικά ή αστικά απόβλητα και απορρίματα.

Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται και αυτή από τον ήλιο και τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Η βιομάζα μπορεί να καεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή θερμότητας,μπορεί όμως και με φυσική ,θερμοχημική, ή και βιοχημική μετατροπή να μετατραπεί σε στερεό υγρό ή αέριο καύσιμο που χρησιμεύει για την παραγωγή θερμότητας ή ως καύσιμο κίνησης.

Θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας παρόλο που περιέχει ενέργεια σε χημική μορφή όπως και τα συμβατικά καύσιμα καθώς ο χρόνος αποκατάστασης της είναι απειροελάχιστος σε σχέση με αυτό των ορυκτών καυσίμων.

Είναι επίσης ήπια μορφή καθώς δεν περιέχει καθόλου θείο ενώ το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται από την καύση τους ,επαναδεσμεύεται από τα φυτά.

Από την άλλη ασφαλώς το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοκαυσίμων είναι σαφώς φτωχότερο από αυτό των συμβατικών.

Στον οικιακό τομέα η κύρια χρήση της βιομάζας είναι η καύση για τη θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερου χρήσης.

Σχ.1.6 **Συσσωματώματα που προκύπτουν από τη μηχανική συμπίεση πριονιδίου**
(πηγή : http://energypoint.gr)

Σχ1.7**. Ενεργειακή καλλιέργεια ελαιοκράμβης**
(πηγή : http://energypoint.gr)

Δεν θα πρέπει ωστόσο να παραλείψουμε ότι τον τελευταίο καιρό πληθαίνουν οι ανησυχίες για την ενδεχόμενη επίπτωση των ενεργειακών καλλιεργειών στην αποψίλωση των δασικών εκτάσεων και στην αύξηση της τιμής των τροφίμων αφού πολλοί καλλιεργητές στρέφονται σε αυτές(ηλίανθος,ελαιοκράμβη) εγκαταλείποντας τις παραδοσιακές καλλιέργειες.

1.3.4 Γεωθερμια

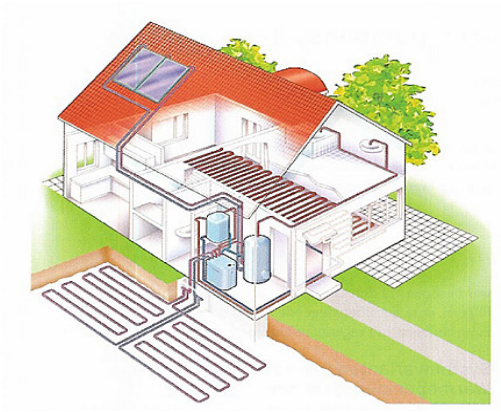
Η θερμοκρασία του εδάφους σε μερικά μέτρα βαθος παραμένει πρακτικά σταθερή (15-17 ^{o}C) , ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες.

Κοντά στην επιφάνεια της γης η γεωθερμική βαθμίδα έχει μέση τιμή περίπου 300 °C/ k m, ωστόσο υπάρχουν περιοχές που ονομάζονται γεωθερμικά πεδία όπου η γεωθερμική βαθμίδα ξεπερνά κατά πολύ τον μέσο όρο .

Τέτοιες περιοχές στην Ελλάδα είναι τα ηφαιστειακά νησιά του Αιγαίου και περιοχές στη Μακεδονία.

Με τη χρήση λοιπόν των λεγομενων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας,που είναι συνδυασμός σωλήνων βυθισμένων στο έδαφος(εναλλάκτες) και αντλίας,μπορουμε να πετυχουμε αποδοτικη θέρμανση και ψύξη του κτιρίου με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.

Οι γεωθερμικές αντλίες καταναλώνουν μόνο το 25-30% της ισχύος που αποδίδουνκαι συμβάλλουν έτσι στην εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχ.1.8 **Οικία με εγκατεστημένο οριζόντιο σύστημα γεωθερμικής αντλίας.**
(πηγή : περιοδικό energy point)

Σχ1.9**. Εκτεταμένα έργα για την τοποθέτηση γεωθερμικής αντλίας (Αγγλία)**
(πηγή : περιοδικό energy point)

1.3.5 Μικρά υδροηλεκτρικά έργα

Η υδραυλική ενέργεια δηλαδή η ενέργεια των υδατοπτώσεων είναι μια ανανεώσιμη και φιλική προς το περιάλλον πηγή ενέργειας που ο άνθρωπος άρχισε να αξιοποιεί από την αρχαιότητα με υδραυλικούς τροχούς,νερόμυλους και άλλους μηχανισμούς που παρήγαν μηχανικό έργο.

Σήμερα η υδραυλική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε πολλά μικρά υδροηλεκτρικά έργα στην Ελλάδα. Τα ΜΥΗΕ έχουν ως θετικά τις μηδενικές εκπομπές ρύπων και τις περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ταυτόχρονη ικανοποίηση και άλλων αναγκών χρήσης νερού (ύδρευσης, άρδευσης, κλπ)

Επίσης χαρακτηρίζονται για τον πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης τους(90%) και τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους(>100 έτη)

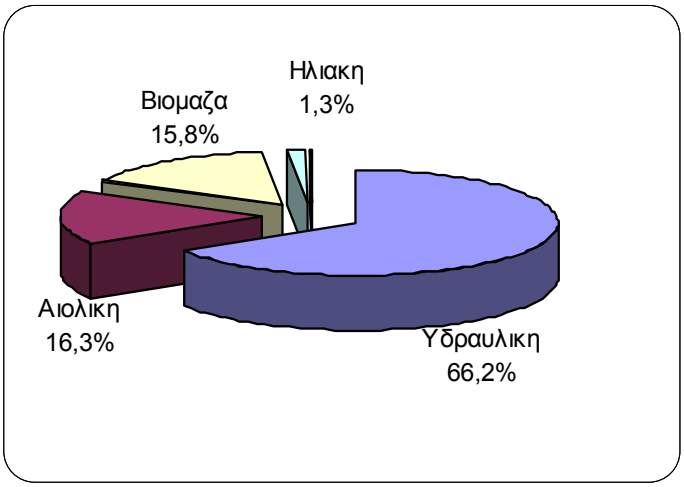
Σχ.1.10 **Μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός με ταμιευτήρα**
(πηγή : www.ppcr.g r)

1.3.6 Μελλοντικές προοπτικές των ΑΠΕ στη Ελλάδα και την Ευρώπη

Σύμφωνα με την οδηγία 2001/77/ΕΚ, όλα τα κράτη μέλη θέσπισαν εθνικούς στόχους όσον αφορά την κατανάλωση **ηλεκτρισμού** που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Εάν όλα τα κράτη μέλη επιτύχουν τους εθνικούς τους στόχους, το 2010 θα παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ποσοστό 21% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ.

Αν και ορισμένα κράτη μέλη πλησιάζουν στην επίτευξη του στόχου αυτού, αποδεικνύεται ότι η πλειονότητα των κρατών έχει καθυστερήσει και ο στόχος του 19% δεν θα επιτευχθεί μέχρι το 2010 για την ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χρειάζονται λοιπόν πρόσθετες προσπάθειες.



Σχ.1.11 Ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρισμού ανά είδος ΑΠΕ (2005 Ε.Ε)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Ο ήλιος ειναι ενα αστέρι σαν όλα τα άλλα που βλέπουμε κάθε βράδυ στον ουρανό, ένα απο τα δισκατομμύρια που υπάρχουν στον γαλαξια μας. Η κρισιμη διαφορά είναι ασφαλώς η απόσταση,καθώς ο ήλιος που βρισκεται σε μια απόσταση μόλις 8 1/2 λεπτών φωτός από τη γη,αποτελεί το κέντρο του ηλιακού μας συστήματος και είναι η γιγαντιαία βαρύτητα του που κρατά τη γη μας και τους γειτονικούς πλανήτες στις τροχιές τους.

Το φως του ήλιου και η θερμότητα που εκπέμπει ευνόησαν την αναπτυξη των ζωντανών οργανισμών στον πλανήτη μας . Το ηλιακό φως είναι απαραίτητο στα φυτά για να φωτοσυνθέσουν και η θερμότητα που αυτό μεταφέρει αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα ισορροπίας της θερμοκρασίας του πλανήτη. Επιπλέον η ανομοιόμορφη θέρμανση της γης απο τον ήλιο είναι η γεννεσιουργός αιτία των περισσότερων κλιματικών φαινομένων.

Είναι γεγονός λοιπόν οτι δίχως ένα αστέρι με τις προδιαγραφές του ήλιου στην άμεση γειτονία μας δεν θα υπήρχε ζωή στον πλανήτη μας , τουλάχιστο με την μορφή που την γνωρίζουμε .

Πριν όμως εστιάσουμε στους τρόπους αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας για την λύση του ενεργειακού προβλήματος της ανθρωπότητας , αξίζει να παραθέσουμε με συντομία κάποια από τα στοιχεία που γνωρίζουμε για τον ήλιο.

Ο ήλιος είναι λαμπρότερος απο το 85% των αστέρων του γαλαξία μας , και η μέση απόσταση του απο τη γη είνα περίπου 150.000.000 km (1 AU).

Πρόκειται για μιά μεγαλη συγκέντρωση στοιχείων σε αέρια μορφη , κυριως υδρογόνου και ηλίου. Πρόκειται για τόσο μεγάλες ποσότητες που πιστεύεται ότι αποτελούν περίπου το 99,8% της συνολικής μάζας του ηλιακού μας συστήματος.

Η ενέργεια του προέρχεται κατά 90% από την θερμοπυρηνική αντίδραση σύντηξης του υδρογόνου σε ήλιο που πραγματοποιειται στον πυρήνα του και μόλις κατά 10% από άλλες αντιδράσεις

Κατά τη σύντηξη δύο πυρήνων υδρογόνου (πρωτονίων) παράγεται δευτέριο, και ακολουθεί ένωση του δευτερίου με έναν ακόμα πυρήνα υδρογόνου για να δώσει ήλιο-3.. Το ήλιο-3 μετατρέπεται τότε σε ένα σταθερό πυρήνα ηλίου-4 μέσα από διάφορες διαδικασίες. Το ήλιο-4 είναι πολύ σταθερό και γενικά αποτελεί το τέλος της αλυσίδας.

Λόγω λοιπόν της διαφοράς μάζας ανάμεσα στα αντιδρώντα στοιχεία και το παραγόμενο ήλιο εκλύονται νετρίνα και φωτόνια και αυτά αποτελούν τον λεγόμενο ηλιακό άνεμο.

Αυτή η αντίδραση πιστεύεται πως συμβαίνει τουλάχιστο τα τελευταια 4.5 δισεκατομμυρια χρόνια και θα συνεχιστει για πάρα πολλά ακόμα καθως ο ήλιος βρίσκεται στη μέση περίπου του κύκλου ζωής του.

Πίνακας 2.1: Η Σύνθεση της φωτόσφαιρας κατά μάζα

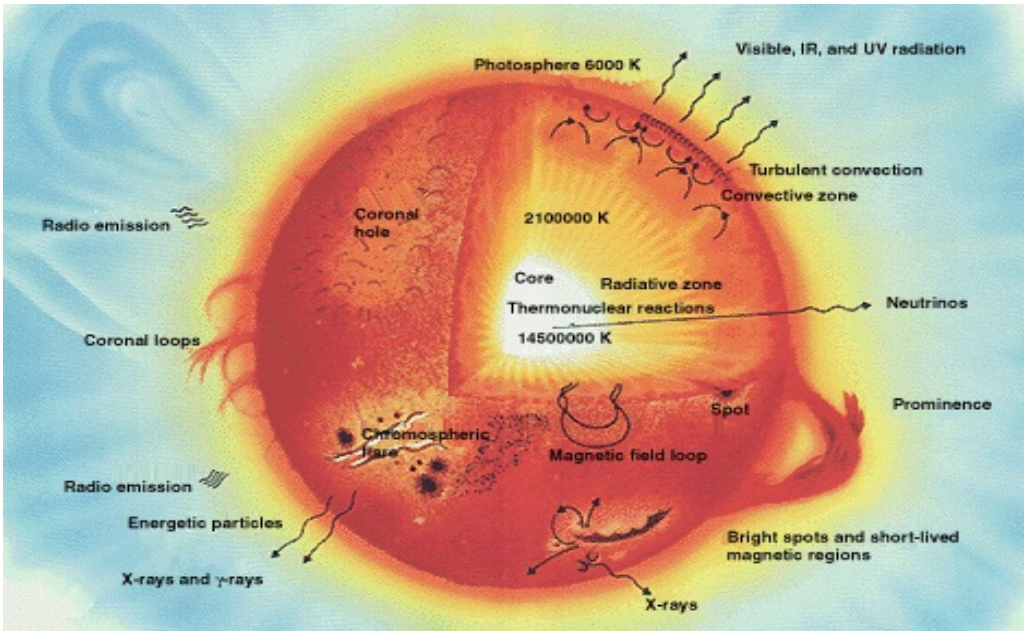
H_2	He	O_2	C	Fe	S	Ne	N	Si	Mg
73,46%	24,85%	0,77%	0,29%	0,16%	0,12%	0,12%	0,10%	0,06%	0,05%

(Πηγη: www.Wikipedia.com)

2.2 Η δομή του ήλιου

Ο ήλιος είναι ουσιαστικά πλάσμα χωρίς αυστηρή δομή .

Στο παρακάτω σχήμα βλέπυμε τις πιο χαρακτηριστικές περιοχές του ήλιου και τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε αυτές.



Σχ. 2.1 Τα τμήματα του ηλίου (πηγή : imagine.gsfc.nasa.gov)

Πυρήνας. : Βρίσκεται στο κέντρο και εκτείνεται σε διάμετρο ίση με το 25% της συνολικής. Πρόκειται για το για το πιό καυτό τμήμα καθώς εδώ οι θερμοκρασίες φτάνουν τα 15.000.000 ^{o}C και οι πιέσεις είναι τέτοιες ώστε να προκαλούν τη σύντηξη των πυρήνων του υδρογόνου.Υπολογίζεται πως κάθε δευτερόλεπτο καταναλώνονται 3,4 x 10^{38} πρωτόνια υδρογόνου για να μετατραπούν σε ήλιο.

Ζώνη ακτινοβολίας : Καταλαμβάνει το 55% της ακτίνας του ήλιου.Σε αυτή τη ζώνη η ενέργεια απο τον πυρήνα μεταφέρεται προς τα έξω απο τα φωτόνια. Δεν υπάρχει μεταφορά με συναγωγή όμως λαμβάνουν χώρα διαδοχικές απορροφήσεις και επανεκπομπές μέχρι ένα φωτόνιο που γεννήθηκε στον πυρήνα να περάσει από τη ζώνη ακτινοβολίας.

Ζώνη συναγωγής : Εδώ υπάρχει σχετικά ψυχρό και αραιό αέριο και κυριαρχεί η μεταφορά ενέργειας με συναγωγή.Θερμά ρεύματα ανέρχονται και ψυχρά βυθίζονται με αποτέλεσμα τα μόρια του αερίου που έχουν απορροφήσει στο μεταξύ πρωτόνια, να τα μεταφέρουν τελικά στην επιφάνεια. Τελικά ένα φωτόνιο χρειάζεται χρόνο ίσο με **10.000-200.000 ετών** για να απελευθερωθεί στην επιφάνεια !!

Εκτός ομως από τις τρεις αυτές περιοχές υπάρχουν άλλες τρεις που αποτελούν κατά κάποιο τρόπο την ατμόσφαιρα της ηλιακής σφαίρας αν και δεν μοιάζει καθόλου με τη δική μας ατμόσφαιρα

Φωτόσφαιρα. : Η φωτόσφαιρα είναι η χαμηλότερη περιοχή της ηλιακής ατμόσφαιρας και έχει πάχος δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Είναι η περιοχή του ήλιου που ειναι ορατή στο ανθρώπινο μάτι. Η θερμοκρασία της είναι περίπου 5800 K αν και μειώνεται καθώς το ύψος απο την επιφάνεια.

Χρωμόσφαιρα : Η θερμοκρασία αυξάνει απο 4.500 K σε 10.000 K

Κορώνα : Είναι το ανώτερο στρώμα της ηλιακής ατμόσφαιρας και εκτείνεται εκατομμύρια χιλιόμετρα προς τα έξω. Μπορούμε να την δούμε καλύτερα κατά τη διάρκεια των εκλείψεων και σε φωτογραφίες ακτίνων Χ. Η θερμοκρασία της είναι περίπου 5.000.000 Κ γεγονός που ακόμα και σήμερα αποτελεί πεδίο εικασιών.

Πίνακας 2.2 : Χαρακτηριστικά μεγέθη του ηλίου

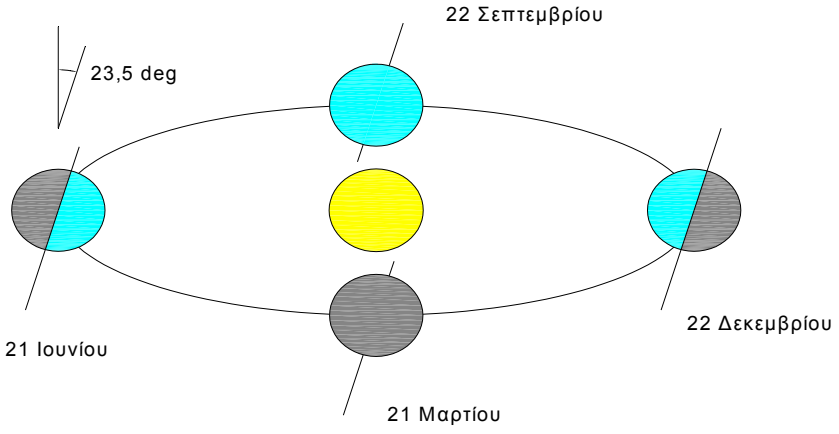
Μέση αποσταση	$1,5 \cdot 10^8 \ km$
Ακτίνα	$696.000 \ km$
Μάζα	$2 \times 10^{30} \ km$
Θερμοκρασία	**Πυρήνας** : $1,5 \cdot 10^7 \ kg$ **Επιφάνεια** : $5800 \ K$
Μέση πυκνότητα	$1,4 \ gr / cm^3$
Περίοδος περιστροφης	**25-35 ημερες(κεντρο-πολοι)**
Τροχιακή ταχύτητα	$200 \ km / \sec$
Τροχιακή περίοδος	$2 \cdot 10^8 \ \acute{\varepsilon}\tau\eta$

(πηγή :www.Wikipedia.com)

Ο πλανήτης μας περιστρέφεται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο και ο άξονας περιστροφής του εμφανίζει μια κλίση 23,5 ^{o} ως προς το επίπεδο περιστροφής του.

Σε αυτήν οφείλονται οι εποχές του χρόνου ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζουν οι ηλιακές ακτίνες με την κατακόρυφο του κάθε τόπου.

Για εναν τοπο που βρισκεται στο βόρειο ημισφαίριο η γωνία αυτή είναι ελάχιστη κατά το θερινό ηλιοστάσιο(21 Ιουνίου) και μέγιστη κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (22 Δεκεμβρίου)

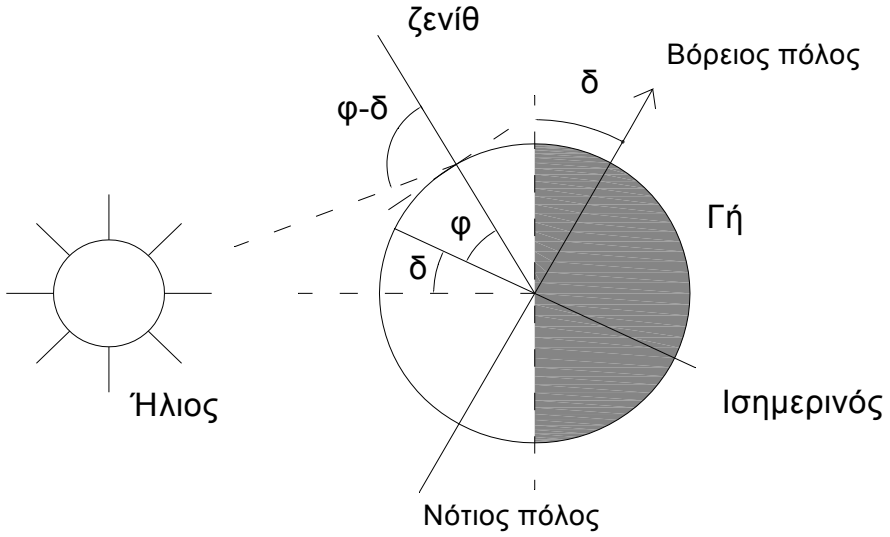


Σχ. 2.2 Η τροχιά της γης γύρω απο τον ήλιο

2.3 Βασικές γωνίες

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τόσο το γεωγραφικό πλάτος φ ενός τόπου , όσο και η ηλιακή απόκλιση δ.

Η κατακόρυφος ενός τόπου σχηματίζει με τις ηλιακές ακτίνες γωνία φ-δ.

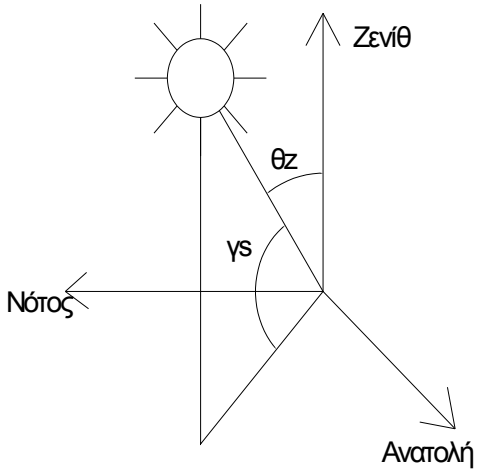


Σχ. 2.3 Οι γωνίες του γεωγρ. πλάτους και της ηλιακής απόκλισης

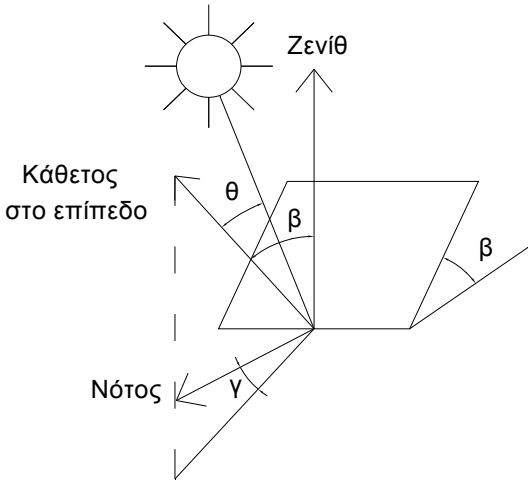
Πρέπει να σημειωθεί πως θεωρήσαμε ότι ο ήλιος βρίσκεται στο ανώτερο σημείο του όπως φαίνεται από το υπόψη σημείο,στο επίπεδο δηλαδή του μεσημβρινού του τόπου(ηλιακό μεσημέρι).

Όταν ο ήλιος βρίσκεται σε κάποια θέση στον ουράνιο θόλο η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του με την κατακόρυφο του τόπου ονομάζεται ζενίθ και συμβολίζεται με θ_z ενώ η συμπληρωματική της γ_s ονομάζεται ηλιακό ύψος(σχ.2.4).

Στο σχήμα 2.5 διακρίνονται οι βασικές γωνίες που σχηματίζει ο ήλιος με κεκλιμένο επίπεδο.



Σχ.2.4 Γωνίες ήλιου-οριζοντίου επιπέδου



Σχ.2.5 Γωνίες ήλιου- κεκλιμένου επιπέδου

2.3.1 Υπολογισμός βασικών γωνιών

Σε αυτή τη σύντομη παράγραφο παρτίθενται οι εξισώσεις υπολογισμού των βασικών γωγνιών. Υπολογισμός αυτων των γωνιών για την περιοχή της Αττικής και για όλη τη διάρκεια του έτους γίνεται σε σχετικό κεφάλαιο του Β υπολογιστικού τμήματος ως μέρος των υπολογισμών της ολικής ακτινοβολίας του τυπικού έτους.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}) \qquad \textbf{(2.1)}$$

όπου **n** είναι η ημέρα του έτους

$$\cos\theta_n = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \qquad \textbf{(2.2)}$$

όπου :

$\omega = 0,25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι})$, είναι η ωριαία γωνία

Στην περίπτωση της κεκλιμένης επιφάνειας η γωνία θ υπολογίζεται:

$$\cos\theta_T = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\beta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\alpha \cdot \sin\omega \cdot \sin\beta \qquad \textbf{(2.3)}$$

2.4 Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας

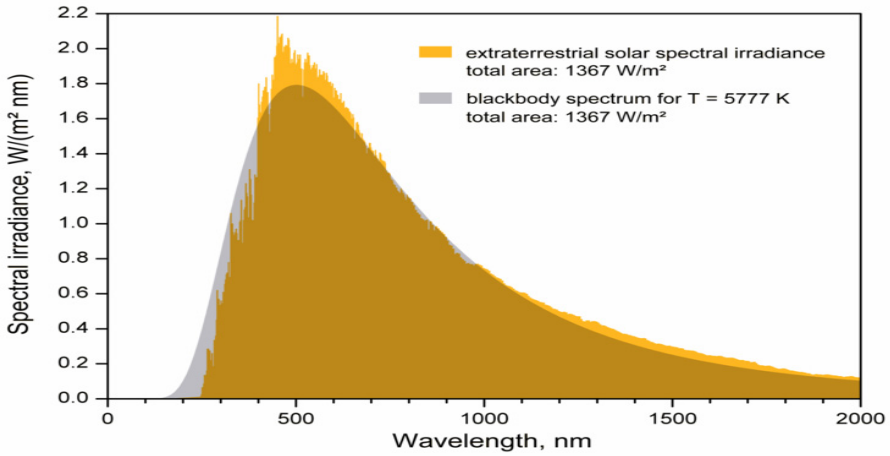
Η ηλιακή σταθερά είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, ανά τετραγωνικό μέτρο επιπέδου καθέτου στις ηλιακές ακτίνες που βρίσκεται στο εξωτερικό όριο της γήινης ατμόσφαιρας.

Συμβολίζεται με **G_{sc}** και η μέση τιμή της κατά τη διάρκεια του έτους, σύμφωνα με μετρήσεις δορυφόρων είναι περίπου :

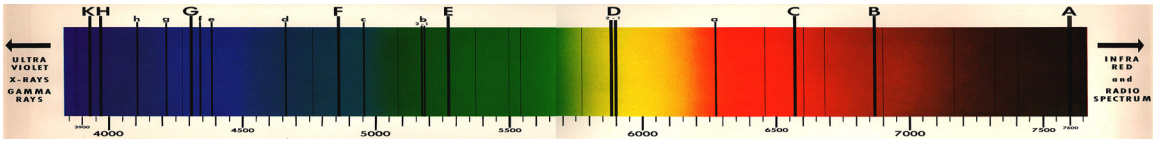
$$G_{sc} = 1366 \ W/m^2 \qquad \textbf{(2.4)}$$

Παρουσιάζει μια ετήσια διακύμανση της τάξης του 6,9% λόγω της ελλειπτικότητας της τροχιάς της γης .

Η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας αυτής φαίνεται προσεγγίζει αυτή ενός μέλανος σώματος που εκπέμπει σε θερμοκρασία 5700-5800 K όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχ. 2.6 Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτνοβολίας(πηγή :www.answers.com)



Σχ.2.7 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και οι γραμμες απορρόφησης διαφόρων στοιχείων του ηλίου(πηγη:www.coseti.org)

Για να υπολογίσουμε την ισχύ **οριζοντίου** επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας (αλλά πλησιόν αυτής) που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος φ , αρκεί να υπολογίσουμε τη γωνία θ_n της εξίσωσης (2.2) , οπότε θα είναι :

$$G_n = G_{sc} \cdot \cos\theta_n \qquad \textbf{(2.5)}$$

ενώ για κεκλιμένη επιφάνεια που βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο (φ>0) και έχει κλίση β ως προς τον ορίζοντα και γ ως προς τον νότο χρησιμοποιούμε τη σχέση (2.2) :

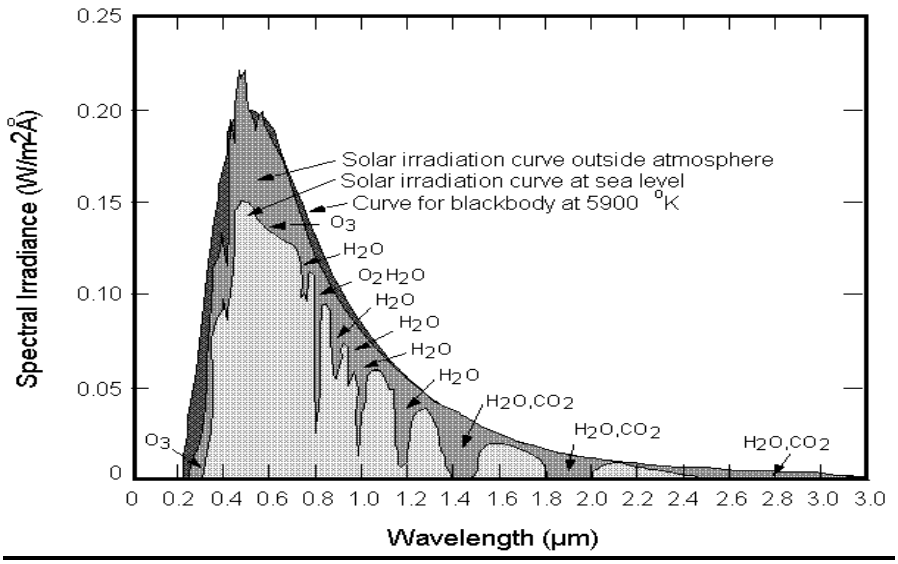
$$G_T = G_{sc} \cdot \cos\theta_T \qquad \textbf{(2.6)}$$

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας καλύπτει όλα τα μήκη κύματος από το υπεριώδες μέχρι το υπέρυθρο (σχ. 2.7) και ένα σημαντικό τμήμα της (~48%) εκπέμπεται στο όρατο τμήμα (0,4-0,8 μm)

2.5 Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα τη ηλιακής ακτινοβολίας υφίσταται μεταβολή κατά τη διέλευση των ακτίνων δια μέσου της ατμόσφαιρας λόγω των φαινομένων της σκέδασης του από τα μόρια του αέρα και της απορρόφησης του απο αυτά.

Η σκέδαση συμβαίνει κυρίως στα μικρότερα μήκη κύματος και έτσι διακαιολογείται το γαλάζιο χρώμα του ουρανού. Η απορρόφση γίνεται απο συγκεκριμένα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας όπως το όζον(O3) ,το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρατμοί. Αυτά απορροφούν σε συγκεκριμένες ζώνες του φάσματος(εκλεκτική απορρόφηση) όπως δείχνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχ.2.8 Ηλιακά φάσματα AM0 και AM1.5 (πηγη :irina.eas.gatech.edu)

Είναι σημαντικό να τονισθεί σε αυτό το σημείο οτι η ένταση της ακτινοβολίας που φθάνει τελικά στη γή είναι άμεση συνάρτηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας και του μήκους της διαδρομής της ακτίνας μέσα σε αυτή.

Όσον αφορά τον πρώτο παράγοντα , θα θεωρούμε προς το παρόν πως η ατμόσφαιρα είναι διαυγής(χωρίς νεφώσεις).

Ο δεύτερος παράγοντας μπορεί να ληφθεί υπόψη κάνοντας αναφορα στον λόγο αέριας μάζας (Air mass ratio ή AM) για τον όποιο έχουν ληφθεί οι μετρήσεις.

Ο λόγος αυτός είναι το πηλίκο της διαδρομής που διανύει μια ακτινα μέσα στην ατμόσφιαρα πρός το πάχος της ατμόσφαιρας.

Έτσι όταν ο ήλιος σχηματίζει μια γωνια θ με την κατακόρυφο του τόπου τοτε ο λόγος AM είναι περίπου ίσος με :

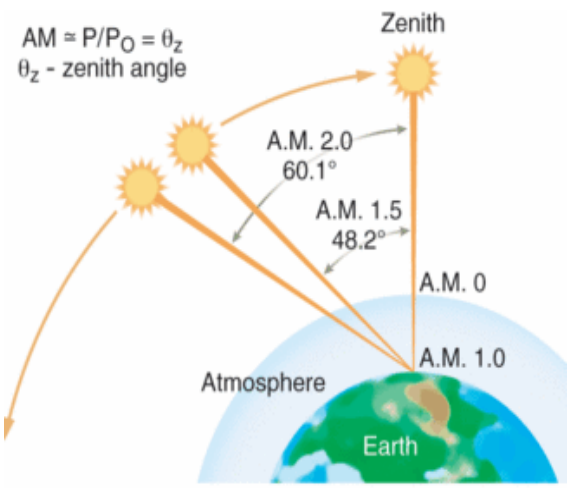
$$AM=1/\cos\theta \qquad \textbf{(2.7)}$$

Η σχέση αυτη δεν ισχύει για πολύ μεγάλες γωνίες. Τα πιο συνηθισμένα φάσματα είνα τα **AM0** (φάσμα εκτός ατμόσφαιρας),**AM1**(με τον ήλιο στο ζενίθ), **AM1.5**(θ=48,2°) και **AM2** (θ=60,1°).

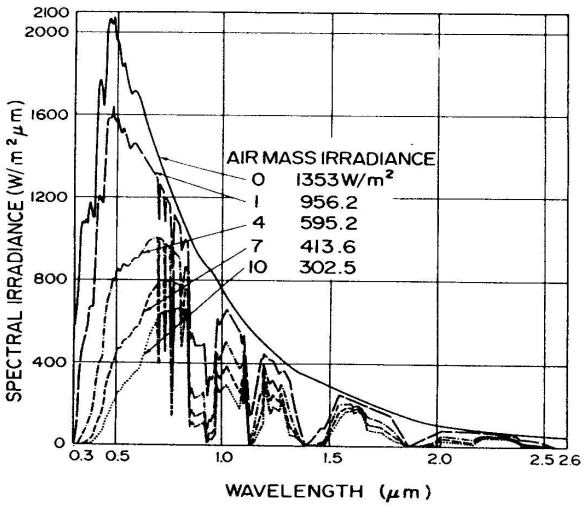
Στο σχήμα 2.10 βλέπουμε πως επηρρεάζει ο παράγων AM το φάμα της ακτινοβολίας που φτάνει τελικά στην επιφάνεια.

Για αύξουσες τιμές του AM η συνολική ισχύς μειώνεται καθώς μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας σκεδάζεται, ενώ οι περιοχές απορρόφησης μένουν πρακτικά ανεπηρρέαστες.

Ένα μέρος της ακτινοβολίας που σκεδάζεται φθάνει στην επιφάνεια της γης ως διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation)



Σχ.2.9 **Σχηματική παράσταση του AM**



Σχ.2.10 **Ηλιακά φάσματα AM0- AM10**
(Πηγη : www.powerfromthesun.net)

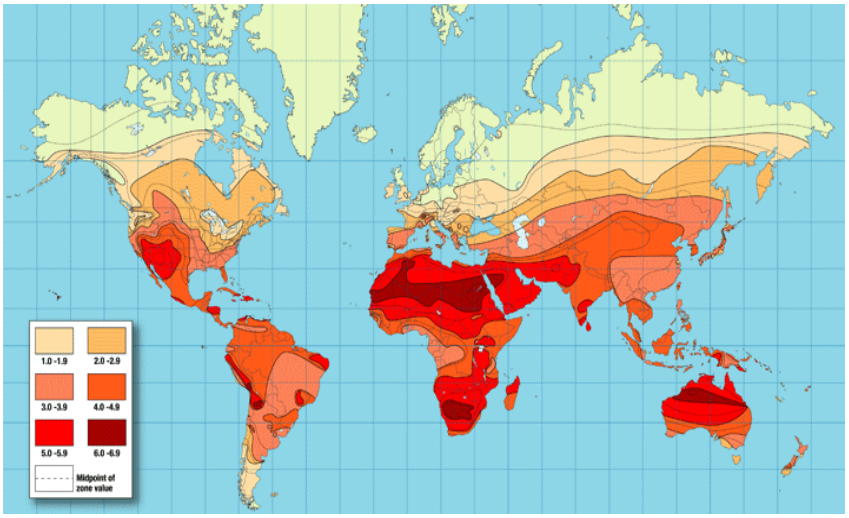
2.6 Ηλιακό δυναμικό

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στο ποσό της ηλιακης ενέργεια που προσπίπτει σε κάθε τόπο και που είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη .

Προφανώς η ισχύς της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη όσο πλησιάζουμε προς τον ισημερινό όπου οι ακτίνες του ήλιου πεφτουν ύπο μικρή γωνία καθόλη τη διάρκεια του έτους, ενω μεώνεται όταν κινούμαστε προς τους πόλους.

Το ηλιακό δυναμικό εξαρτάται επίσης από τις κλιματλογικές συνθήκες και το υψόμετρο του τόπου.

Στον ακόλουθο χάρτη βλέπουμε τις διάφορες ζώνες ηλιακού δυναμικού της γης, όπου το έντονο χρώμα αντιστοιχεί σε υψηλά ποσά ολικής ετήσιας ακτινοβολίας



Σχ. 2.11 **Κατανομή ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας παγκοσμίως**
(Πηγή : www.oksolar.com)

Η Ελλάδα, χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια, προσφέρεται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Η μέση ημερήσια ενέργεια που δίνεται από τον ήλιο στην Ελλάδα είναι 4,6 KWh/m².

Η επιφάνεια των εγκαταστημένων συλλεκτών στη χώρα μας ανέρχεται περίπου σε 2.000.000 m². Η τιμή αυτή αποτελεί ποσοστό 50% περίπου, της επιφάνειας συλλεκτών εγκατεστημένων σε ολόκληρη την Ευρώπη. Οι συλλέκτες αυτοί, κύρια αφορούν σε μικρά οικιακά συστήματα

Σχ. 2.12 **Μέση ημερίσια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα σε KWh/m²** (Πηγη: www.xlogic.gr)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΥΤΤΤΑΡΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Τα ΦΒ κύτταρα είναι η βασική μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε καθε ΦΒ σύστημα.Κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά και έχουν πολλά κοινά με τις συσκευές στερεάς κατάστασης όπως οι δίοδοι,τα transistors και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Για πρακτικές εφαρμογές τα φβ στοιχεία συνδέονται σε πάνελ , τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται σε συστοιχίες προκειμένου να αυξηθεί η εκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς..

Πολλά είδη φβ στοιχείων είναι σήμερα διαθέσιμα στην αγορά και πολλές ακόμη τεχνολογίες που θα δούμε στο εγγύς μέλλον είναι υπό εξέλιξη.

Η ποικιλλία αυτή οφείλεται στα διαφορετικά υλικά κατασκευής , τις διαφορετικές διατάξεις και την πρόοδο που γίνεται στις μεθόδους κατασκευής τους προκειμένου να μειωθεί το κόστος παραγωγής τους και ταυτόχρονα να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσής τους.

Συσκευές με βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του 30%, έχουν κατασκευαστεί στα εργαστήρια ωστόσο η απόδοση των στοιχείων που συναντάμαι στις εμπορικές εφαρμογές είναι αρκετά χαμηλότερη.

Τα Φβ στοιχεία από κρυσταλλικό πυρίτιο(Si) κυριαρχούν εδω και πολλά χρόνια και κατέχουν το σημαντικότερο τμήμα της αγοράς. Η τεχνολογία τους και οι μέθοδοι κατασκευής τους έχουν φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα ωριμότητας και πλέον κατασκευαζονται και από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αντι για μονοκρυστάλλικο(εννιαίο και χωρίς ατέλειες κρυσταλλικό πλέγμα) που ειναι και πιο σπάνιο και δύσκολο να κατασκευαστεί εργαστηριακά .

Τα πάνελ απο στοιχεία πυριτίου έχουν επικρατήσει , έχουν μια διάρκεια ζωής της τάξης των 25 ετών και η μέχρι τωρα μέγιστη απόδοση τους αγγίζει το 18%.

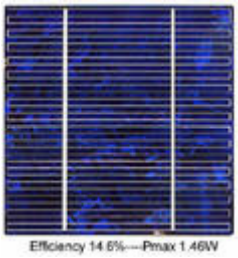
Μια αλλη τεχνολογία που κερδίζει συνεχώς έδαφος ει ναι τα φθηνοτερα (αλλά και λιγότερο αποδοτικά) στοιχεία απο άμορφο πυρίτιο (a-Si), που κατασκευάζονται με τη μορφή λεπτών μεμβρανών (thin films). Αρχικά χρησιμοποιούνταν για να τροφοδοτήσουν μικρές συσκευές όπως ρολόγια χειρός και υπολογιστές τσέπης αλλα πλεόν κατασκευαζονται και μεγάλες επιφάνειες που καλύπτονται από τέτοια στοιχεία .

Τα τελευταία χρόνια έκαναν την εμφανιση τους μια σειρά από σύνθετα ημιαγωγά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευη φβ λεπτής μεμβράνης.

Τέτοια είναι το cadmium telluride το copper indium diselinide κ.α και υπόσχονται χαμηλή τιμή και υψηλές αποδόσεις.

Μια σειρά από υψηλής απόδοσης φβ στοιχεία από μονοκρυσταλλικόπυρίτιο ή συνθετα υλικά σαν το GaAs , προορίζονται για ειδικες εφαρμογές ,όπως για τη τροφοδοσία δορυφόρων ή συστηματων που λειτουργούν υπό συγκεντρωμένο ηλιακό φώς.

Τα Φβ υλικά τέλος δεν περιορίζονται στους ημιαγωγους. Έχουν κατασκαυαστεί και φβ κύτταρα απο οργανικά μόρια με αξιοπρεπή βαθμό απόδοσης.



(α) **(β)** **(γ)**

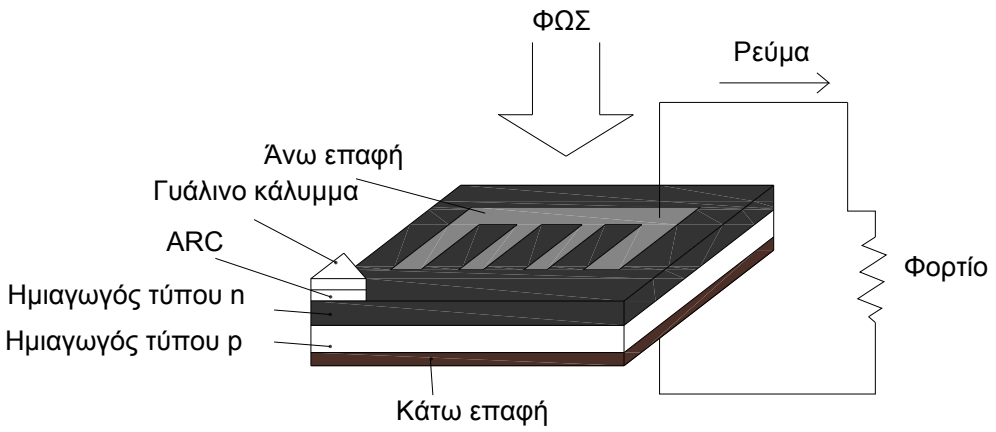
Σχ.3.1 Στοιχεία από (α) μονοκρυσταλλικό,(β) πολυκρυσταλλικό, (γ) άμορφο πυρίτιο

3.2 Αρχές λειτουργίας των φβ στοιχείων

Τα ΦΒ κύτταρα είναι μια τεχνολογία που στηρίχτηκε σε δύο απο τους κορυφαίους κλάδους της επιστήμης και της τεχνολογίας του 20^{ου} αιώνα : την κβανομηχανική και την μικροηλεκτρονική.

Παρά τις πολύπλοκες θεωρίες που εξηγούν την λειτουργία τους και αφορούν την αλληλεπίδραση μάζας και ενέργειας σε ατομική κλίμακα , η βασική τους ιδιότητα είναι ότι μετατρέπουν την ακτινβολία που προσπίπτει πάνω τους σε ηλεκτρικό ρεύμα.που διαρρέει το φορτίο στο οποίο είναι συνδεδεμένα.

Η μελέτη των ιδιοτήτων των ημιαγωγών μας έδωσε την δυνατότητα να τους αξιοποιήσουμε στη φωτοβολταική μετατροπή , καθως έχουν την ιδότητα να σχηματίζουν διόδους , γεγονός απαραίτητο για τη λειτουργία του φβ στοιχείου.



Σχ.3.2 Σχηματικό παράδειγμα λειτουργίας απλού φβ στοιχείου

Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε ακροθιγώς το φαινόμενο της φβ μετατροπής και τη θεωρία που υπάρχει για την επίδραση των ενεργών φωτονίων στην κρυσταλλική δομή των ημιαγωγών υλικών, πάντα από τη σκοπιά του μηχανικού και χωρις να υπεισέλθουμε σε λεπτομέρειες που αφορούν αυστηρά την φυσική επιστήμη.

Εφόσον η λειτουργία των φβ στοιχείων βασίζεται στον σχηματισμό δίοδου μεταξύ δυο ημιαγωγών υλικών , κρίνεται σκόπιμο για λόγους πληρότητας πριν την εισαγωγή στη λειτουργία των φβ κυττάρων να γίνει μια σύντομη περιγραφή της δομής της ύλης των ημιαγωγών υλικών και της διόδου p-n που αποτελεί τη βάση της κατασκευής των πιο διαδεδομένων εμπορικά φβ στοιχείων, αυτών του πυριτίου(Si).

3.2.1 Αγωγοί , μονωτές και ημιαγωγοί.

Τα στερεά υλικά ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα κατατάσσονται σε αγωγούς , μονωτές και ημιαγωγούς .

Η διαφορά τους έγκειται στο πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων δηλαδή αυτών που μπορούν να επιταχυνθούν υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Οι αγωγοί έχουν άφθονα τέτοια ηλεκτρόνια, οι ημιαγωγοί (στις συνηθισμένες θερμοκρασίες) πολύ λίγα και οι μονωτές πρακτικά καθολου.

Σύμφωνα με τη κβαντική θεωρία οι επιτρεπόμενες ενέργειες των ηλεκτρονίων μεσα σε έναν κρύσταλλο είναι περιορισμένες σε φάσματα . Αυτά χωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά διάκενα (bandgaps).

Στους αγωγούς το φάσμα των επιτρεπόμενων ενεργειών των ηλεκτρονίων σθένους (φάσμα σθένους), δεν είναι πλήρες δηλαδή τα ηλεκτρόνια μπορόούν να μετακινούνται συνεχώς μέσα στο πλέγμα καταλαμβάνοντας πάντα κάποια απο τις

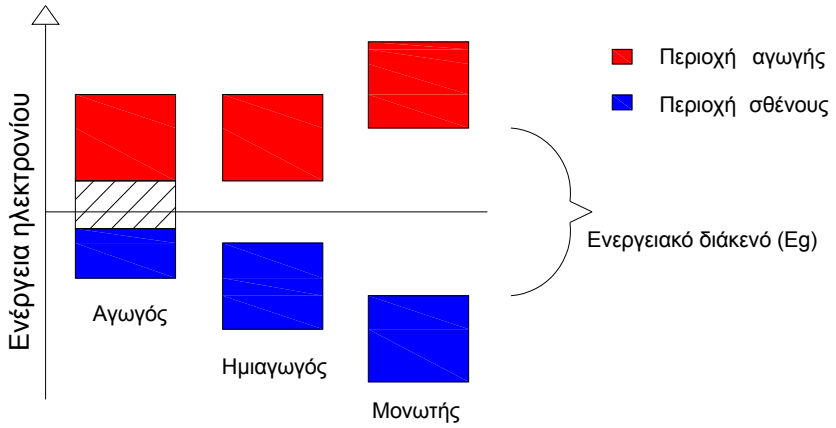
επιτρεπόμενες κενές θέσεις .Τα ηλεκτρόνια αυτά λοιπόν δεν ανήκουν αποκλειστικά σε κάποιο άτομο και ευκολα κινητοποιούνται .

Αυτή η ελευθερία δεν υπάρχει στους μονωτές όπου όλες οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες του φάσματος σθένους είναι κατειλημμένες από τα ηλεκτρόνια των ατόμων. Έτσι τα ηλεκτρόνια είναι σχεδόν δεμένα στο άτομο τους.

Επιπλέον για να διεγερθούν στο επόμενο ενεργειακό φάσμα (φάσμα αγωγής) απαιτούν μεγάλη ενεργεια E_g που αντιστοιχεί στο σπάσιμο του δεσμού.Τότε μεταπηδούν στο φάσμα αγωγής και μπορούν να κινηθούν μέσα στο πλέγμα.

Κάθε φορά που σπάει ένας δεσμός δημιουργείται ένα κενό στο πλέγμα που ονομάζεται οπή (hole).

Καθώς ελευθερώνεται μία ενεργειακη στάθμη στο φάσμα σθένους κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο θα έρθει να πληρώσει την οπή αφήνοντας όμως μία πίσω του .Έτσι και τα ηλεκτρόνια της στοιβάδας σθένους αποκτούν μια σχετική άνεση να κινηθούν.



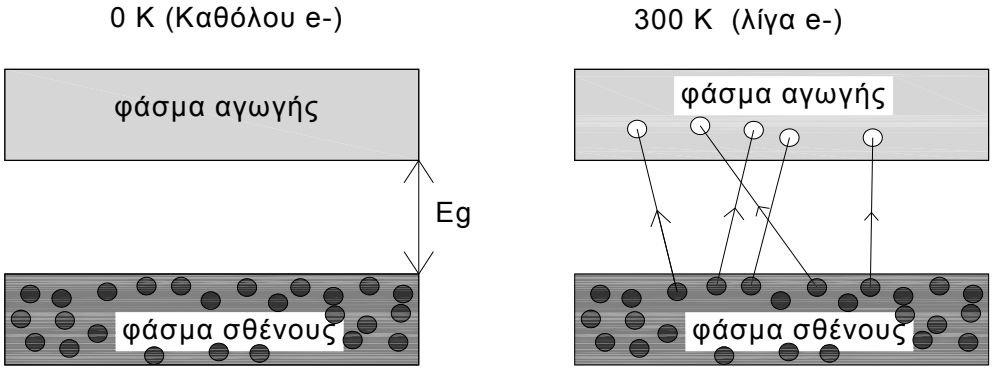
Σχ.3.3 Αναπαράσταση των ενεργειών των ηλεκτρονίων στη στερεά κατάσταση

Μιά ενδιάμεση κατάσταση συναντάμαι στα υλικά που χαρακτηρίζονται ως ημιαγωγοί.

Υλικά όπως το Πυρίτιο (Si) και το Γερμάνιο (Ge), χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευων .

Οι ημιαγωγοί στις συνηθισμένες θερμοκρασίες είναι μονωτές. Η διαφορά τους έγκειται στην τιμή της ενέργειας E_g η οποία είναι αρκετά χαμηλή. Έτσι ακόμη και με απλή θερμική διέγερση κάποια ηλεκτρονια σθένους μεταπηδούν στο φάσμα αγωγής αφήνοντας πίσω τους οπές (σχ.3.4).

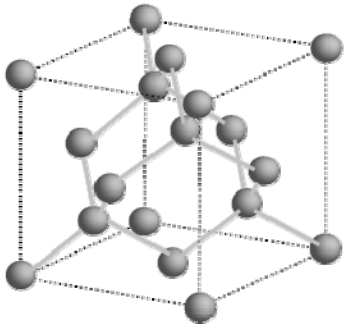
Στους καθαρούς ημιαγωγους ο αριθμός των οπών είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων n=p.



Σχ.3.4 Κατανομή ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό

Οι αρχές των ημιαγωγων επεξηγούνται καλύτερα με το παράδειγμα του πυριτίου, ενός ημιαγωγού με 4 ηλεκτρόνια σθένους . Τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν κρυσταλλικό πλέγμα όπου καθε άτομο συνδέεται με 4 γειτονικά του σε τετραεδρική δομή (FCC) ώστε να μην υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Έτσι το πυρίτιο εμφανίζει ελάχιστη ηλεκτρική αγωγιμότητα και κατατάσσεται στους μονωτές στις συνήθεις θεροκρασίες μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό $\mathbf{e^-}$ έχει ενέργεια μεγλύτερη του $\mathbf{E_c + E_g}$

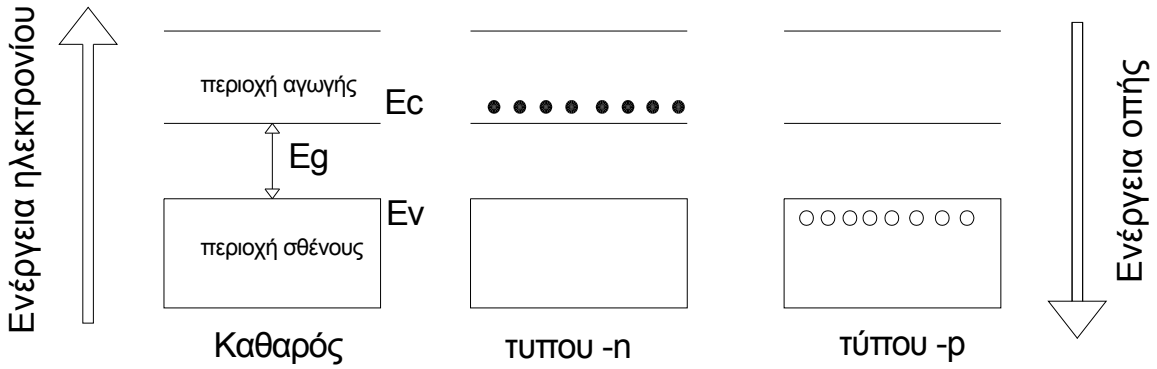


Σχ. 3.5 Το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου (FCC)

Οι φβ συσκευές πρωτοπαρουσιάστηκαν ήδη από τον 19° αιώνα πολύ πριν δηλαδή η φυσική επιστήμη εξηγήσει τον τρόπο λειτουργίας τους.

Οι μελέτες ορόσημο για το πεδίο της φυσικής που συνδέονται άμεσα με το φβ φαινόμενο αναπτύχθηκαν τον 20° αιώνα και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την μελέτη της ακτινοβολίας μέλανος σώματος,την κυματομηχανική και την κβαντομηχανική ως εργαλεία για την μελέτη του φωτός , την ανάπτυξη της θεωρίας των ημιαγωγών και τη μελέτη της διόδου p-n που οπως θα δούμε αποτελεί βασικό στοιχείο της κατασκευής ενός φβ κυττάρου αν και η ύπαρξη ημιαγωγών υλικών δεν είναι καθόλου απαραίτητη για την εξήγηση της παραγωγής ηλεκτρικής τάσης από φωτεινή πηγή.

3.2.2 Ημιαγωγοί τύπου p και n



Σχ .3.6 Οι ημιαγωγοί τύπου p και n

Όπως ήδη αναφέραμε το καθαρό πυρίτιο(intrinsic Si) διαθέτει έναν πολύ μικρό αριθμό ελευθέρων $\mathbf{e^-}$ και όπων που δημιουργούνται λόγω της θερμικής διέγερσης .

Μία απλή τεχνική για να αυξήσουμε τους φορείς ηλεκτρικού φορτίου σε έναν ημιαγωγό είναι να να διαλύσουμε στο τήγμα του πολύ μικρή ποσότητα από άτομα ενός πεντασθενούς στοιχείου όπως είναι ο φωσφορος (Ph) ή ενός τρισθενούς στοιχείου όπως είναι το Βόριο(Bo).

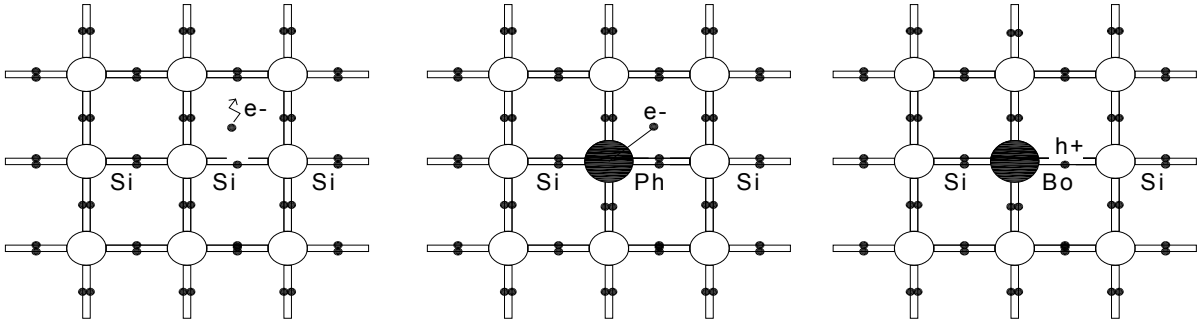
Τα άτομα του στοιχείου κραμάτωσης θα πάρουν τη θέση κάποιων ατόμων πυριτίου στο κρυσταλλικό πλέγμα σχηματίζοντας δεσμούς με τα γύρω άτομα.

Ο φώσφορος διαθέτει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο σθένους το οποίο λόγω της χαλαρής έλξης συμπεριφέρεται όπως τα ηλεκτρόνια των μετάλλων και μεταπηδά εύκολα στη στοιβάδα αγωγής(Σχ.3.7) . Τότε σχηματίζεται ένα ημιαγωγό στοιχείο τύπου n (negative) με φορείς ηλεκτρικού ρεύματος τα ηλεκτρόνια αγωγής.

Το αντίστροφο συμβαίνει με το βόριο το οποίο διαθέτει έναν ηλεκτρόνιο σθένους λιγότερο απο το πυρίτιο με αποτέλεσμα τον σχηματισμό οπής δηλαδή κενής θέσης για τα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία τότε έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα κίνησης.

Οι φορείς του ηλεκτρικού φορτίου σε αυτή την περίπτωση είναι οι όπες ή ισοδύναμα τα ηλεκτρόνια σθένους που έχουν τη δυνατότητα να μεταπηδούν στις κενές θέσεις των γειτονικών ατόμων.

Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις αυξάνονται οι φορείς ηλεκτρισμού στον ημιαγωγό και ανατρέπεται η ισορροπια στον αριθμότων οπών και των ηλεκτρονίων αφού οι μέθοδοι κραμάτωσης δεν παράγουν ζεύγη e-h.



(α) καθαρό πυρίτιο (β) πυρίτιο τύπου n (γ) πυρίτιο τύπου p

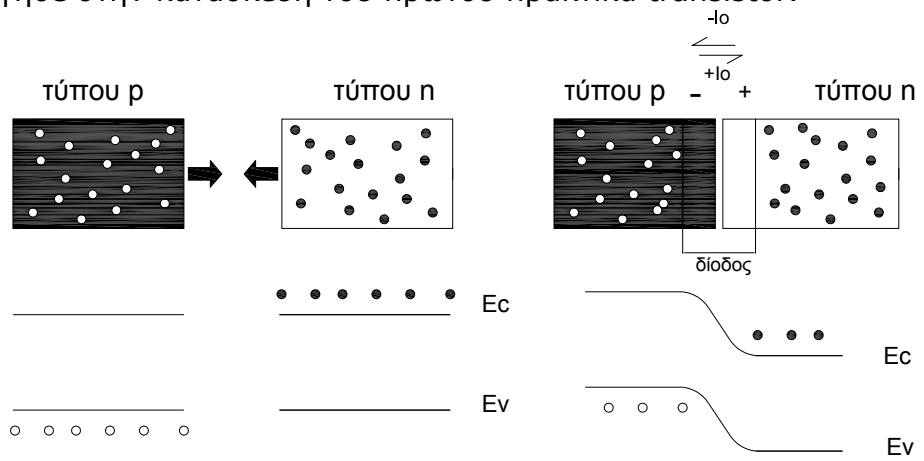
Σχ.3.7 Αναπαράσταση του κρυσταλλικού πυριτίου με και χωρίς προσμίξεις

3.2.3 Η δίοδος p-n

Το 1940 ο Rusel Ohl στα εργαστήρια της Bell κοντά στη Νεα Υόρκη, πειραματιζόταν με δείγματα πυριτίου οταν παρατήρησε την παραγωγή απροσδόκητα υψηλών ηλεκτρικών τάσεων σε καποια συγκεκριμένα δείγματα κατά το φωτισμό τους.

Περεταίρω μελέτη απέδειξε ότι οι τάσις αυτές εμφανίζονταν σε δείγματα στα οποία τυχαία είχαν σχηματιστεί ενώσεις p-n λόγω της πρόσμιξης φωσφόρου(Ph) και Βορίου(Bo) και του διαχωρισμου τους κατα την πηξη των δειγμάτων.

Η οριστική θεωρία της διόδου **p-n** διαμορφώθηκε από τον Shockley το 1949 και οδήγησε στην κατασκευή του πρώτου πρακτικά transistor.



Σχ.3.8 Αναπαράσταση του σχηματισμού ηλεκτρικού πεδίου σε ένωση p-n

Όταν ένας ημιαγωγός τύπου p έρθει σε επαφή με έναν τύπου n , τότε εκατέρωθεν της επιφάνειας επαφής συμβαίνει διάχυση ηλεκτρονίων και οπών λόγω διαφοράς συγκέντρωσης τους.

Έτσι η πλευρά **p** φορτιζεται αρνητικά και η **n** θετικά σχηματίζοντας ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που εξισορροπεί τη διάχυση φορτίων (σχ.3.8).

Τα ρεύματα ισορροπίας Io και –Io είναι της τάξης των 10^{-14} A/cm^2 δηλαδή πολύ μικρά.

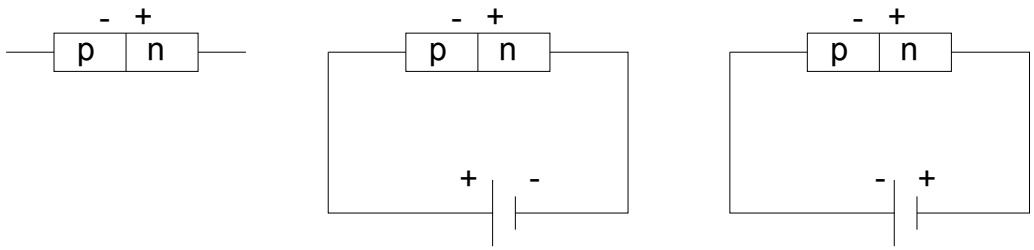
Η περιοχή διάχυσης ονομάζεται και περιοχή απογύμνωσης διότι δεν περιέχει πρακτικά ελεύθερα ηλεκτρόνια ενώ η τάση της διόδου (**Vb**) είναι όπως θα δούμε και ο σημαντικότερος λόγος που κάνει τα ημιαγωγά υλικά ιδανικά για φωτοβολταικές εφαρμογές.

3.2.4 Η πόλωση της διόδου p-n

Εξετάζεται τώρα η συμπεριφορά της διόδου κατά τη πόλωση της δηλαδή την εφαρμογή τάσης στα άκρα της .

Ορθή πόλωση : Τείνει να ενισχύσει τη ροή ηλεκτρονίων μέσα από τη δίοδο ευνοώντας το θετικό ρεύμα. Η περιοχή απογύμνωσης μικραίνει με την αύξηση της εξωτερικής τάσης V και καθως η V τείνει στη Vb η δίοδος γίνεται αγωγός και τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα.

Ανάστροφη πόλωση : Η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται και η δίοδος δεν άγει παρά ελάχιστο ρεύμα συμπερφερόμενη πρακτικά ως διακόπτης.



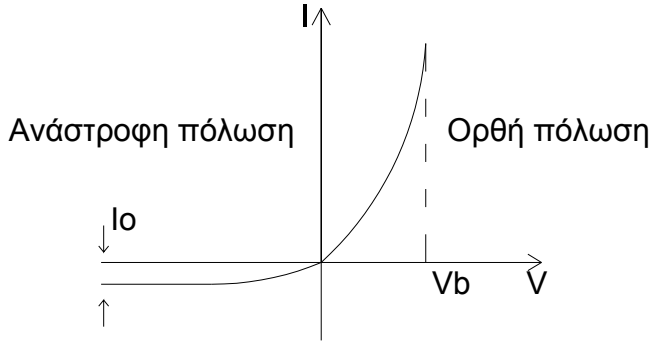
(α) χωρίς πόλωση (β) ορθή πόλωση (γ) ανάστροφη πόλωση

Σχ.3.9 Η ορθή και η ανάστροφη πόλωση

Η εξίσωση κατάστασης του στοιχείου της διόδου δόθηκε από τον **Shockley** :

$$I=Io\cdot\left(e^{(q\cdot V/k\cdot T)}-1\right) \qquad \textbf{(3.1)}$$

όπου q ειναι το φορτίο του ηλεκτρονίου (q= $1,6\times10^{-19}$ C), k είναι η σταθερά του Boltzman (k= $1,38\times10^{-23}$) και T είναι η απόλυτητη θερμοκρασία . Το πηλίκο $k\cdot T/q$ συναντάται και ως V_T που ονομάζεται θερμική τάση και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας .



Σχ .3.10 Γραφική παράσταση της εξίσωσης της διόδου

3.2.5 Συμπεριφορά των ημιαγωγών υπό φωτισμό - Η φωτοδίοδος

Η ΦΒ μετατροπή βασίζεται στην κβαντική φύση του φωτός , το οποίο συμπεριφέρεται ως ροή σωματιδίων που ονομάζονται φωτόνια.

Σύμφωνα με τον Einstein η ενέργεια ενός φωτονίου σχετίζεται με την συχνότητα εκπομπής του :

$$E_{ph}=h\cdot\nu \;\rightarrow\; E_{ph}=h\cdot\frac{c}{\lambda} \qquad \textbf{(3.2)}$$

όπου : $c=2,99\times10^{8}$ m/s η ταχύτητα του φωτός

$h=6,626\times10^{-34}$ J×s η σταθερά του Planck

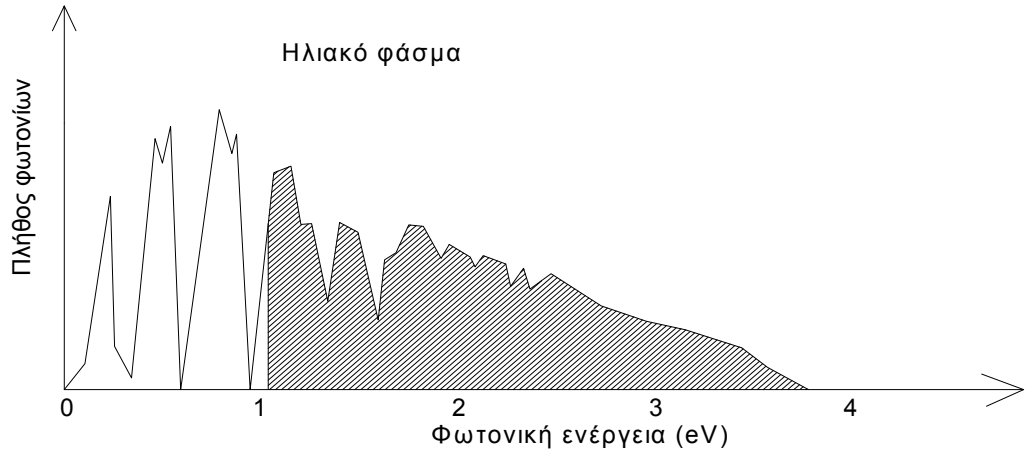
$\lambda=c/\nu$ το μήκος κυματος και η συχνότητα του φωτός

Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει στον ημιαγωγό και απορροφάται , τότε το ηλεκτρόνιο που προσλαμβάνει την ενέργεια , διεγείρεται σπάζοντας το δεσμό του με το άτομο και καθίσταται αγώγιμο . Η απορρόφηση φωτός λοιπόν δημιουργεί ζεύγη e^-- h^+.

Για να συμβεί όμως αυτό υποθέσαμε πως το φωτόνιο είχε ενέργεια $E_{ph}>E_g$ για να μπορέσει να διεγείρει το ηλεκτρόνιο. Το e^- ωστόσο απορροφά μόνο την ποσότητα E_g ενώ η διαφορά E_{ph}-E_g καταστρέφεται ως θερμότητα.

Τα φωτόνια με μικρότερη ενέργεια αν απορροφηθούν , αυξάνουν τη ενέργεια του κρυστάλλου που τελικά μετατρέπεται και αυτή σε θερμότητα .

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθησαν , ο ημιαγωγός είναι ικανός να απορροφήσει το τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε ενέργειες $E>E_g \;\rightarrow\; \lambda<\lambda_g$ δηλαδή $\lambda<\frac{h\cdot c}{E_g}$



Σχ. 3.11 Το ποσοστό των φωτονίων που απορροφά ένας ημιαγωγός

Κάποιοι ημιαγωγοί απορροφούν τα προσπίπτοντα φωτόνια μέσα σε μία ζώνη υλικού πάχους μερικών μm , ενώ υπάρχουν και άλλοι που απαιτούν από το φωτόνιο να ταξιδεύσει σε πολύ μεγαλύτερο βάθος , εώς και 100 μm προκειμένου να απορροφηθεί.

Η πρώτη κατηγορία αποτελεί τους ημιαγωγούς άμεσου και η δεύτερη αυτούς έμμεσου διακένου. Το πυρίτιο ανήκει στη δεύτερη κατηγορία γεγονός που εξηγεί το πάχος των φβ στοιχείων που κατασκευάζονται από αυτό.

πιν.3.1 Ενεργειακά διάκενα διαφόρων υλικών

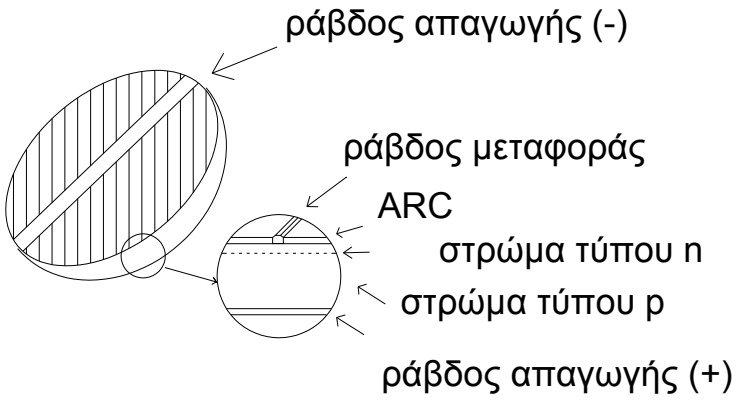
Υλικό	Ενεργειακο διάκενο (eV)	Είδος διακένου
Κρυσταλλικό πυρίτιο	1.12	Έμμεσο
Άμορφο πυρίτιο	1.75	Άμεσο
CuInSe2	1.05	Άμεσο
CdTe	1.45	Άμεσο
GaAs	1.42	Άμεσο
InP	1.34	Άμεσο

3.2.6 Το **φωτοβολταικό στοιχείο διόδου p-n**

Το τυπικό εν χρήσει φβ στοιχείο είναι αυτό του πυριτίου. Η τεχνολογία του είναι αρκετά ώριμη ενώ και η τιμή του γίνεται όλο και πιό προσιτή.

Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε το απλό φβ στοιχείο πυριτίου που σχηματίζεται από μία δίοδο p-n.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές που παράγονται από την προσπτωση του ηλιακού φωτός,διαχωρίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του και κατευθύνονται προς τις μεταλικες επαφές της κορυφής και της βάσης.

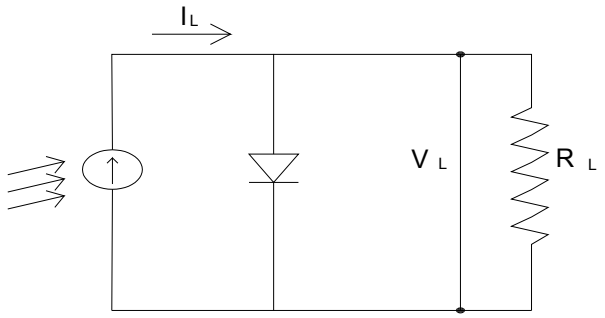


Σχ.3.12 Τυπικό φβ στοιχείο τύπου p-

3.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φβ στοιχείου

3.3.1 Πρώτη προσέγγιση

Για να προχωρήσουμε σε μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το θεωρήσουμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο, και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο κύκλωμα του σχήματος 3.13.



Σχ.3.13 Προσέγγιση κυκλώματος φβ στοιχείου

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ισχύει η σχέση :

$$I_L = Io\left[\exp\left(q \cdot V/\gamma kT\right) - 1\right] \qquad \textbf{(3.3)}$$

από την οποία βρίσκουμε ότι, η τιμή ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου V_{oc} θα είναι

$$V_{oc} = \left(\gamma kT/q\right) \cdot \ln\left[\left(I_L/I_o\right) - 1\right] \qquad \textbf{(3.4)}$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του I_L (φωτορεύμα) είναι πολύ μεγαλύτερη από το I_o και επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στην:

$$V_{oc} = [(\gamma kT/q) \ln I_L/I_o] \qquad \textbf{(3.5)}$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στίς δύο όψεις του στοιχείου το ρεύμα I_{sc} θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα :

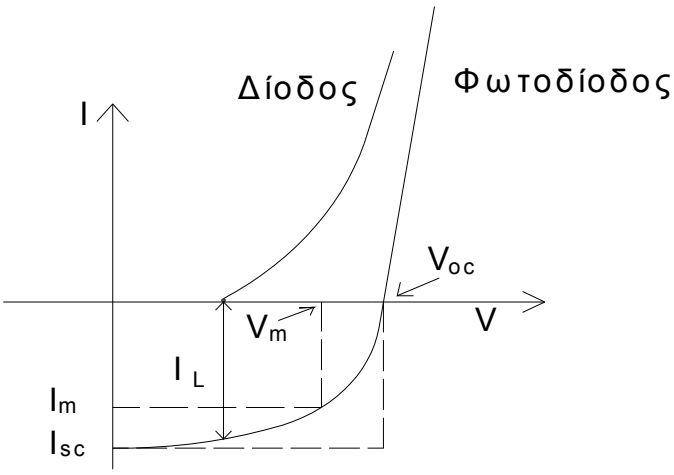
$$I_{sc} = I_L$$

Όταν το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R το ρεύμα θα πάρει την τιμή :

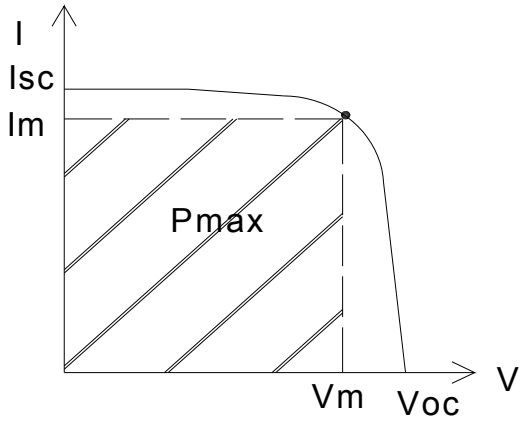
$$I = I_L - Io \cdot \left[\exp\left(q \cdot I_L R_L/\gamma kT\right) - 1\right] \qquad \textbf{(3.6)}$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη. Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση Vm, που δίνεται από την λύση της εξίσωσης :

$$\left(I_L/I_o\right) + 1 = \left[1 + \left(q \cdot V_m/\gamma kT\right)\right] \exp\left(q \cdot V_m/\gamma kT\right) \qquad \textbf{(3.7)}$$



Σχ.3.14 **Καμπύλη I-V φβ στοιχείου**



Σχ.3.15 **Καμπύλη I-V φβ στοιχείου και τα Im και Vm**

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = I_m \cdot V_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτωκυκλωμένης τάσης I_{sc} ,V_{oc} ενός φωτοβολταϊκου στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (FILL FACTOR)

$$FF=I_m V_m / I_{sc} V_{oc} \qquad \textbf{(3.8)}$$

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο FF, I_{sc}, και η V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους.

Ο συντελεστής αποδοσης του στοιχείου μπορεί να οριστεί ως :

$$\eta=P_m/(G \cdot A)=I_m \cdot V_m/(G \cdot A) \rightarrow \eta=FF \cdot I_{sc} V_{oc}/(G \cdot A) \qquad \textbf{(3.9)}$$

όπου G είναι η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/β στοιχείου, εμβαδού A. Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων , επιδιώκεται οι τιμές των FF ,I_{sc} και V_{oc} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

3.3.2 Δεύτερη προσέγγιση

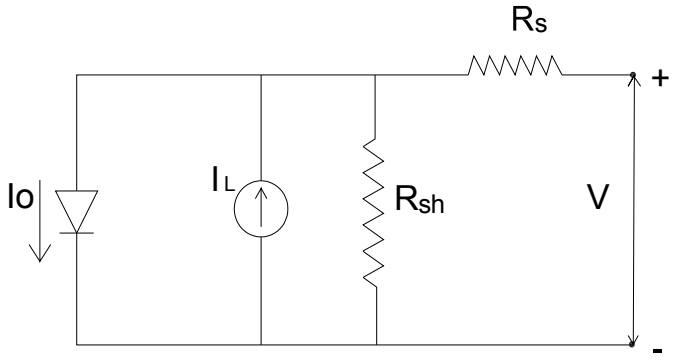
Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.13 περιγράφει ιδανικές συνθήκες, που δεν υπάρχουν στα πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Μια σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το κύκλωμα του σχήματος 3.16 διότι περιέχει και τις αναπόφευκτες αντιστάσεις Rs (από την αγγλική έκφραση series resistance) που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια.

Ακόμα, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση Rsh (από την αγγλική έκφραση shunt resistance).

Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η Rs είναι μικρότερη από 5Ω και η Rsh είναι μεγαλύτερη από 500 Ω.Πάντως επηρεάζουν αισθητά την τάση V_L και του ρεύματος I_L που διαρρέει το φορτίο του κυκλώματος R_L, **με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της απόδοσης** του στοιχείου. στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση :

$$I_L\left[1+\left(R_s/R_{sh}\right)\right]=I_{Load}-I_o\left\{\exp\left[e\left(V_L-I_L R_s\right)/\gamma kT\right]-1\right\}-V_L/R_{sh} \qquad \textbf{(3.10)}$$



Σχ.3.16 Ακριβής προσέγγιση κυκλώματος φβ στοιχείου

3.4 Απώλειες σε ένα φωτοβολταικό στοιχείο

Είδαμε πως στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους.

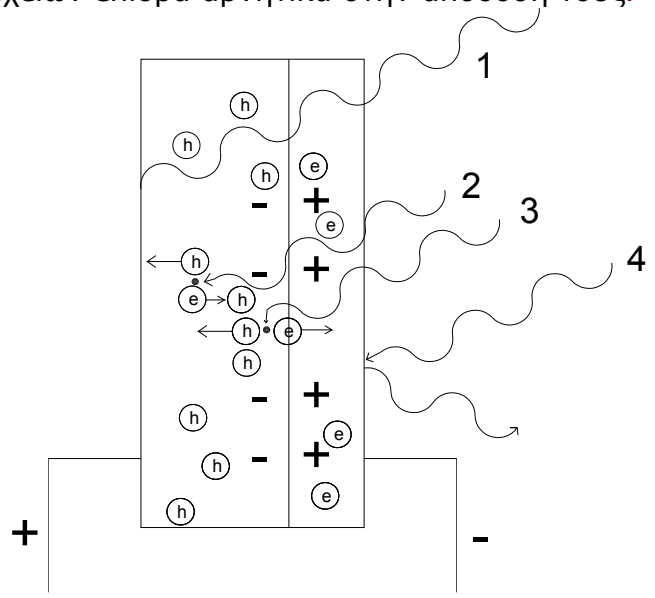
Αναφερόμενοι στο σχ.3.17 βλέπουμε πως ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον(4).

Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγώγιμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει(1).

Ωστόσο και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο με το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει, όπως είδαμε, στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα.

Αυτοί είναι και οι δύο κυριότεροι μηχανισμοί παραγωγής θερμότητας μέσα στο στοιχείο που τελικά συμβάλλουν στην αύξησης της θερμοκρασίας του.

Όπως θα αναλυθεί όμως παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.



Σχ.3.17 Οι πιθανές καταστάσεις από την πρόσπτωση φωτονίων

Στην περίπτωση (2) το φωτόνιο δημιουργεί ζεύγος e^-,h^+ όμως λόγω του ότι στην εν λόγω περιοχή τα ηλεκτρόνια είναι φορείς μειονότητας υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα για επανασύνδεση(recombination) με μία οπή.Αυτός είναι ένας πολύ σημαντικός μηχανισμός απωλειών.

Επανασύδεση συμβαίνει κυρίως στις μεταλλικές επαφές μεταφοράς του ρεύματος.

Τέλος όταν το ζεύγος e^-,h^+ δημιουργηθεί κοντά ή μέσα στην περιοχή απογύμνωσης(4) τότε διαχωρίζεται από το πεδίο και παρασύρεται προς τις δύο επιφάνειες συλλογής φορτίου,συμβάλλοντας στη δημιουργία ρεύματος.

Όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί συνθέτουν τις εσωτερικές απώλειες σε ένα φβ στοιχείο.

Αν θέλουμε να εκτιμήσουμε το μέγεθος των απωλειών αυτών αρκεί να θυμόμαστε ότι για την περίπτωση του πυριτίου με E_g=1,12eV, το 1/3 περίπου της φωτονικής ροής έχει ενέργεια μεγαλύτερη απο αυτή την τιμή. Επίσης η V_m των φβ στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της μέσης ενέρειας των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας .

Τότε υπολογίζουμε πρόχειρα :

$$\eta=\Phi\left(E_g\right)\cdot V_m/\Phi\cdot E\mu \;\rightarrow\; \eta\simeq\; 22\%$$

Εκτός όμως από τις παραπάνω που ονομάζονται εσωτερικές απώλειες, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που περιορίζουν επιπλέον την απόδοση του στοιχείου, όπως για παράδειγμα η σκίαση που προκαλούν οι μεταλλικες επαφές στην κορυφή του στοιχείου.ή ακόμα και παρουσία ωμικών ανιστάσεων όπως είδαμε στην ποηγούμενη παράγραφο.

Όμως και οι συνθήκες λειτουργίας , όπως η θερμοκρασία του στοιχείου αλλά και το είδος της ακτινοβολίας δηλαδή η ένταση και η φασματική κατανομή των φωτονίων επηρρεάζουν τη λειτουργία του.

Για αυτές τις παραμέτρους θα γινει λόγος στην παράγραφο που ακολουθεί μιας και σχετίζονται άμεσα με το κυρίως αντικείμενο των υπολογισμών της παρούσας εργασίας .

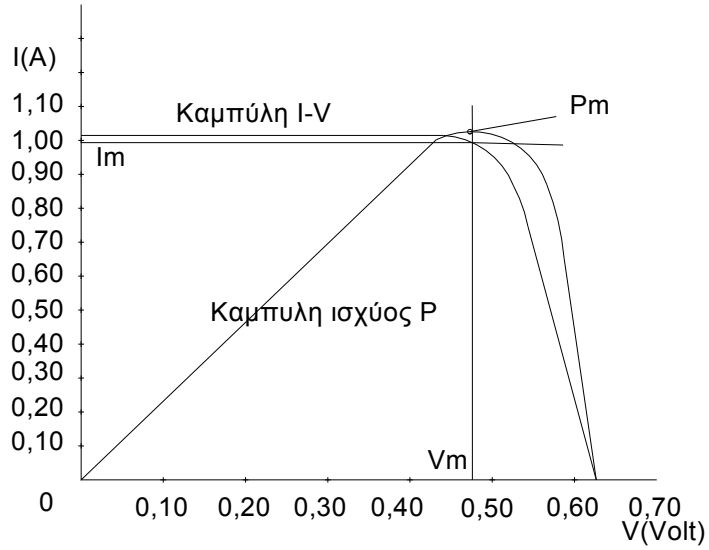
3.4.1 Η επίδραση του ηλεκτρικού φορτίου στην απόδοση

Ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή.

Όπως είδαμε,όταν η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν, δηλαδή στην βραχυκυκλωμένη κατάσταση, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή I_{sc}, ενώ η τάση θα μηδενιστεί.

Αντίθετα, όταν η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο, δηλαδή στην ανοικτοκυκλωμένη κατάσταση, μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος αλλά η τάση παίρνει την μέγιστη τιμή V_{oc}.

Αναμεσα σε αυτές τις δύο ακραίες καταστάσεις η ισχύς μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο και υπάρχει μία τιμή της αντίστασης του κυκλώματος όπου η ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή της P_m (σχ. 3.18)



Σχ.3.18 Οι καμπύλες I-V και ισχύος ενός φβ στοιχείου

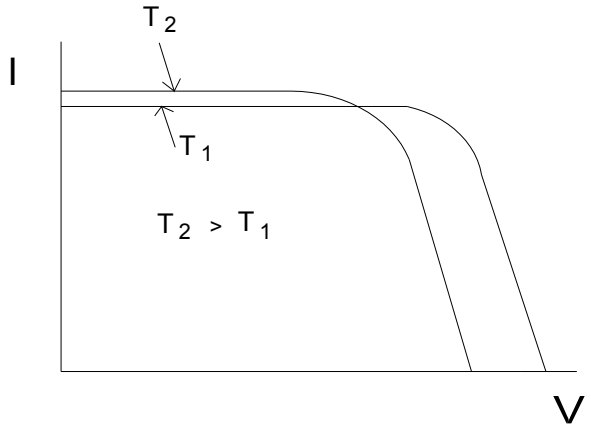
Επομένως για να παράγει το φβ στοιχείο ισχύ κοντά στη μέγιστη θα πρέπει και το φορτίο να έχει περίπου σταθερή αντίσταση, γεγονός που σπάνια συναντάται στην πράξη.

Οι καμπύλες I-V προκύπτουν όπως θα δούμε για σταθερή ακτινοβολία και σταθερή θερμοκρασία των στοιχείων

3.4.2 Η επίδραση της θερμοκρασίας στο βαθμό απόδοσης

Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωση των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων.

Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Σχήμα 7)

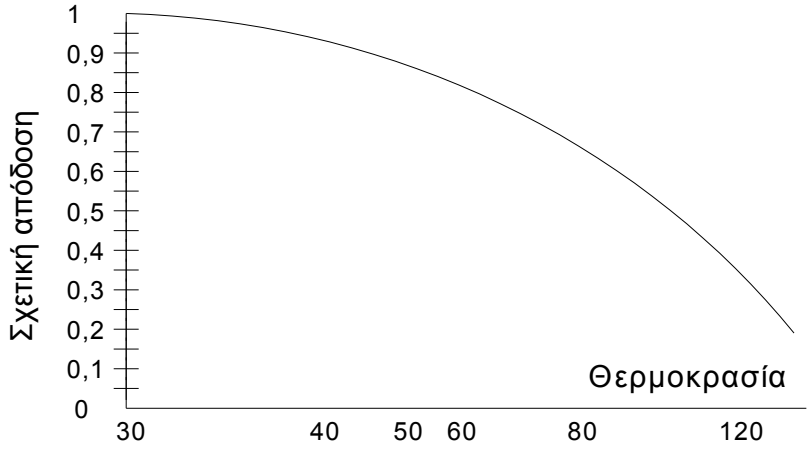


Σχ.3.19 Ποιοτικό διάγραμμα I-V με παράμετρο τη θερμοκρασία

Από το σχήμα ωστόσο προκύπτει πως η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει ελάχιστα το ρεύμα I ώστε στις πρακτικές εφαρμογές να θεωρούμε αυτή τη μεταβολή αμελητέα .

Τελικά βρίσκουμε πως μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας επιφέρει μια μεταβολή στον βαθμό απόδοσης του στοιχείου όμοια με αυτή που βλέπουμε στο σχ.3.20

Η κλίμακα του άξονα των θερμοκρασιών είναι λογαριθμικη.



Σχ.3.20 Λογαριθμικό διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας

Η σχετική απόδοση ειναι το πηλίκο : η/n_{REF}

Ο βαθμός nref είναι αυτός που μετράται σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας που συνήθως είναι :

Πυκνότητα ισχύος : **G =1000 W/m^2** (συχνα αναφέρεται ως πυκνότητα ισχύος «ενός ηλιόυ»)

Φάσμα ακτινοβολίας : **AM 1.5**

Θερμοκρασία : **T = 25 °C**

Ασφαλώς πρέπει να τονισθει πως για να μελετήσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας θεωρήσαμε πως η αντίσταση του φορτίου είναι σταθερή δεδομένου πως και αυτή είναι μια σημαντικη παράμετρος λειτουργίας ,

Τελικά από το σχήμα διαπιστώνουμε πως για τις συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας, η σχετική απόδοση μειώνεται γραμμικά με τη θερμοκρασία δηλαδή ισχύει :

$$\eta = n_{REF} \cdot (1-\beta \cdot (T-T_{REF})) \qquad \textbf{(3.11)}$$

όπου ο β ονομάζεται συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας και για τα εμπορικά στοιχεία πυριτίου παίρνει τιμες :

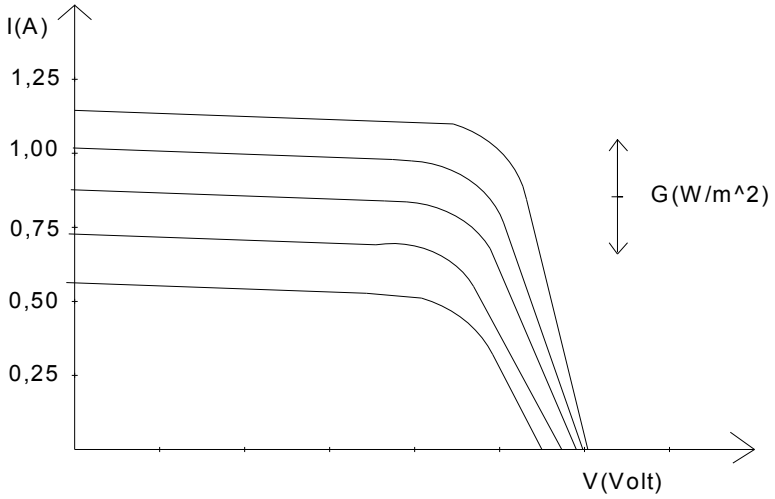
$$\beta = 0{,}02\text{-}0{,}06 \ /^{o}C$$

3.4.3 Η επίδραση της έντασης της ακτινοβολίας στο βαθμό απόδοσης

Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία του στοιχείου και η αντίσταση του φορτίου είναι σταθερές τότε η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας G μεταβάλλει με τρόπο ανάλογο και την ένταση του φωτορεύματος I_L .

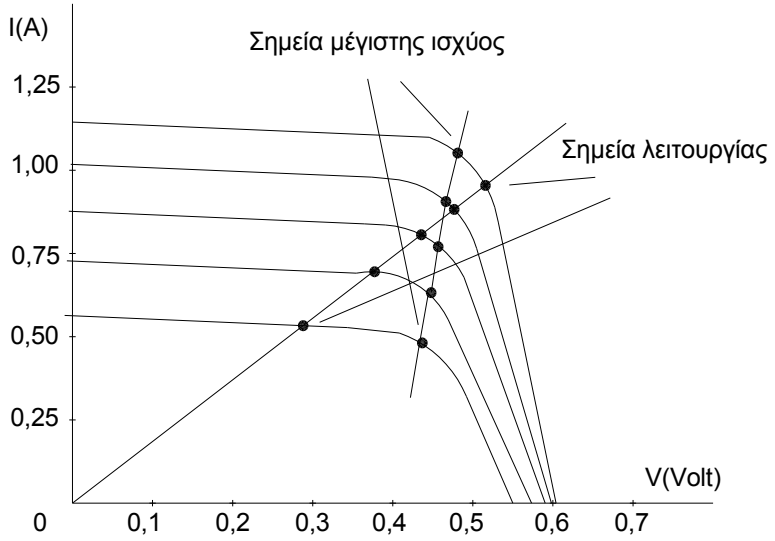
Αφού δεχόμαστε ότι το ρεύμα κόρου Io είναι πολύ μικρότερο τότε κατά τη λειτουργία του στοιχείου είναι $I=I_L$ και επομένως και το ρεύμα μεταβάλλεται μεταβάλλεται ανάλογα της G.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρούμε ότι η ένταση της ακτινοβολίας δεν επηρρεάζει πρακτικά την τάση λειτουργίας , σε αντίθεση με τη θερμοκρασία.



Σχ.3.21 Μεταβολή της απόδοσης του φβ κυττάρου με την ένταση της ακτινοβολίας

3.4.4 Η συμπεριφορά του στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες (σταθερό φορτίο)



Σχ.3.22 Μεταβολή του σημείου λειτουργίας του στοιχείου για μεταβλητές συνθήκες

Στο πιο πάνω γράφημα βλέπουμε τη μεταβολή των σημείων λειτουργίας του φβ στοιχείου υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης έντασης ακτινοβολίας. Βλέπουμε ότι οι καμπύλες I-V του στοιχείου, τέμνονται από τη γραμμή λειτουργίας, που δίνει τη μεταβολή των χαρακτηριστικών Voc και Isc που αυξάνουν με την αύξηση της πυκνότητας της ακτινοβολίας.

Παρατηρούμε ότι τα σημεία λειτουργίας μπορεί να απέχουν σημαντικά από τα σημεία μέγιστης ισχύος.

Συμπέρασμα :

Όπως είδαμε υπάρχουν τρείς παράγοντες που επιδρούν δραστικά στη λειτουργία του φβ στοιχείου :

α) Η ένταση και φασματική κατανομή της ακτινοβολίας β) Η θερμοκρασία του στοιχείου και γ) η αντίσταση του φορτίου

Λόγω της μεταβολής και των τριών αυτών παραμέτρων κατά τη λειτουργία των φβ στοιχείων είναι πρακτικά αδύνατο να διατηρούνται οι συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας του στοιχείου. Δεδομένου πως τα α και β εξαρτώνται από τις καιρικές

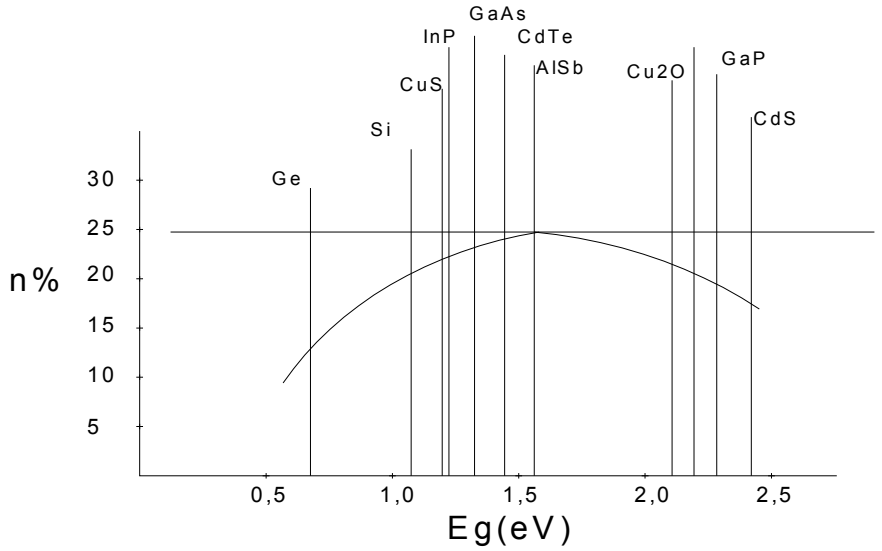
συνθήκες θα έπρεπε κάθε στιγμή να ρυθμίζουμε την αντίσταση του κυκλώματος (κατανάλωση) γεγονός που ασφαλώς δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα.

3.4.5 Αξιολόγηση των ημιαγωγών για ηλιακές φωτοβολταϊκές εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα.

Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την καταλληλότητα τους, για να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στο σχήμα βλέπουμε λοιπόν ότι οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 25%) μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV.



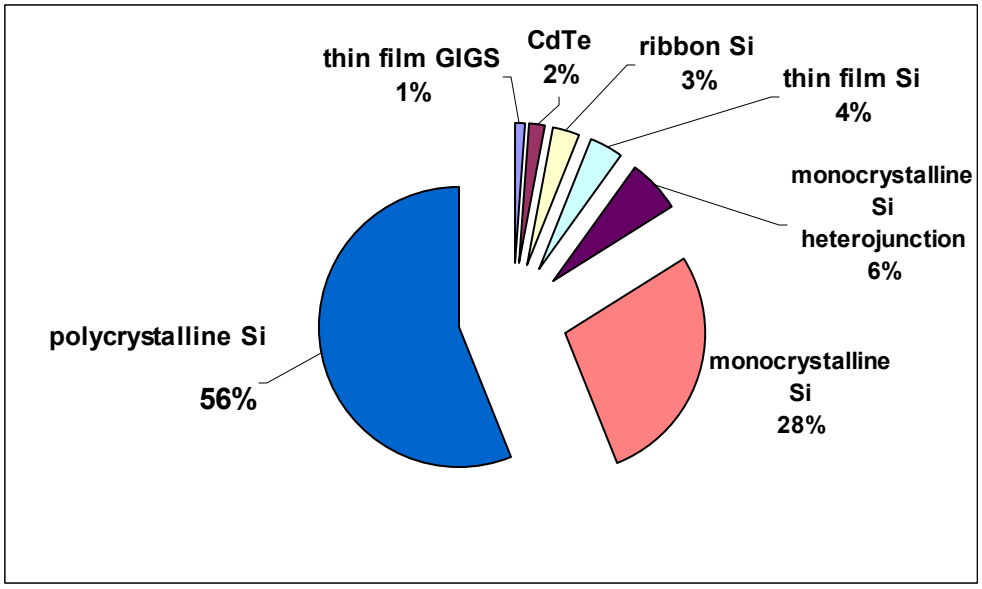
Σχ.3.23 Σύγκριση διαγόρων ημιαγωγών υλικών ως προς το βαθμό απόδοσης τους

Κριτήρια για την αξιολόγηση των ημιαγωγών είναι πρώτα από όλα το είδος του ενεργειακού διακένου(άμεσο ή έμμεσο), το κόστος της παραγωγής τους, η σταθερότητά τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών το ειδικό βάρος κ.α

Από τα πολλά ημιαγώγιμα υλικά που έχουν ως τώρα μελετηθεί για ηλιακή φωτοβολταϊκή μετατροπή, μεγάλη εφαρμογή έχει βρει μόνο το πυρίτιο, αν και άλλοι ημιαγωγοί έχουν δώσει καλύτερες αποδόσεις .

Πολύ σημαντικές προοπτικές για ανάπτυξη έχουν επίσης το θειούχο κάδμιο (CdS) λόγω χαμηλού κόστους, και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAS) λόγω μεγάλης απόδοσης.

Ωστόσο το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς των φβ στοιχείων το κατέχει το πυρίτιο λόγω της αφθονίας του συγκεκριμένου στοιχείου αλλά και της προηγμένης τεχνογνωσίας για την κατασκευή πυριτικών



Σχ.3.24 Το μερίδιο αγοράς διαφόρων ειδών φβ στοιχείων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

4.1 Γενικά

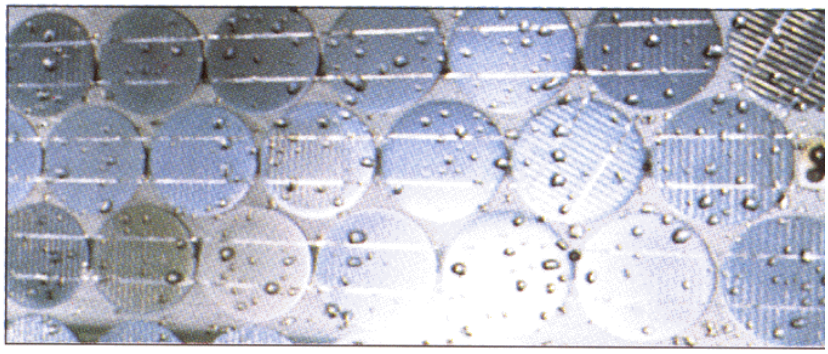
Το βασικό χαρακτηριστικό κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η Φ/β γεννήτρια που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα Φ/β ηλιακά στοιχεία.

Στην ανάλυση των Φ/β στοιχείων είδαμε ότι η ταση , το ρεύμα και κατα συνέπεια η ισχύς τους είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών.

Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο Φ/β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις μέχρι 0,5V περίπου και ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4W περίπου (σχ. Προηγούμενης παραγράφου).

Για αυτό, τα Φ/β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση Φ/β γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 50 περίπου, σε ένα πλαίσιο, με κοινή ηλεκτρική έξοδο.

Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης. π.χ. η σύνδεση 35 στοιχείων στη σειρά δίνει περίπου 15-20 V, που είναι κατάλληλη, αν αφαιρέσουμε τις διάφορες απώλειες, για την φόρτιση των συνηθισμένων συσσωρευτών
μολύβδου.



Ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία.

Σχ.4.1 Ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία

4.2 Υλικά και τρόπος κατασκευής του πλαισίου

Το Φ/β πλαίσιο, είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/β γεννητριών.

Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα με μορφή σάντουιτς. Δηλαδή, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με την βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα.

Διαμορφώνεται έτσι το Φ/β πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/β γεννητριών. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος των Φ/β πλαισίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν

πίνακας.4.1 Συνιστώσες κόστους ενός φβ πλαισίου

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	Ποσοστό επί του ολικού κόστους
Ηλιακά στοιχεία	**80%**
Εμπρός φύλλο από γυαλί	**2%**
Πλαστικό συγκολλητικό φύλλο του γυαλιού	**1,4%**
Πλάτη και περιμετρική ταινία από αλουμίνιο	**4%**
Στεγανωτική ταινία από ελαστικό σιλικόνης	**1,6%**
Ηλεκτρικές συνδέσεις και προστατευτική δίοδος	**1%**
Εργατικά συναρμολόγησης ελέγχου και συσκευασίας	**10%**

Τα Φ/β πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις.

Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4 V μέχρι 22 V , και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5 A μέχρι 2,5A.

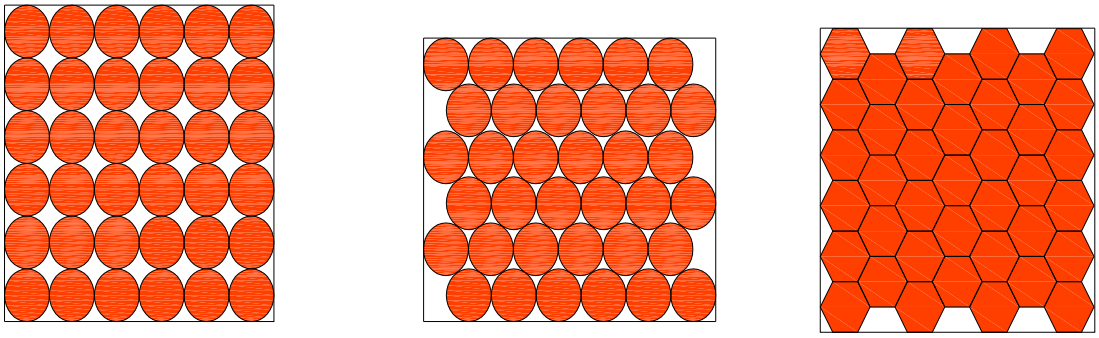
Πριν βγουν στο εμπόριο, τα Φ/Β πλαίσια υποβάλλονται συνήθως σε μια σειρά από αυστηρές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου με θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και σε δοκιμασία 5ήμερης συνεχούς παραμονής σε ατμόσφαιρα σχετικής υγρασίας 95% και θερμοκρασίας 95 ^{o}C, για να ελεγχθεί η στεγανότητά τους.

4.3 Ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου (PACKING FACTOR)

Ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου που συμβολίζεται με **PF** , ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των στοιχείων προς τη συνολική επιφάνεια του πλαισίου.

$$PF = \frac{\sum A_{sc}}{A_c} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Η τιμή του PF εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο φ/β πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78, για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 (πρακτικά μέχρι 0,98),για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία



PF = 0,78 **PF = 0,88** **PF = 0,98**

Σχ.4.2 Παραδείγματα διαφορετικής διάταξης φβ στοιχείων

4.4 Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του πλαισίου

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η διάκριση μεταξύ του βαθμού απόδοσης του στοιχείου που είδαμε προηγουμένως και του βαθμού απόδοσης του πλαισίου που θα ορίσουμε ως :

$$n_c = \frac{P_{\omega\varphi}}{G_T \cdot A_c} \qquad \textbf{(4.2)}$$

όπου $P_{\omega\varphi}$ είναι η ωφέλιμη ηλεκτρική ισχύς που παράγει το φ/β πλαίσιο , G_T είναι η πυκνότητα της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και A_c είναι η συνολική επιφάνειά του.

Αν υποθέσουμε ότι η συνολική ωφέλιμη ισχύς είναι το αθροισμα των ισχύων που παράγει κάθε στοιχείο ήτοι :

$$P_{\omega\varphi} = \sum P_{sc} \quad \text{τότε από την (1) ισχύει} \quad \sum P_{sc} = n_c \cdot A_c \cdot G_T$$

και έτσι :

$$\sum P_{sc} = \sum n_{sc} \cdot G_{abs} \cdot A_{sc} \rightarrow \sum P_{sc} = n_{sc} \cdot G_{abs} \cdot \sum A_{sc}$$

όπου θεωρήσαμε ότι ο β.α κάθε στοιχείου είναι ο ίδιος.

Σύμωνα με τον ορισμό του nsc :

$$\sum P_{sc} = n_{sc} \cdot (\tau\alpha) \cdot PF \cdot G_T \cdot A_c \rightarrow n_c = n_{sc} \cdot (\tau\alpha) \cdot PF \qquad \textbf{(4.3)}$$

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση ο β.α απόδοσης του πλαισίου είναι μικρότερος από τον β.α του στοιχείου λόγω των οπτικών απωλειών και του συντελεστή κάλυψης.

Αυτή τη σύμβαση, δηλαδή το να εισάγουμε τις οπτικές απώλειες στον β.α του πλαισίου, θα την ακολουθήσουμε σε όλη τη μελέτη που θα ακολουθήσει.

4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του πλαισίου

Η θερμοκρασία

Όπως είδαμε κατά τη μελέτη των φ/β στοιχείων η απόδοση τους επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία και συγκεκριμένα μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει.

Ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται από τον κατασκευαστή για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/β πλαίσια αντιστοιχεί συνήθως στη θερμοκρσία των 25 oC . Επειδή όμως η θερμοκρασία λειτουργίας μεταβάλεται αναλόγως με τις εξωτερικές συνθήκες αλλά και τη θερμότητα που εκλύεται στις ωμικές αντιστάσεις, πρέπει να δίνεται και ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας β, που συνήθως εχει μία τιμή περίπου 0,006 /oC

Σε πλαίσια που δεν υπάρχει κάποιο σύστημα ψύξης όπως αυτά που μελετούνται στην παρούσα εργασία , παρατηρούνται θερμοκρασίες στοιχείων από 25 εως 30 ^{o}C, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς μείωση της απόδοσης τους.

Η ρύπανση της επιφάνειας

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάθιση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από την θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά.

Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές σε συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Πολλές φορές οι απώλειες αυτές είναι αρκετά σημαντικές ώστε να εισάγονται στους υπολογισμούς της απόδοσης του συστήματος με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης.Ωστόσο στη μελέτη που ακολουθεί στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας η επίδραση της ρύπανσης έχει θεωρηθεί αμελητέα.

Οι ηλεκτρικές απώλειες

Απώλειες ισχύος παρατηρούνται στους αγωγούς που συνδέουν τα Φ/β πλαίσια στις Φ/β συστοιχίες, καθώς και στις συνδέσεις τους με τα άλλα μέρη του Φ/β συστήματος (διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές κλπ).

Πρόσθετες και μάλιστα **σημαντικότερες** απώλειες μπορεί να οφείλονται στη λειτουργία αυτών των άλλων μερών του συστήματος και κυρίως στη φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών.

Εξάλλου, όπως είδαμε, η τιμή του συντελεστή απόδοση των Φ/β πλαισίων που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς, αφορά στις συνθήκες τάσης-έντασης που αντιστοιχούν στη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας(Vm,Im).

Είναι όμως πολύ πιθανό, ιδίως όταν το σύστημα δεν έχει αξιόπιστο ρυθμιστή ισχύος, ότι κατά την λειτουργία του θα υπάρχει μια αξιόλογη απόκλιση από τις ιδανικές αυτές συνθήκες, με αποτέλεσμα την έμφαση αντίστοιχής απώλειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να είναι της τάξης π.χ. περίπου του 20% ως 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο !

Η φθορά του πλαισίου με το χρόνο

Τέλος, λόγω της φθοράς στα Φ/β πλαίσια και στα άλλα μέρη του συστήματος, αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μια μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που συνήθως υπολογίζεται στο 1% ως 2% για κάθε έτος.

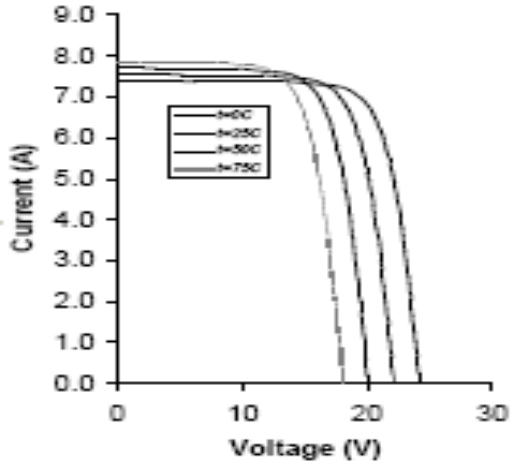
4.6 Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ πλαισίου

1. Ισχύς αιχμής (P_a), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
2. Ανοιχτοκυκλώμενη τάση (V_{os}) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
3. Βραχυκλωμένη ένταση ρεύματος (I_{sc}), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
4. Τάση (V_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
5.Ένταση ρεύματος (I_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
6. Συντελεστής πλήρωσης (FF), που ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου V_m x I_m πρός το γινόμενο V_{oc} x I_{sc}.
7. Συντελεστής απόδοσης (η), σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης (β).
8. Συντελεστής κάλυψης (PF).
9. Διηλεκτρική αντοχή δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του Φβ πλαισίου

Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φβ πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κ.λπ.), αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύς αιχμής (P_a), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1 KW/m^2 .

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/β πλαισίου μιας ολόκληρης Φβ εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βάτ αιχμής (Wp ,Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής (KWp).

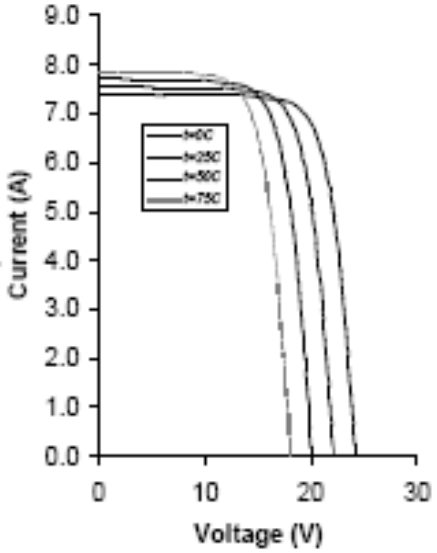
4.7 Παραδείγμα πραγματικού ΦΒ πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου



πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά συλλέκτη Pc-Si

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ **BP SOLAR 3125 (pc Si)**	
Διαστάσεις : **Μήκος 1510 mm** **Πλάτος 674 mm** **Πάχος 50 mm**	Απόδοση : Ονομαστική ισχύς **P_m=125 Wp** Ονομαστική τάση **V_{nom}=12 V**
Ηλεκτρικά χαρ/στικά : **Vm=17,6 V** **Im=7,1 A** **Isc=7,54 A** **Voc=22,1 V**	Συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας Ρεύματος : 0,065 %/°C Τάσης : 80mV /°C Ισχύος(β): 0,5%

4.8 Παράδειγμα πραγματικού ΦΒ πλαισίου άμορφου πυριτίου



πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά συλλέκτη a-Si

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ BP SOLAR 3125 (pc Si)	
Διαστάσεις : **Μήκος 1510 mm** **Πλάτος 674 mm** **Πάχος 50 mm**	Απόδοση : Ονομαστική ισχύς **P_m=125 Wp** Ονομαστική τάση **V_{nom}=12 V**
Ηλεκτρικά χαρ/στικά : **Vm=17,6 V** **Im=7,1 A** **Isc=7,54 A** **Voc=22,1 V**	Συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας Ρεύματος : 0,065 %/°C Τάσης : 80mV /°C Ισχύος(β): 0,5%

4.9 Φωτοβολταϊκά πάνελ και συστοιχίες

Με τον όρο Φ/β πάνελ (PANEL) πολλές φορές εννοούμε το φ/β πλαίσιο. Στην πργματικότητα ο όρος πάνελ χρησιμοποιοείται γαι να χαρακτηρίσει διατάξεις στις οποίες δύο ή περισσότερα πλαίσια είναι συνδεδεμένα και αποτελούν ένα συλλέκτη .

Όπως και το πλαίσιο έχει επίσης συναρμολογηθεί και προκατασκευασθεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση στην Φ/β εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πάνελ μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο), που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους.

Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/β συστήματος, είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των Φ/β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πάνελ ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πάνελ, να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν ένα Φ/β στοιχείο σκιαστεί (π.χ. από ένα πουλί ή από τις ακαθαρσίες που μπορεί να αφήσει) ή αν πάθει βλάβη (π.χ. μία διακοπή στους ηλεκτρικούς αγωγούς) δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα, όπως αν συνέβαινε αν όλα τα Φ/β στοιχεία ήταν σε σύνδεση σε σειρά.

Η Φ/β γεννήτρια μιας μικρής Φ/β εγκατάστασης μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο ή πανέλ. Σε μεγαλύτερες όμως εγκαταστάσεις, ομάδες περισσοτέρων Φ/β πλαισίων ή πανέλ τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή στήριξης, π.χ. ξύλινα ή μεταλλικά ικριώματα, και ονομάζονται Φ/β συστοιχίες (arrays) . Η σύνδεση των Φ/Β πλαισίων, στη σειρά ή παράλληλα, γίνεται με τρόπο που η τάση εξόδου της συστοιχίας να αποκτά την επιθυμητή τιμή.

Είναι φανερό ότι η διαφορετική συνδεσμολογία των πλαισίων μιας Φ/β γεννήτριας δεν μεταβάλει την ισχύ της, αφού όποια αύξηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας συνεπάγεται ανάλογη μείωση της έντασης του ρεύματος που παράγει.

Ο καθορισμός του εμβαδού της επιφάνειας των Φ/β συλλεκτών Ac στηρίζεται στη μέση ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος και στη μέση ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οι συλλέκτες στην επιλεγμένη κρίσιμη περίοδο λειτουργίας του.

Στην Ελλάδα η κλίση των συλεκτών β_C είναι συνήθως περίπου 45°. Όταν ενδιαφέρει περισσότερο η Φ/β παραγωγή των θερινών μηνών, επιλέγεται μικρότερη κλίση, μέχρι περίπου 20°. Αντίθετα, για τις χειμερινές εφαρμογές, η βέλτιστη κλίση των συλλεκτών μπορεί να φτάσει μέχρι περίπου 60° , αλλά το κέρδος σε σύγκριση με την κλίση 45° είναι μικρό.

Σχ.4.3 Συνδεδεμένα φβ πλαίσια (Πηγή : www.r2controls.com)

4.10 Διασυνδεδεμένα(on grid) και μή διαυνδεδεμένα (off grid) συστήματα

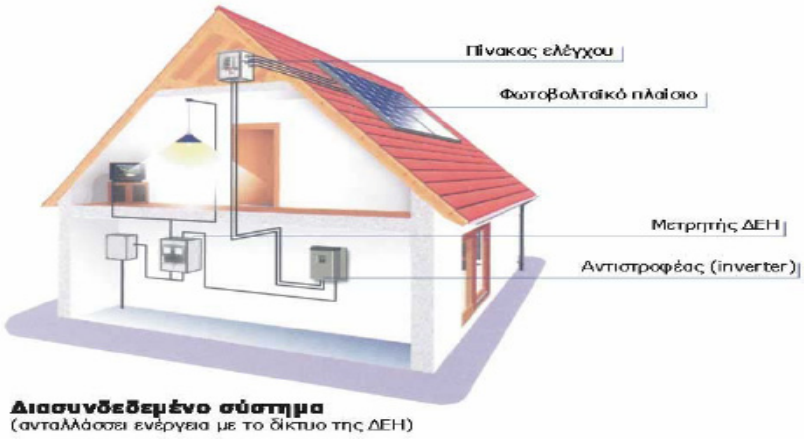
Το φ/β συστήματα οικιακής χρήσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες

- Διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα (on grid)
- Μη διασυνδεδεμένα στο δίκτυο (off grid)

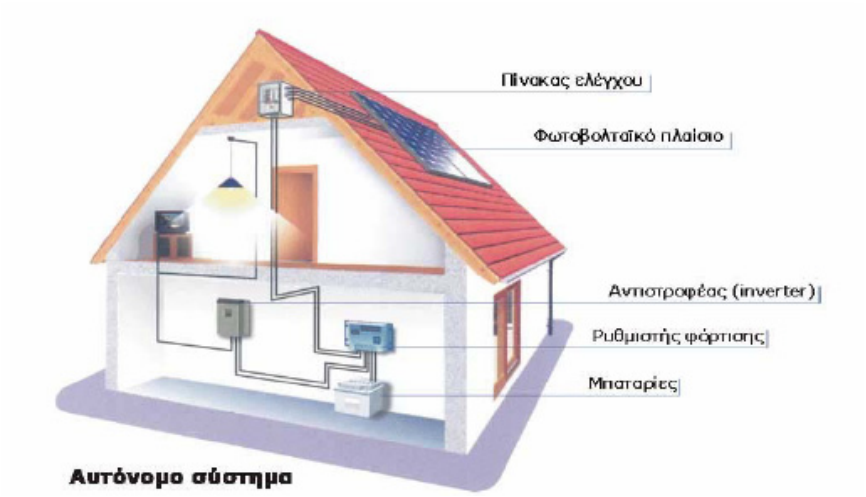
Η διαφορά τους έγκειται στο ότι τα πρώτα είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο της Δ.Ε.Η και ανταλλάσουν ενέργεια με αυτό.

Ετσι το ηλεκτρικό δίκτυο παίζει το ρόλο της βοηθητικής πηγής ισχύος σε περιπτωση που χρειαστεί επιπλέον ισχύς ή τον ρόλο του αγοραστή της πλεονάζουσας ενέργειας της εγκατάστασης όταν πο συνθήκες το επιτρέπουν.

Οι σημαντικότερες μονάδες των συστημάτων αυτών είναι το ΦΒ πλαίσιο, ο πίνακας ελέγχου και ο αντιστροφέας τάσης. Τα on grid συστήματα διαθέτουν επιπλέον μετρητή της Δ.Ε.Η (σχ.4.4) ενώ τα off grid ρυθμιστή φορτισης και συσσωρευτή (σχ.4.5).



Σχ.4.4 Οικία με εγκατεστημένο διασυνδεδεμένο φ/β σύστημα

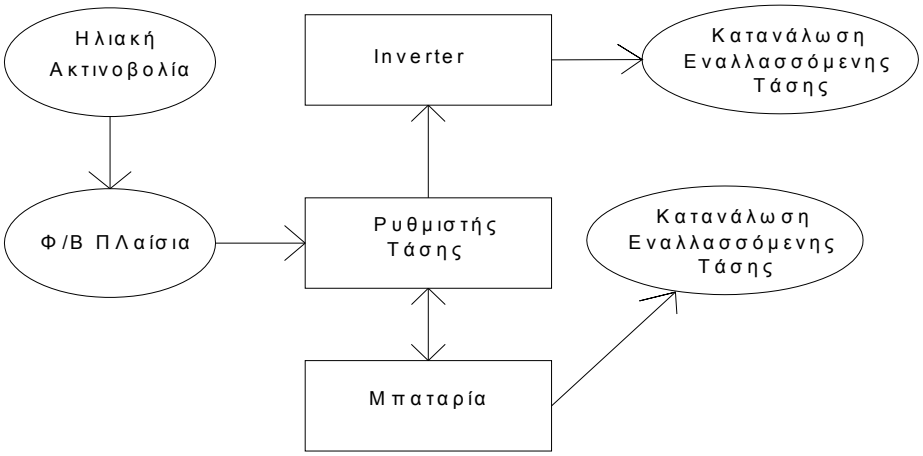


Σχ.4.5 Η ίδια οικία με μη διασυνδεδεμένο σύστημα φ/β σύστημα
(πηγή : www.powernatural.gr)

Συνήθως, από τα αυτόνομα Φ/β συστήματα ζητείται να εξασφαλίζουν μια αυτοδυναμία τουλάχιστον 3 ως 10 ημερών περίπου όσος είναι περίπου και η μέγιστη χρονική διάρκεια συννεφιάς στη χώρα μας.

Η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα αυτόνομα Φ/β συστήματα γίνεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές με ή χωρίς τη μετατροπή της τάσης .

4.11 Διάφορα υποσυστήματα της φ/β εγκατάστασης



Σχ.4.6 Διάγραμμα διασύνδεσης στοιχείων αυτόνομου φβ συστήματος

1) Ο συσσωρευτής (μπαταρία)

Ο συσσωρευτής αποτελεί την εναλλακτική πηγή ενέργειας συνεχούς ρεύματος στην περίπτωση που η ενέργεια από τη φβ γεννήτρια δεν επαρκεί και το σύστημα είναι αυτόνομο. Αυτή η κατάσταη συναντάται καθημερινά τις νυχτερινές ώρες και κατά τον χειμώνα τις ημέρες με πυκνή νέφωση.

Οι συσσωρευτές των φβ συστημάτων ακολουθούν τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης όπως και οι μπαταρίες των αυτοκινήτων αν και στα φβ συστήματα πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είνα τα εξής**:**

α) *Χωρητικοτητα (Cn):*

Είναι το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευθεί στην μπαταρία και μετράται σε αμπρώρια (Ah) . Υπολογίζεται ως το γινόμενο της μέσης έντασης επι τις ώρες φόρτισης και προκύπτει η ονομαστική τιμή Cn :

$$C_n = I_m(A) \times N(hr)$$

Παρολα αυτά η πραγματική χωρητικότητα C , εξαρτάται άμεσα απο τον ρυθμό εκφόρτισης . Αν η ισχύς κατά την εκφόρτιση είανι μεγάλη τότε ο συσσωρευτής θα εμφανίζει μικρότερη χωρτικότητα.

Η χωρητικότητα επηρεάζεται επίσης και απο τη θερμοκρασία κι μάλιστα αυξάνει όταν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι αυξημένη μακροπρόθεσα όμως η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας είναι ένας λόγος για μειωμένη διάρκεια ζωής.

β) *Τάση (Vn):*

Ώς Vn λαμβάνεται η τάση του συσσωρευτή όταν αυτός είναι πλήρως φορτισμένος και εξαρτάται από ον αριθμό των πλακών και το είδος του ηλεκτρολύτη. Η συνεχής τάση που παρέχει ένα ζεύγος πλακών είναι περίπου 2VOLT.

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα Φ/β συστήματα μπορεί να έχουν 100 ή και 150 ζεύγη πλακών στη σειρά, που δίνουν τάση συνεχούς ρεύματος 200 V ή 300 V αντίστοιχα.

γ) *Βάθος εκφόρτισης (β):*

Είναι το ποσοστό της ενέργεια του συσσωρευτή που μπορεί να εκφορτιστεί χωρίς να υπάρξουν αρνητικές επιπτώσεις στην κανονική διάρκεια ζωής του.

Οι συνηθισμένες μπαταρίες αντέχουν σε εκφόρτιση της τάξης του 10%-20% ενώ σε κάποιες πιό ογκώδεις και ακριβές το β φθάνει εώς και το 80%.

Ειδικά οι μπαταρίες NiCd μπορουν θεωρητικά να εκφορτίζονται εώς και 100% χωρίς πρόβλημα.

Τελικά η αξιοποιήσιμη ενέργεια σε κάθε κύκλο φόρτισης εκφόρτισης είναι E=CxBxn

$$E = C_n \times V \times \beta$$

δ) *Η θερμοκρασία λειτουργίας (T) :*

Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει και την χωρητικοτητα ενώ σε ακραία χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκληθεί μέχρι και στερεοποίηση του ηλεκτρολύτη.

στ) *Ο χρόνος ζωής :*

Στα ΦΒ συστήματα ακόμα και υπό τις ευνοικότερες συνθήκες , αν υποθέσουμε πως πραγματοποιείται ένας κύκλος φόρτισης εφόρτισης ημερισίως, η διάρκεια ζωής δεν υπερβαίνει τα 5-6 χρόνια.

΄Ετσι θα πρ’επει να έχουμε υπόψη μας ότι το 30% περ΄που των εξόδων λειτουργίας της εγκατάστασης είναι για αλλαγή συσσωρευτών

Διάφοροι τύποι συσσωρευτών

Υπάρχουν διαφόρων τύπων ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες), ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους.

Οι πιό συχνά χρησιμοποιούμενοι είναι :

Οι συσσωρευτές μολύβδου (Pb)

Είναι όμοιοι με τους συνηθισμένους συσσωρευτές των αυτοκινήτων. Αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη. Το θετικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από δοξείδιο του μολύβδου (PbSO2) και το αρνητικό απο μεταλλικό μόλυβδο(Pb) ενώ ο ηλεκτρολύτης είναι θειικό οξύ διαλυμένο σε νερό ή με τη μορφή ζελέ.

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της **φόρτισης** σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι :

Θετικό ηλεκτρόδιο $PbO_2 + 3H^+ + HSO_4^- + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$

αρνητικό ηλεκτρόδι $Pb + HSO4^- \rightarrow PbSO_4 + H^+ + 2e^-$

Προφανώς κατα την **εκφόρτιση** παργματοποιούνται οι αντίστροφες αντιδράσεις.

Κατά τη εκφόρτιση μειώνεται η συγκέντρωση του H2So4 ενώ κατά την φόρτιση αποκαθίσταται η συγκέντρωση του στην αρχική.

Οι αιτίες φθοράς του συσσωρευτή είναι η εξ'ατμιση του νερού που ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες και η ηλεκτρόλυση του νερού σε περίπτωση υπερτροφοδότησης.

Οι συσσωρευτές Νικελίου Καδμίου (Ni Cd)

Είναι πιό ακριβοί από τους κοινύς συσσωβ\ρευτες στο θετικό ηλεκτρόδιο υπάρχει NiOOH και στο αρνητικό κάδιο CD ενώ ο ηλεκτρολύτης είανι KOH

Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη φόρρτιση είναι

Θετικό ηλεκτρόδιο $NiOOH + H_2O + e^- \rightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$

Αρνητικό ηλεκτρόδιο $Cd + 2OH^- \rightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$

Όπως ειναι φανερο ο ηλεκρολύτης KOH δεν συμμετέχει στην αντιδραση φορτισης εκφόρτισης . Η συγκέντρωση του συνεπώς παραμένει σταθερή και επίσης δεν χρειάζεται να έχουε ιόντα του ηλεκτρολύτη για επαρκή φορτιση.

Οι μπαταρίες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατούν ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες και αυτό γιατί σε τετοιες συνθήκες οι κοινές μπαταρίες παρουσιάζουν μειωμένη διάρκεια ζωής. Η τιμή τους είναι μέχρι και 4 φορές μεγαλύτερη από τις μπαταρίες μολύβδου ασβεστίου και θεωρητικά μπορουν να εκφορτιστούν εώς και 100% ωστόσο στην πραξη επιτρέπεται εκφόρτισή τους μέχρι 90% περίπου.

2) Μετατροπέας τάσης AC/DC (INVERTER)

Χάρη σε αυτή τη συσκευή γίνεται η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγει η φβ γεννήτρια , σε εναλλασόμενο , για να μπορούν να λειτουργήσουν οι διάφορες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές οικιακες συσκευές. Κτασκευάζονται από συσκευές στερεάς κατάστασης κι έχου πολυ υψηλό βαθμό απόδοσης.

Τα χαρακτηριστικά του επιλέγονται ανάλογα με τον τύπο της φβ εγκατάστασης(on grid ή off grid εγκατάσταση)

Αυτόνομες εγκατστάσεις

Τα χαρακτηρστικά του μετατροπέα είναι η τάση εισόδου V_{in} που είναι ίση με την τάση του πλαισίου , η ισχύς P που καθορίζεται από το μέγεθος της φβ εγκατάστασης και ο βαθμός απόδοσης του η που συν΄ηθως κυμαίνεται σε 80%-90%.

Το βασικό κριτήριο επιλογής είναι ο βαθμός απόδοσης και το εύρος της περιοχής ισχύος στην οποία αυτός διατηρείται σε υψηλά επίπεδα , ενώ εξίσου σημαντικό είναι να μετατρέπει την τάση χωρίς παραμορφώσεις και διατηρώντας περίπου σταθερή τη συχνότητα.

Ένα ακομα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η μέγιστη στιγμιαία ισχύς του στην περίπτωση που θα πρέπει να τροφοδοτήσει έναν κινητήρα ή μια αντλία που κατά την εκκίνηση τους απορροφούν ισχύ πολύ μεγαλύτερη της ισχύος κανονικής λειτουργίας τους και προκαλούν υπερφόρτωση.

Οι συγχρονοι inverters ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά αυτά , μετατρέπουν σχεδόν τέλεια την συνεχή σε ημιτονοειδή τάση με αυξομοιώσεις της τάξης του 1-2%.

Επίσης διαθέτουν μηχανισμό διακοπής όταν εμφανίζεται αστάθεια και εμφανίζουν χαμηλά επίπεδα θορύβου.

Διασυνδεδεμένες εγκαταστάσεις

Τα κύρια χαρακτηριστικά μετατροπέα αυτού είναι δύο:

Πρώτον να έχει απόδοση που είναι γύρω στο 90-95% και δεύτερο να μπορεί να μετατρέψει πλήρως τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, γιατί λειτουργεί με βάση το σήμα που παίρνει από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Πλεονέκτημα είναι ότι δεν χρρειάζεται να έχει πολύ υψηλέ μέγιστη στιγμιαία ισχύ διότι η εκκίνηση π.χ ενός κινητήρα μπορεί να γίνει από το ρεύμα του δικτύου.

3) Ρυθμιστής φόρτισης

Ο ρυθμιστής φόρτισης συνήθως δεν χρησιμοποείται σε μικρά ΦΒ συστήματα όμως σε μεγαλύτερα αυτόνομα συστήματα είναι απαραίτητος για τη μακροζωία της μιας μπαταρίας.

Ο ρυθμιστής βρίσκεται ανάμεσα στον συλλέκτη τη μπαταρία και το φορτίο και ρυθμίζει τις συνθήκες φόρτισης της μπαταρίας ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση της ή η βαθια εκφόρτιση. Όταν η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτιση της, ο ρυθμιστής ελλατ΄νει το ρεύμα που δίνουν τα πλαίσια προς τη μπαταρία

Τα κύρια χαρακτηριστικά για την επιλογή του είναι :

- **Η ισχύς:** Καθορίζεται από τη τάση που δίνουν τα Φ/β πλαίσια και την ένταση του ρεύματος στον καταναλωτή. Ο ρυθμιστής πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορεί να δεχθεί ρεύμα τουλάχιστον 1,25 φορές μεγαλύτερο του ρεύματος βραχυκυκλώσεως των πλαισίων και η τάση λειτουργίας του να είναι περίπου ίση με τη τάση που δίνουν τα πλαίσια.

- **Χαμηλή τάση αποκοπής:** Όταν η τάση της μπαταρίας πέσει αρκετά κάτω από την κανονική της τιμή, τότε ο ρυθμιστής αποσυνδέει τη μπαταρία από το φορτίο ώστε να διατηρηθεί η καλή κατάσταση της μπαταρίας και να προληφθεί οποιαδήποτε βλάβη συμβεί στον καταναλωτή (φορτίο) όταν στα άκρα του εφαρμοσθεί τάση μικρότερη από την κανονική τάση λειτουργίας του.

- **Υψηλή τάση αποκοπής**. Όταν η τάση της μπαταρίας μεγαλώσει αρκετά, τότε ο ρυθμιστής την αποσυνδέει από τα πλαίσια και έτσι εμποδίζει την υπερφόρτισή της. Σε μια μπαταρία των 12 V η υψηλή τάση αποκοπής είναι μεταξύ 14,5 και 15 V.

- **Ρύθμιση της φόρτισης της μπαταρίας ανάλογα με την Θερμοκρασία της**

Ο ρυθμιστής προσαρμόζει αυτόματα το σημείο τερματισμού της φόρτισης της μπαταρίας ώστε το φορτίο που θα διοχετευθεί στη μπαταρία να είναι μέγιστο σε σχέση με τη θερμοκρασία της.

- **Προστασία πλαισίων από αντίθετο ρεύμα:** Ο ρυθμιστής περιέχει μηχανισμό που εμποδίζει κάποιο ρεύμα να κινηθεί από τη μπαταρία προς τα πλαίσια όταν δεν φωτίζονται ή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το μέγεθος του ρυθμιστή έχει επίσης σημασία ιδίως στην περίπτωση που θα τοποθετηθεί στον ίδιο κλειστό χώρο με τις μπαταρίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

(ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ-ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ)

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο ΦΒ/Θ(ή PV/T) συστήματα αναφερόμαστε στα υβριδικά συστήματα που παράγουν ηλεκτρική και θερμική ισχύ από την ηλιακή ακτινοβολία, ενσωματώνοντας τεχνολογίες τόσο από τον τομέα των Φ/Β όσο και από τον τομέα των Θερμικών Ηλιακών συστημάτων (ΘΗΣ).

Η καρδιά των συστημάτων αυτών είναι ένα ή περισσότερα Φβ/Θ πλαίσια , δηλαδή πλαίσια στα οποία έχει ενσωματωθεί κάποιο σύστημα απαγωγής/ανάκτησης θερμότητας.

Η ιδέα αυτή έχει την αφετηρία της στο γεγονός ότι τα συμβατικά ΦΒ πλαίσια μετατρέπουν μόνο ένα μικρό ποσοστό (10%-15%) από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφούν σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα και συνεπώς χάνεται στο περιβάλλον.

Μία λύση για την αξιοποίηση της θερμότητας αυτής θα ήταν να μπορούμε μεσω της ροής ενός ρευστού (συνήθως νερό ή αέρας) να απορροφήσουμε μέρος της θερμότητας αυτής και να την οδηγήσουμε σε κάποια κατανάλωση , προσθέτοντας παράλληλα ένα θερμικό κέρδος στον συλλέκτη.

Η λύση αυτή φάνηκε αρχικά πολύ χρήσιμη σε ΦΒ εγκαταστάσεις που είχαν ενσωματωθεί σε προσόψεις ή οροφές κτιρίων ^{o}C (BIPV) . Αυτό συνέβη γιατί εκτός της επιπλέον ωφέλιμης ισχύος που προσφέρουν στο κτίριο, αντιμετώπιζουν αποτελεσματικά και ένα από τα εγγενή προβλήματα των εγκαταστάσεων αυτου του τύπου, που είναι η «παγίδευση» θερμότητας στο πίσω μέρος τους που δεν είναι ελεύθερο.

Η θερμότητα αυτή αυξάνει τη θερμοκρασία της οροφής ή της προσοψης μέρι και 50 ^{o}C πάνω από την θερμοκρασία του αέρα, πράγμα ανεπιθύμητο κατά τους θερινούς μήνες .

Επίσης η υψηλή θερμοκρασία μπορει να προκαλέσει αλλοιώσεις στα δομικά υλικά του κτιρίου αλλά και ακόμα και στα ίδια τα ΦΒ στοιχεία.

Πέραν όμως αυτού δεν θα πρέπει να ξεχνάμε πως όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2 , ο βαθμός απόδοσης και συγκεκριμένα η τάση του ΦΒ πλαισίου μειώνεται κατά ένα ποσοστο 0,2%-0,6% για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Έτσι σε μια ακραία αλλά ρεαλιστική περίπτωση η μείωση της ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να φθάσει το 25%.

Δεδομένου ότι το σημαντικότερο μειονέκτημα των ΦΒ ως συσκευές παραγωγής ηλεκτικής ισχύος είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης τους ,θα θέλαμε αυτά να λειτουργούν υπό την βέλτιστη δυνατή θερμοκρασία, ώστε να μην υπάρχουν επιπλέον απώλειες.

Συνεπώς τα ωφέλη ενός ΦΒ/Θ συστήματος εμφανίζονται να είναι αρκετά ώστε να κινήσουν το ενδιαφέρον πολλών κατασκευαστών για την ανάπτυξη διαφορων λύσεων ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για την οποία προορίζονται.

Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν πρωτίστως ως συστήματα ψύξης ενός φβ πάνελ με σκοπό την αύξηση της ισχύος του. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει πρόβλεψη για την αξιοποίηση της απαγόμενης θερμότητας η οποία μπορεί να απορρίπτεται . Τα συστήματα αυτά λειτουργούν καθαρά ως συστήματα ψύξης.

Αυτό θα μπορούσε να συμβαίνει σε μεγάλες εγκατστασεις ηλεκτροπαραγωγής από ΦΒ όπου το οικονομικό ώφελος από την ψύξη τους είναι μεγάλο ενώ η απαγόμενη θερμότητα είναι δυσκολο να αξιοποιθή σε κάποια κατανάλωση.

Αντίθετα μπορεί ο κύριος σκοπός ενός υβριδικού συστήματος να είναι η μέγιστη παραγωγή θερμικής ισχύος όποτε η λειτουργία του πλησιάζει κυρίως αυτή ενός τυπικού θερμικού ηλιακού συστήματος συνεπώς ο σχεδιασμός του μπορεί να περιλαμβάνει ισχυρή μόνωση και τοποθέτηση διάφανου υαλοπίνακα για μείωση των απωλειών θερμότητας, ακόμα και αν αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τον ηλεκτρικο βαθμό απόδοσης.

Σε οικιακές εγκαταστάσεις μπορεί να ακολουθηθεί οποιαδήποτε από τις δύο φιλοσοφίες

σχεδιασμού ωστόσο το θερμικό κέρδος δεν φθάνει αυτό ενός ΘΗΣ λόγω της μειωμένης απορροφητικότητας που παρουσιάζουν τα φβ πλαίσια.

Υπάρχουν αρκετές δυνατότητες συνδυασμού των τεχνολογιών από τα φβ και τα ΘΗ συστήματα και οι πιό βασικές είναι :

- Επιλογή ανάμεσα σε κρυσταλλικό ή άμορφο πυρίτιο ή ακόμα και τεχνολογία thin film για τη φβ γεννήτρια του συλλέκτη
- Επιλογή του μέσου απαγωγής θερμότητας, ανάμεσα κυρίως στο νερό και τον αέρα (ΦΒ/Θ αέρα και ΦΒ/Θ νερού)
- Επιλογή απλού επίπεδου συλλέκτη(FPC) ή και συγκεντρωτικού
- Προσθήκη διαφανούς καλύμματος ή μη για αύξηση της θερμικής απόδοσης

Είναι φανερό πως ο σχεδιασμός του συλλέκτη πρέπει να γίνεται με βάση το είδος της εφαρμογής για την οποία προορίζεται. Για παράδειγμα αν χρειαζόμαστε νερό χαμηλής θερμοκρασίας (εώς 40 ^{o}C) θα επιλέξουμε επίπεδο συλλέκτη και ως μέσο απαγωγής το νερό, ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες θα μπορούσαμε να επιλέξουμε συγκεντρωτικό συλλέκτη.Στην παρούσα φάση οι προοπτικές των Φβ/Θ αέρα φαίνεται να είναι καλύτερες κυρίως γιατί οι ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις είναι εύκολο να τροποποιηθούν.

5.2 BIPV

Τα BIPV(Building Integrated Photovoltaics) είναι τα ΦΒ συστήματα που έχουν ενσωματωθεί σε κτιριακές εγκαταστάσεις συνήθως κατά τη φάση του σχεδιασμού τους.

Πρόκειτε για μία λύση που κερδίζει συνεχώς έδαφος στον κατασκευαστικό τομέα καθώς συνδυάζεται εύκολα με την τάση σχεδίασης ηλιακων παθητικων κτιρίων, δηλαδή κτιρίων που είναι σχεδιασμένα να αξιοποιούν στο μέγιστο το φυσικό φως και τη θερμότητα από τον ήλιο.

Τα τελευταία χρόνα τα BIPV έχουν γίνει αρκετά δημοφιλή κυρίως στις θεωρούμενες αναπτυγμένες , χώρες μέσω των εθνικών προγραμμάτων χρηματοδότησης τους.

Η ενσωμάτωση Φβ πάνελ μειώνει την ενεργειακή εξάρτηση του κτιρίου, καθώς ένα τμήμα από τις ηλεκτρικές του ανάγκες καλύπτεται από τα ΦΒ, ενώ αυξάνει και την εμπορική του αξία. Αν μάλιστα η μελέτη της ΦΒ εγκατάστασης αποτελεί τμήμα του σχεδιασμού του κτιρίου τοτε τα ΦΒ μπορούν να αντικαταστήσουν κάποια από τα δομικά υλικά και να προσδώσουν μία ομοιόμορφη εικόνα.

Τελικά η επιτυχημένη ενσωμάτωση τους απαιτεί τον σωστό σχεδιασμό,τη βελτιστοποίηση της αποδοσης τους και τη καλή συνεργασία του αρχιτέκτονα και του μηχανικού που θα μελετήσει την τοποθέτηση τους.

Τα BIPV μπορούν να αποτελούν τμήμα της οροφής ή της πρόσοψης ενός κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή τοποθετούνται συνήθως στη νότια πευρά του κτιριού

Στην περίπτωση που τα BIPV τοποθετούνται σε ένα έτοιμο κτίριο , οι ΦΒ επιφάνειες μπορούν να είναι τα συνηθισμένα ΦΒ πλαίσια τοποθετημένα στην οροφή(κεκλιμένη ή επίπεδη). Αυτή η λύση είναι κατάλληλη για κτίρια με αρκετό διαθέσιμο χώρο στην οροφή.

σχ.5.1 **ΦΒ πλαισια σε επίπεδη οροφή οικίας** (πηγή : www.pvresources.com)

σχ.5.2 **ΦΒ πλαίσια σε κεκλιμένη οροφή** (πηγή : www.pvresources.com)

Σε εφαρμογές που τα ΦΒ αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του σχεδιασμού χρησιμοποιούνται ηλιακά στοιχεία τελευταίας τεχνολογίας όπως ευκαμπτα κρυσταλλικά στοιχεία, στοιχεία λεπτού υμενίου πάνω σε μεταλλικό υπόστρωμα, πλακίδια με ενσωματωμένα Φβ στοιχεία ως δομικά υλικά, ακομα και διαφανή ή ημιδιαφανή ή και χρωματιστά ηλιακά στοιχεία.

Έτσι οι επιλογές και οι πιθανοί συνδυασμοί τους είναι κάθε άλλο παρά περιοριστικές για τη φαντασία ενός αρχιτέκτονα.

Με τη χρήση π.χ διαφανών στοιχείων σε ένα κτίριο γίνεται εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού ,παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και παράλληλα το κτίριο μπορεί να αποκτήσει άνα πρωτοτυπο και πρωτοποριακό σχέδιο.

σχ.5.3 **διαφανή φβ στοιχεία τοποθετήμενα στοιχείων τοποθετήμενα σε οροφή οικίας (Η.Π.Α)**
(πηγή : www.pvresources.com)

σχ.5.4 **Τοποθέτηση διάφανων φβ στην πρόσοψη αναπαλαιωμένου παραδοσιακού κτιρίου(Μ.Βρετανία)**
(πηγή : www.pvresources.com)

Επίσης τα ΦΒ συστήματα μπορούν να αποτελούν ταυτόχρονα και συστήματα σκίασης (shadow voltaics) και να ακολουθουν μάλιστα την κίνηση του ήλιου για μέγιστη απόδοση.

σχ.5.5 **Κινούμενο σύστημα σκίασης με τη χρήση φβ πλαισίων για σκίαση**

σχ.5.5 **Τοίχος με συνδυασμο διαφανών φβ για φωτισμό και αδιαφανών**
(πηγή : www.pvresources.com)

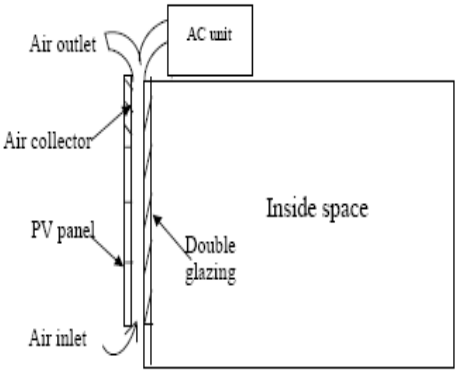
5.3 BIPV και ΦΒ/Θ σύστηματα

Παρόλο που τα BIPV είναι ένα σχετικά νέο πεδίο αναμένεται στο εγγύς μέλλον να αποτελέσουν το σημαντικότερο πεδίο εφαμογής των ΦΒ/Θ τεχνικών και κυρίως αυτών στις οποίες το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας. Άλλωστε με την τοποθέτηση ενός Φβ/Θ συστήματος αέρα και με τη χρήση εναλλάκτη θερμοτητας μπορούν να καλυφθούν οι καταναλώσεις ζεστού νερού.

Πράγματι η επιτυχημένη εγκατάσταση συστήματος απαγωγής/ανάκτησης θερμότητας σε κτιριακές εγκταστάσεις όπου στεγάζονται γραφεία ή σπίτια καθώς και σε δημόσοα κτίρια(νοσοκομεία,σχολεία , υπηρεσίες κ.λ.π) θα μπορούσε να καλύψει κάποιες από τις θερμικές ανάγκες των χώρων αυτών και να συνεισφέρει στον κλιματισμό του κτιρίου ,επιτρέποντας ταυτοχρονα την αποδοτικότερη λειτουργία των ΦΒ συλλεκτών.

Όλα δείχνουν λοιπόν πως η συγχρονη τάση για την κατασκευή αποδοτικότερων ενεργειακά κτιρίων(συνεπώς και φιλικότερων προς το περιβάλλον) μπορεί να αποτελέσει το εφαλτήριο για την αξιοποίηση των ΦΒ/Θ συστημάτων.

Πάντως θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο αποτελεσματικός συνδυασμός BIPV και ΦΒ/Θ συστημάτων είναι μια πρόκληση για κάθε μηχανικό και μία λανθασμένη μελέτη μπορεί να προκαλέσει οικονομικη ζημιά.



Σχ.5.3.1 **Η δημοτική βιβλιοθήκη του Mataro (Ισπανία) και η αρχή λειτουργίς του ΦΒ/Θ συστήματος της.**

Στην πράξη το πρώτο κτίριο στην Ευρώπη που χρησιμοποίησε συνδυασμένο ΦΒ/Θ σύστημα ήταν η δημοτική βιβλιοθήκη του Mataro περιοχή κοντά στη Βαρκελώνη. Η εγκατάσταση έγινε το 1997.Η προσοψη του κτιριου εχει υψος περιπου 6,5 m ενω η συνολικη επιφανεια που καλύπτεται απο ΦΒ φθανει τα 225 m^2

Πίσω από την πρόσοψη υπάρχει κενό διάστημα βάθους 14 cm το οποίο χωρίζει την πρόσοψη απο τον υαλοπίνακα του κτιριου.Προκειται δήλαδη για διπλη πρόσοψη.

Η κυκλοφορία του αέρα είναι φυσική και ο ζεστός αέρας εισάγεται στην κεντρική κλιματιστική μονάδα τον χειμώνα ενώ το καλοκαίρι αποτελει τμημα του φυσικού αερισμού του χώρου.

Αξίζει να αναφερθεί πως η δυσκολία του όλου εγχειρήματος ήταν μεγάλη και πως καταβλήθηκαν επίπονες προσπάθειες για να γίνει ο αναλυτικός υπολογισμός των θερμικών απωλειών,αφού λόγω του μεγέθους και της φυσικής κυκλοφορίας του αέρα , τα ήδη γνωστά μοντέλα δεν έδιναν αρχικά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η τοποθέτηση υβριδικών ΦΒ/Θ συστημάτων σε σπίτια έχει αρχίσει να διαδίδεται και στην Ευρώπη χάρη στο πολύ επιτυχημένο μοντέλο SOLAR WALL της ομώνυμης καναδικής εταιρείας. Προκειται για μια βάση στήριξης των ΦΒ πλαισίων , σχεδιασμένη έτσι ώστε να βελτιώνει τη ροή αέρα κάτω από τα πλαίσια, επιτρέποντας την αποδοτική ψύξη τους.

σχ.5.3.2 **Το προιόν solar wall ως βάση στήρηξης φβ πλαισίων και η τοποθέτηση τους σε οικία στις Η.Π.Α** (πηγή : www.solarwall.com)

5.3.1 Σχεδιαστικές παράμετροι για PV/T

Ένα από τα πρώτα στοιχεία που πρέπει να προσδιορίσουμε για το σύστημα μας είναι το αν το εργαζόμενο μέσο θα είναι ο αέρας ή το νερό. Αυτό εν πολλοίς εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής για την οποια προοριζεται το συστημα και συνήθως στις BIPV εφαρμογές προτιμάται ο αέρας.

Ωστόσο θα πρέπει να συνυπολογιστεί η κλιματικη παράμετρος καθως σε τόπους με θερμό κλιμα το ζεστο νερο έχει μεγαλύτερη εμπορική αξια.

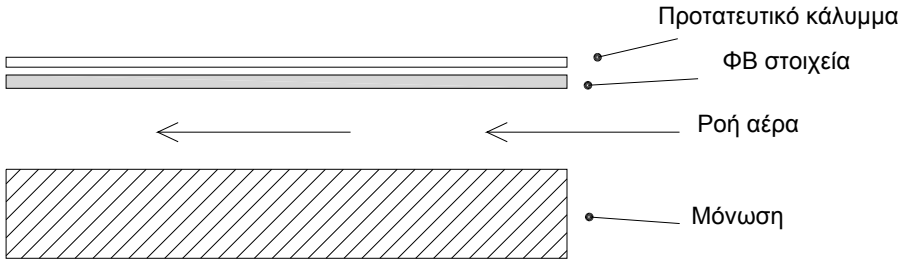
Για τη διαστασιολόγηση του συστήματος λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα

- Θερμοκρασία εξόδου του μέσου
- Θερμικό φορτίο (kWt)
- Ηλεκτρικό φορτίο (kWe)
- Κατάλληλη τοποθέτηση εγκατάστασης (προσανατολισμός,σκίαση)
- Κτιριακοί περιορισμοί (διαθέσιμος χώρος, αντοχή κτιρίου, αισθητική)

Κατά την μελέτη σε BIPV εγκαταστάσεις θα πρέπει το σύστημα να διαστασιολογείται κυρίως με βάση το θερμικό κέρδος για τις χειμερινές ημέρες, αφού συνήθως τέτοια συστήματα είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο και δεν έχουν πρόβλημα ηλεκτροδότησης. Η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος από την ψύξη είναι επιθυμητή κυρίως το καλοκαίρι οπότε και δεν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης.

5.3.2 Τα υβριδικα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα και οι εφαρμογές τους

Η πιό απλή διάταξη ΦΒ/Θ συστήματος είναι η ροή αέρα σε ένα κανάλι πίσω από την επιφάνεια των φβ στοιχείων (αεραγωγός). Αυτή απλή διάταξη είναι και η βασική για την ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων αερισμού των ΦΒ στοιχείων ενώ αποτελει και μία άμεσα υλοποιησιμη διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων. Οποιαδήποτε πρόταση βελτίωσης θα πρέπει να συγκριθεί σε αποδοτικότητα με αυτήν.



σχ.5.3.3 Τυπική διάταξη αερισμού φβ στοιχείων (REF)

Η διάταξη αυτή θα μας απασχολήσει στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας και θα έχει την κωδική ονομασία REF (από το reference).

Θα εξετασθεί επίσης και η περίπτωση τοποθέτησης διαφανούς υαλοπίνακα πάνω από το προστατευτικο κάλυμμα. Θα δούμε ότι κάτι τέτοιο οδηγεί σε υψηλές θερμοκρασίες πάνω στα ΦΒ στοιχεία λόγω των σχετικά φτωχών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και συνεπώς της περιορισμένης ικανότητας ψύξης, επομένως συνήθως δεν συστήνεται για εφαρμογές όπου ο στόχος της εγκατάστασης είναι το ηλεκτρικό κέρδος.

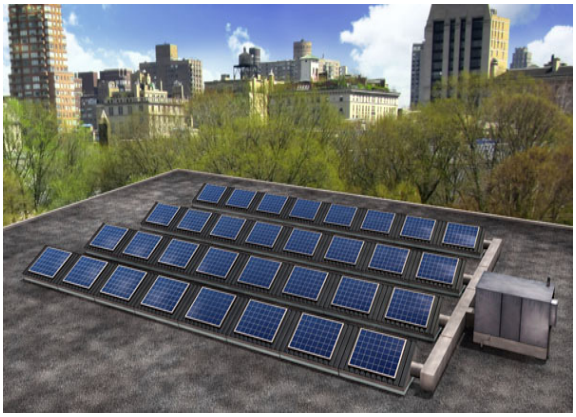
Στο υπολογιστικό τμήμα θα μελετηθεί όπως θα δούμε η βελτίωση του βαθμού απόδοσης μέσω κάποιων φθηνών μετατροπών.

Διάφοροι τύποι ΦΒ/Θ συλλεκτών αέρα παρουσιάζονται παρακάτω, άλλοι είναι πειραματικοί και αυτοσχέδιοι και άλλοι (όπως το σύστημα solar duct) είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο.

Σχ.5.3.4 **Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της απόδοσης τυπικού ΦΒ/Θ συλλέκτη αέρα**

Σχ.5.3.5 **Διάταξη παροχής αέρα όπισθεν των ΦΒ πλαισίων σε βιομηχανία για αξιοποίηση της θερμότητας**
(πηγη : www.ecn.nl)

Σχ .5.3.5 **Ο συλλέκτης PV/T AIR της AIDT MILJO που χρησιμοποιείται για παραγωγή ρεύματος και εξαερισμού σε καταφύγια, τροχόσπιτα,γκαράζ κ.λ.π**



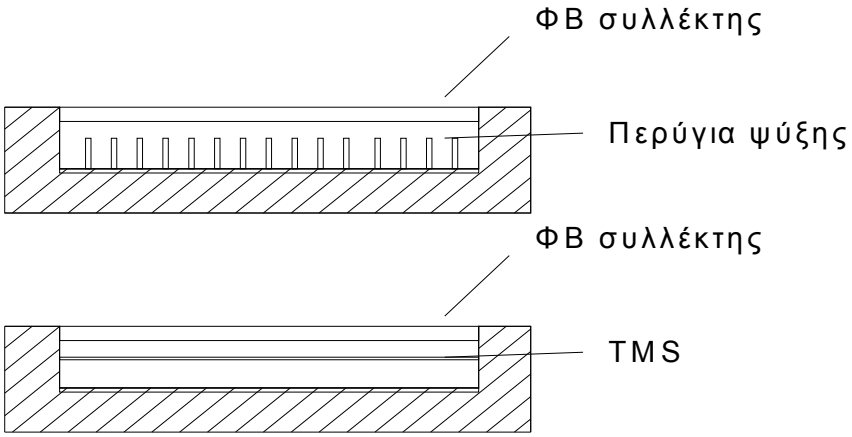
Σχ.5.3.6 **Το σύστημα solar duct της conserval engineering και η τοποθέτηση του στην οροφή κτιρίων με φβ εγκατάσταση** (πηγή: www.solarwall.com)

Προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική απολαβή της τυπικής διάταξης αερισμού έχουν μελετηθεί κάποιοι τρόποι για να αυξηθεί η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μέσα στο αεραγωγό.

Αυτές οι βελτιώσεις περιλαμβάνουν τη χρήση πτερυγίων ψύξης ή την μεσολάβηση μίας ή δύο λεπτών μεταλλικών επιφανειών πριν το πίσω τοίχωμα.

Τα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη των διατάξεων αυτών έχουν δώσει αποτελέσματα πολύ κοντά στις πειραματικά μετρούμενες τιμές.

Στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας αναπτύσσεται ένα τέτοιο μοντέλο, μελετώνται οι περιπτώσεις της προσθήκης πτερυγίων και μεταλλικής επιφάνειας και παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν τα μεγέθη που επηρεάζουν τη λειτουργία του συλλέκτη.

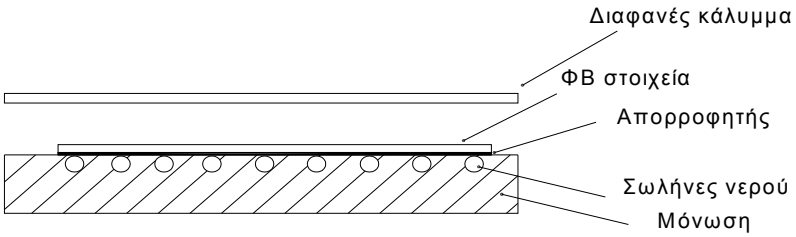


Σχ.5.3.7 Οι διατάξεις FIN και TMS για την βελτίωση της απόδοσης των ΦΒ/Θ συλλεκτών αέρα

5.3.3 Τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού

Οι ΦΒ/Θ συλλέκτες νερού εκμεταλλεύονται τις καλές θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού σε σχέση με τον αέρα. Η τυπική διάταξη όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα είναι όμοια με αυτή των ΘΗ συλλεκτών νερού με τη διαφορά ότι το ηλιακό φώς προσπίπτει πρώτα στα ΦΒ στοιχεία και ο απορροφητής παρλαμβάνει τη θερμότητα που απορρίπτεται και την ακτινοβολία που δεν απορροφήθηκε.

Τελικά η θερμότητα διαβιβάζεται στους σωλήνες νερού και από εκεί σε εναλλάκτες νερού-νερού ή νερού αέρα που τροφοδοτούν τις αντίστοιχες καταναλώσεις.



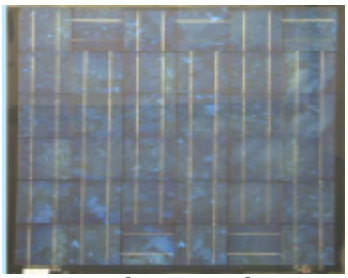
Σχ.5.3.1 Τυπική διάταξη ΦΒ/Θ συστήματος νερού

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι των ΦΒ/Θ νερού είναι πως χάρη στους υψηλούς ρυθμούς ψύξης που επιτυγχάνουν επιτρέπουν τη χρήση υαλοπίνακα και ισχυρής μόνωσης για την αποφυγή απωλειών χωρίς να υπάρχει κίνδυνος έντονης θέρμανσης των ΦΒ στοιχείων.

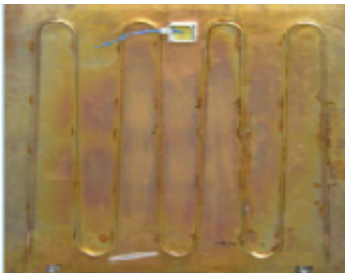
Έτσι αυξάνει ο θερμικός βαθμός απόδοσης τους που ούτως ή άλλως είναι αρκετα μικρότερος απο τον αντιστοιχο ενός παρόμοιου ΘΗΣ λόγω της μειωμένης απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα ΦΒ στοιχεία και της μετατροπής ενός μέρους της σε ηλεκτρισμό.

Τα πρώτα πειραματικά σχέδια για την υλοποίηση οικιακών υβριδικών συλλεκτών νερού, αποτελούνταν από έναν συμβατικό επίπεδο συλλέκτη(FPC) στου οποίου την πλάκα απορρόφησης επικολλούνταν ΦΒ στοιχεία.

Το σημαντικότερο πρόβλημα τους ήταν η μειωμένη διάρκεια ζωής τους και ο φτωχός συνολικός βαθμός απόδοσης λόγω του πρόχειρου σχεδιασμού.



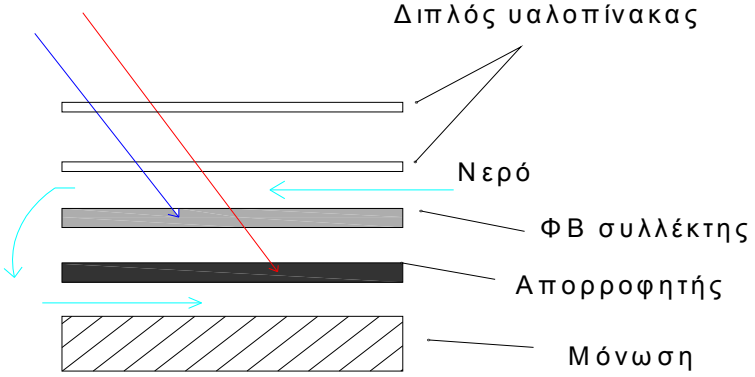
Κοινό ΦΒ πλαίσιο



Οφιοειδής εναλλάκτης θερμότητας νερού κοινού FPC

Σχ.5.3.2 Πειρματικός υβριδικός ΦΒ/Θ συλλέκτης νερού και τα τμήματα του

Μία πιθανη βελτίωση που προτείνεται φαίνεται για τους υβριδικούς συλλέκτες νερού στο ακόλουθο σχήμα και προυποθέτει τη χρήση διαφανών ΦΒ στοιχείων.



Σχ.5.3.2 Βελτιωτική διάταξη για ΦΒ/Θ συλλέκτη νερού

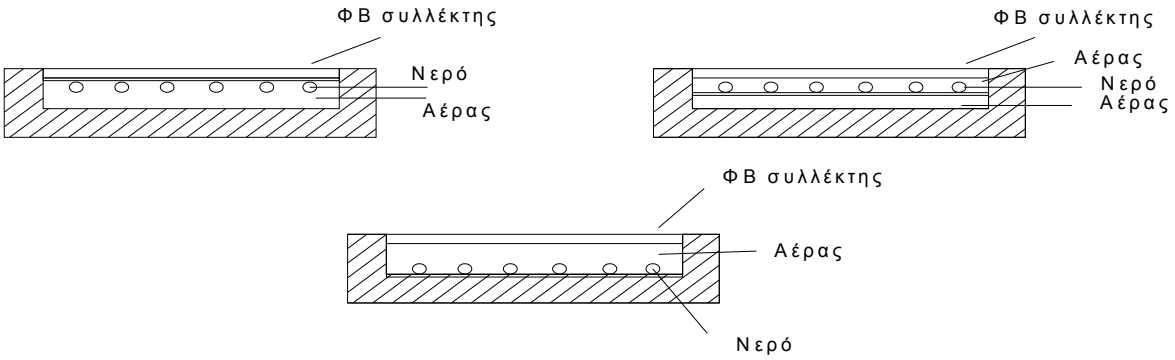
Στην διάταξη αυτή γίνεται μεγιστοποίηση του θερμικού κέρδους χάρη στον διπλό υαλοπίνακα και την επιπλέον διαδρομή του νερού κάτω από τον δευτερεύοντα απορροφητή που είναι μια συνηθισμένη επιφάνεια απορρόφησης.

Η χρήση του νερού ώς ρευστού απολαβής της θερμότητας του ΦΒ είναι αποδοτική όλο τον χρόνο κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα. Αυτές οι διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (<40 ^{o}C) με εφαρμογές σε πισίνες και αντλίες θερμότητας και πιό σπάνια για την παραγωγή ζεστού νερού (>55 ^{o}C)

Σχ.5.3.3 Ο ΦΒ/Θ συλλέκτης νερού της PVTWINS
(πηγή : www.pv-t.org)

5.3.4 Τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού-αέρα

Σε κάποιες μελέτες που διεξάγονται εξετάζονται διατάξεις ταυτόχρονης απαγωγής με αέρα και νερό. Στις υπό μελέτη διατάξεις δοκιμάζονται διάφορες θέσεις για τον εναλλάκτη νερού όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα



5.4 Η χρήση των φβ/θ συστημάτων σε διάφορες εφαρμογές

Αναφέραμε ήδη κάποιες από τις πιθανές χρήσεις της θέρμανσης αέρα ή νερού μεσω ΦΒ/Θ συστημάτων, κυρίως αυτές αφορούν την βελτίωση των συνθηκών διαβίωση ή εργασίας σε κτριακές εγκαταστάσεις.

Ωστόσο υπάρχουν και αρκετές βιομηχανίες που έχουν ανάγκη από θερμό αέρα(π.χ ξήρανση βιοκαυσίμων,προθέρμανση αέρα καύσης) και νερό.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται κάποιες πιθανές εφαρμογες και αξιολογείται η ικανότητα κάθε συστήματος να τις εκπληρώσει,βάσει των θερμικών χαρακτηριστικών απαγόμενου μέσου και της απαίτησης του φορτίου.

ΑΓΟΡΑ	ΤΥΠΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	PVT-NEPOY (GL)	PVT-NEPOY (UNGL)	PVT-NEPOY (UNGL) +ΑΝΤΛΙΑ	PVT-AEPA(GL)	PVT-AEPA(UNGL)	PVT-ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ
Μεσος Καταναλωτης	Ζεστό νερό	+++					
	Ζεστοό νερο+Θερμός αέρας	+		+++	+		
	Θέρμανση πισίνας		+++				
Τριτογενεις Εφαρμογες	Θέρμανση γραφείων						
	Ηλιακός δροσισμός				+	+	++
	Δημόσιες πισίνες	++	++				
Γεωργια	Ηλιακή Ξήρανση				+	+	
	Ζεστό νερό	+	+				
Βιομηχανια	Νερό θερμικών διεργασιών	+	+				
	Θέρμανση χώρων			+		+	
	Ηλιακός δροσισμός						+

(πηγη : www.iea-shc.org/task 35)

5.5 Η χρήση ΦΒ/Θ σε μικρές εγκαταστάσεις

Με την απόφαση του κράτους να επιτραπεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ιδιωτικές φωτοβολταικές εγκαταστάσεις, την παροχή κινήτρων και την διευκόλυνση των διαδικασιών ,αναμένεται όπως όλα δείχνουν σημαντική αύξηση του αριθμού των μικρών , οικιακών ΦΒ συστημάτων στη χώρα μας.

Όπως γίνεται φανερό λοιπόν, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία των ΦΒ / Θ συστημάτων θα ειναι να καταφέρουν να φερουν τα πλεονεκτηματα τους στον μέσο καταναλωτη και να αποτελεσουν λυση για την κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών αναγκών σε κατοικίες.

Τα ΦΒ συστηματα που τοποθετουνται στις οροφές των κτιρίων αποτελούν μια πολύ καλή περίπτωση για εγκατάσταση διατάξεων απαγωγής θερμότητας . Τέτοιες εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν σχεδόν σε όλες ταράτσες των πολυκατοικιών της Αθήνας.

Η χρήση ΦΒ/Θ συστημάτων μπορεί να αποτελέσει τη λύση για συνδυασμένη παραγωγή καθώς η τοποθέτηση ανεξάρτητων συστημάτων ΦΒ πλαισίων και ΘΗΣ θα δημιουργούσε πρόβλημα χώρου και ενδεχομένως ένα κακο αισθητικό αποτέλεσμα.

Σε κάθε περίπτωση βέβαια θα πρέπει να θυμόμαστε ότι για τη βέλτιστη απόδοση των ΦΒ και των ΦΒ/Θ συστημάτων θα πρέπει να γίνεται ειδική μελέτη κατά τη φάση σχεδιασμού ενός νέου κτιρίου, όμως και τα παλαιότερα μπορουν να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματά τους

Εξάλλου σε σχετική έρευνα που έχει διενεργηθεί ,πολλοί κατασκευαστές κτιρίων στην Ευρώπη εμφανίστηκαν θετικοί στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ΦΒ/Θ συστήματα ενώ και πολλοί αρχιτέκτονες τόνισαν την σημασία ακριβώς της εξοικονόμησης χώρου στις οροφές από τον συνδυασμό δύο συστημάτων σε ένα. Επίσης θεώρησαν οτι η ενσωμάτωση ΦΒ υλικών στοιχείων στην ίδια τη δομή του κτιρίου είναι μια ενδιαφέρουσα προοπτική.

Πάντως το τελικό οικονομικό ώφελος επηρρεάζεται σημαντικά από τα οικονομικά κίνητρα(επιδοτήσεις, φοροελαφρύνσεις) που δίνουν οι κυβερνήσεις των διαφόρων ευρωπαικων χωρων για την τοποθετηση ΦΒ συστηματος.

Ωστόσο οι περισσότεροι συμφώνησαν πως τα συστήματα αυτά πρέπει να εξελιχτούν και να μελετηθούν ακόμα ώστε να καταστούν μια σίγουρη και βιώσιμη λύση.

Ακολουθεί μία καταγραφή των σημαντικότερων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της
εφαρμογής ΦΒ/Θ συστημάτων σε αστικά κτίρια

Μειονεκτήματα

- Τα περισσότερα κτίρια χρειάζονται θέρμανση το χειμώνα όταν και το ηλεκτρικό φορτίο είναι χαμηλότερο. Αυτό σημαίνει οτι αν δοθεί βάση στην αξιοποίηση των θερμικών χαρακτηριστικων του συνδυασμενου συλλεκτη, θα μειωθει περεταιρω η ηλετροπαραγωγη.

- Η θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης απαιτεί ασφαλώς τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας για λόγους υγιεινής

- Η κατασκευή του υβριδικού συστήματος μπορεί να είναι πολυπλοκότερη και συνεπώς ακριβότερη από τη χρήση δύο ανεξάρτητων συστημάτων

Πλεονεκτήματα

- Η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνουν ειναι μικρότερη από δύο ανεξάρτητες εγκαταστάσεις
- Η οροφή ή η πρόσοψη έχει ομοιόμορφη , αισθητικά αποδεκτή, εμφάνιση

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΜΕΡΟΣ Α’

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ REF , TMS , FIN

Α 1.1 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα για όλους τους λόγους που αναλύθηκαν σε προηγούμενες παράγραφους, μετατρέπουν μόνο ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ισχύ. Το υπόλοιπο γίνεται θερμότητα τόσο στα ίδια τα κύτταρα όσο και στο υπόστρωμα τους ανεβάζοντας έτσι αρκετά τη θερμοκρασία λειτουργίας τους,γεγονός που έχει αρνητική επίδραση στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσής τους,μειώνοντας έτσι περαιτέρω την ικανότητα τους να παράγουν ηλεκτρική ισχυ.

Δεδομένου πως ο χαμηλός βαθμός απόδοσής τους σε συνδυασμό με την αρκετά υψηλή τιμή τους δημιουργεί εμπόδια στην διάδοσή των φωτοβολταικών συλλεκτών,θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον να εξετασθεί κατά πόσο είναι δυνατό με μικρές και συνακολούθως φθηνές μετατροπές να εγκαταστήσουμε ένα αποδοτικό σύστημα ψύξης που θα κρατάει τη θερμοκρασία τους σε χαμηλά επίπεδα.

Η τεχνολογία ψυχόμενων Φ/Β συλλεκτών βοηθά να απορροφήσουμε μέρος της θερμότητας αυτής και να το χρησιμοποιήσουμε για πρακτικές εφαρμογές. Έτσι βοηθά ταυτόχρονα και στην ψύξη των Φ/Β στοιχείων με αποτέλεσμα την διατήρηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Τόσο το νερό όσο και ο αέρας αποτελούν ιδανικές επιλογές ως συνήθως για την ψύξη του συλλέκτη.Με την ψύξη του Φ/Β συλλέκτη δημιουργείται ένα Φωτοβολταϊκό-Θερμικό σύστημα νερού ή αέρα (PV/T water ή PV/T air). Αναλόγως λοιπόν με την μετέπειτα χρήση του μέσου ψύξης μπορεί να επιλέξουμε ένα από τα δύο.

Άν απλώς θέλουμε να ψύξουμε τον συλλέκτη μας προκειμένου να αυξηθεί ο ηλεκτρικός β.α του τότε η επιλογή του νερού είναι πιο δαπανηρή τόσο ως κόστος κατασκευής , όσο και λειτουργίας ενώ αυτή του αέρα πιο φθηνή αλλά λιγότερο αποδοτική λόγω των φτωχών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του.

Η ενσωμάτωση των αεριζόμενων Φ/Β πλαισίων στις προσόψεις κτιρίων ή στις οροφές αυτών αποτελεί μια πολύ καλή λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας , ζεστού νερού και αέρα κλιματισμού και μάλιστα αν η ενσωμάτωση αυτή γίνει κατά το σχεδιασμό του κτιρίου(BIPV) εμφανίζει πολλά ωφέλη όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αυτή είναι και η πιό βιώσιμη εμπορική λύση για την αξιοποίηση των Φ/Β συλλεκτών για παραγωγή ρεύματος σε κτιριακες εγκαταστάσεις (**Ενεργητικά ηλιακά κτίρια**).

Όσον αφορά τις βιομηχανικές εφαρμογές οι δυνατότητες είναι ακόμα περισσότερες καθώς ο θερμός αέρας, εκτός από τον κλιματισμό μπορεί να κατευθυνθεί και σε διεργασιες όπως είναι για παράδειγμα η ξήρανση ή η προθέρμανση αέρα καύσης.

Κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η κατασκευή απλών θεωρητικών μοντέλων για τη μελέτη κάποιων μικρών και φθηνών βελτιώσεων που συνίστανται στην αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας του τυπικού υβριδικού ΦΒ/Θ συλλέκτη.

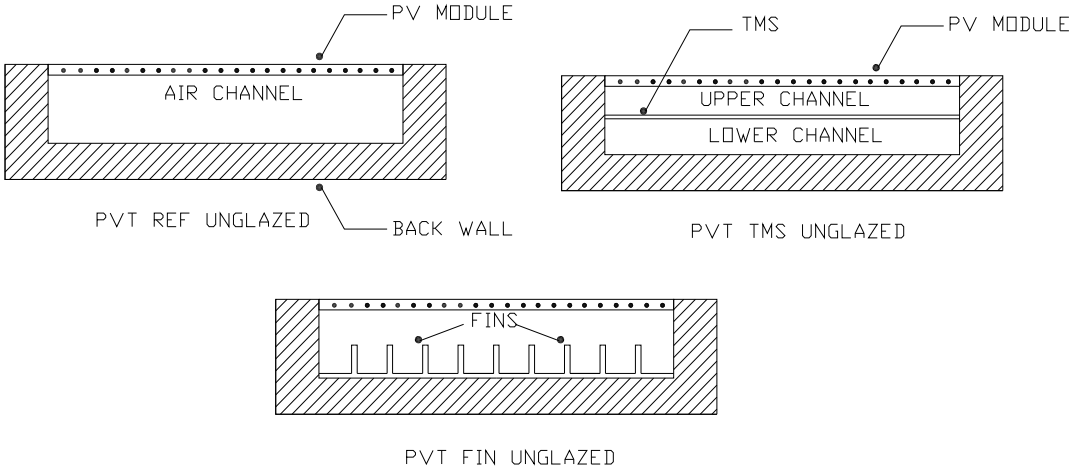
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι υπό μελέτη βελτιωτικές διατάξεις, καταστρώνονται οι εξισώσεις του προβλήματος,καθορίζονται οι παράμετροι που το επηρεάζουν και εξάγονται αποτελέσματα με τη μορφή διαγραμμάτων. Τέλος αναφέρονται τα κυριοτερα συμπεράσματα της μελέτης.

Α 1.2 Οι διατάξεις REF,TMS,FIN

Στην παρούσα εργασία έχει γίνει προσπάθεια να μελετηθούν παραμετρικά δύο απλές και φθηνές μέθοδοι απαγωγής της θερμότητας των Φ/Β στοιχείων με αέρα, που αποτελούν βελτιώσεις της τυπικής μεθόδου όπου ο αέρας διαβιβάζεται στο πίσω τμήμα της πλάκας απορρόφησης (**REF**).

Στην πρώτη τοποθετούμε μεταξύ του συλλέκτη και του οπίσθιου τοιχώματος , μέσα στο ρεύμα αέρα δηλαδή , μια λεπτή μεταλλική πλάκα απορρόφησης (**Thin metal sheet ή TMS**),ενώ στη δεύτερη η αφαίρεση γίνεται με πτερύγια ψύξης (**FIN**) που είναι πακτωμένα στο πίσω τοίχωμα.

Και οι δύο αυτές διατάξεις(Σχ. Α.1.1) είναι σχετικά εύκολα υλοποιήσιμες ενώ και τα υλικά κατασκευής τους είναι σχετικά φθηνά .



Σχ.Α.1.1 Τα συστήματα REF,TMS,FIN (UNGLAZED)

Α 1.3 Ο ρόλος της μόνωσης

Είδαμε ότι στα υβριδικά ΦΒ συστήματα γίνεται προσπάθεια τόσο να ψυχθούν τα ΦΒ κύτταρα , όσο και να γίνει εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας που παραλαμβάνει το ρευστό ψύξης.

Στους συνηθισμένους θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες πρέπει να μειώσουμε όσο το δυνατό περισσότερο τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Γιά να γίνει αυτό τοποθετείται μονωτικό υλικό τόσο κάτω από το κανάλι ροής όσο και περιμετρικά. Το πάχος της μόνωσης εξαρτάται προφανώς από το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε .

Όπως γίνεται αντιληπτό , ο εγκλωβισμός της θερμότητας εξυπηρετεί την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης ,όμως θα πρέπει να συνδυάζεται και με υψηλές παροχές του ρευστού απαγωγής ώστε να μην αναπτύσσονται θερμοκρασίες τέτοιες που να μειώνουν πολύ την απόδοση του ΦΒ .

Όπως λοιπόν θα δούμε σε όλη τη διάρκεια της μελέτης μας τα πάντα είναι θέμα ισορροπίας ανάμεσα στις θερμικές και τις ηλεκτρικές απαιτήσεις από τον συλλέκτη καθώς η θερμική και η ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη είναι μεγέθη ανταγωνιστικά καθώς η μεν αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας ωφελεί τη θερμική απόδοση ενώ η δε μείωση της την ηλεκτρική.

Το πάχος της μόνωσης είναι μια παράμετρος που θα μας απασχολήσει παρακάτω στη μελέτη.

Α 1.4 Ο ρόλος του διάφανου καλύμματος

Είδαμε ότι η μείωση των απωλειών πυθμένα και των περιμετρικών απωλειών επιτυγχάνεται με τη χρήση μόνωσης. Ωστόσο ένα σημαντικό ποσοστό της διαθέσιμης θερμικής ισχύος διαφεύγει από την κορυφή του συλλέκτη.

Η χρήση λοιπόν γυάλινου ή πλαστικού διαφανούς καλύμματος που είναι και αυτό πολύ συνηθισμένο στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες,είναι επιβεβλημένη για την μείωση των απωλειών κορυφής .

Παρουσιάζει δε διπλό όφελος γιατί προστατεύει την πλάκα απορρόφησης από φθορές λόγω π.χ κακοκαιρίας,ενώ αυξάνει δραματικά τον θερμικό βαθμό απόδοσης αφού το διάκενο ανάμεσα στην πλάκα και το κάλυμμα δρα ως επιπλέον μόνωση μειώνοντας έτσι σημαντικά τις θερμικές απωλειές.

Απαραίτητη προυπόθεση βέβαια είναι να εμφανίζει ελάχιστη ανακλαστικότητα και αντίστοιχα υψηλή διαπερατότητα,ώστε να αξιοιποιείται το μεγαλύτερο τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας

Το κάλυμμα τοποθετείται σε κάποια απόσταση από την πλάκα απορρόφησης (PV πάνελ) και ο αέρας που εγκλωβίζεται στο διάκενο έχει το ρόλο μόνωσης.

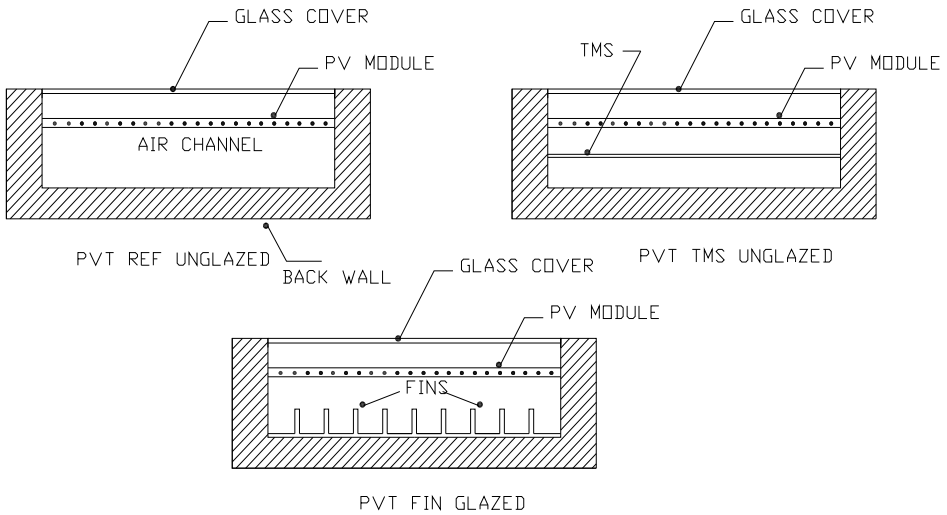
Ωστόσο η χρήση του καλύμματος σε Φ/Β συλλέκτες που ψύχονται με αέρα δεν ενδείκνυται πάντα οπως θα δούμε και παρακάτω στη μελέτη μας.

Το κάλυμμα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της πλάκας και συνεπώς μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης των στοιχείων.

Έτσι μπορεί ο θερμικός β.α να αυξάνει σημαντικά ωστόσο, είναι ο ηλεκτρικός β.α που μας ενδιαφέρει περισσότερο συνήθως και για να διατηρηθεί αυτός σε λογικά επίπεδα πρέπει να αυξήσουμε την παροχή του ρευστού ψύξης.

Τα καλύμματα που χρησιμοποιούνται στους ΦΒ συλλέκτες ειναι από γυαλί με χαμηλή περιεκτικότητα σιδήρου (low iron glass), με υψηλή διαπερατότητα απο το ηλιακό φως($\tau \simeq 0{,}92$).

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι διατάξεις PVT,REF,FIN στις οποίες έχει προστεθεί κάλυμμα



Σχ.Α.1.2 Τα συστήματα REF,TMS,FIN (GLAZED)

Ακολουθούν πίνακες που συγκεντρώνουν όλα τα μεγέθη – παραμέτρους που θα εξεταστούν κατά τη μελέτη μας και τα σύμβολα τους.

Πίνακας Α.1.1 Ελληνικά σύμβολα

a	Συντελεστής απορρόφησης των Φ/Β στοιχείων
τ	Συντελεστής διάβασης των Φ/Β στοιχείων
δ_{ins}	Πάχος μόνωσης
ε_i	Συντελεστής εκπομπής στοιχείου i
η_{el}	Ηλεκτρικός βαθμος απόδοσης Φ/Β panel
η_{fin}	Βαθμός απόδοσης πτερυγίων
η_{th}	Θερμικός βαθμός απόδοσης
β_{ref}	Συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης με τη θερμοκρασία

Πίνακας Α.1.2 Άλλα σύμβολα

A_{cf}	m^2	Εμβαδό εγκάρσιας τομής πτερυγίου
A_{int}	m^2	Εμβαδό εσωτερικής επιφάνειας συναγωγής
A_{pv}	m^2	Εμβαδό επιφάνειας συλλέκτη
L	m	Μήκος καναλιού
D_H	m	Υδραυλική διάμετρος ροής αέρα
H	m	΄Υψος πτερυγίου
f	—	Συντελεστής τριβής της ροής του αέρα
m	kg/sec	Παροχή μάζας αέρα
Re	—	Ο αριθμός Reynolds της ροής
r	—	Ο λόγος παράκαμψης της ροής
h_c	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ο συντελεστής συναγωγής στον αγωγό
h'_c	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του PV και του υαλοπίνακα
$h_{r,PV-g}$	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ο συντελεστής ακτνοβολίας μεταξύ του PV και του υαλοπίνακα
$h_{r,PV-T}$	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ο συντελεστής ακτινοβολίας μεταξύ του PV και της μεταλλικής επιφάνειας
$h_{r,PV-T}$	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του PV καιτου οπισθίου τοιχώματος
$h_{r,T-w}$	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ της μεταλλικής επιφάνειας και του οπισθίου τοιχώματος
C_p	$\frac{J}{kg \times K}$	Συντελεστής θερμοχωρητικότητας του αέρα

(συνέχεια)

G	$\frac{W}{m^2}$	Στιγμιαία ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας
N	$-$	Πλήθος πτερυγίων
Nu	$-$	Αριθμός Nusselt της ροής
Pr	$-$	Αριθμός Prandtl της ροής
ΔP	Pa	Πτώση πίεσης του αέρα κατά τη διέλευση του από το κανάλι
H_L	m	Ύψος απωλειών πίεσης
T_a	K	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
T_f	K	Μέση θερμοκρασία ρευστού(αέρα)
T_g	K	Θερμοκρασία υαλοπίνακα
T_{in}	K	Θερμοκρασία εισόδου του αέρα
T_{out}	K	Θερμοκρασία εξόδου του αέρα
T_{PV}	K	Θερμοκρασία φωτοβολταικού πάνελ
T_T	K	Θερμοκρασία μεταλλικής πλάκας
T_W	K	Θερμοκρασία οπισθίου τοιχώματος
C_p	$\frac{J}{kg \times K}$	Συντελεστής θερμοχωρητικότητας του αέρα
U_b	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Συντελεστής απωλειών πυθμένα
U_L	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Ολικός συντελεστής απωλειών
U_t	$\frac{W}{m^2 \times K}$	Συντελεστής απωλειών κορυφής
V_W	$\frac{m}{sec}$	Ταχύτητα εξωτερικής ροής αέρα
v	$\frac{m}{sec}$	Ταχύτητα αέρα στον αγωγό
σ	$\frac{W}{m^2 \times K^4}$	Σταθερά Stefan-Boltzmann

Α 1.5 Αναλυτική εξίσωση φ/β συλλέκτη

Στην εκτενή αυτή παράγραφο θα δωθεί αναλυτικά η διαφορική εξίσωση που εκφράζει την ισορροπία ισχύος σε έναν φ/β συλλέκτη που βρίσκεται σε θερμική επαφή με το περιβάλλον .

Η εξίσωση αυτή θα προκύψει από τον θερμικό ισολογισμό σε ένα στοιχείο όγκου dV του συλλέκτη .

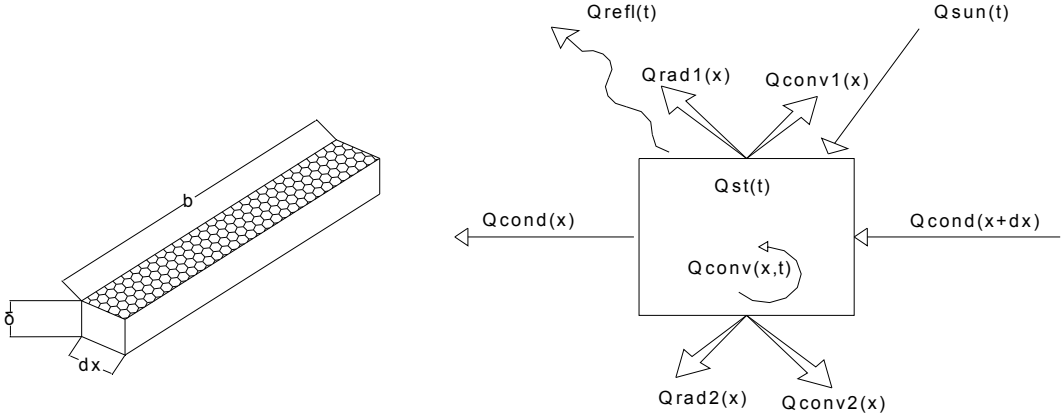
Η ανάλυση δεν διαφέρει πολύ από αυτή που γίνεται στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες (FPC), με τη διαφορά ότι η ύπαρξη του φωτοβολταϊκού φαινομένου έχει

σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση ενός τμήματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας .

Κατ'αρχάς γίνεται η παραδοχή **μονοδιάστατης** και πλήρως ανεπτυγμένης ροής του ρευστού(αέρα) στο εσωτερικό του αγωγού μεταφοράς. Η παραδοχή αυτή απλουστεύει αρκετά τους συλλογισμούς αλλά δεν απέχει και πολύ από την πραγματικότητα ενός θερμικού ηλιακού συλλέκτη.

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει λαμβάνονται υπ'όψη όλες οι αιτίες μεταφοράς,παραγωγής,κατανάλωσης και αποθήκευσης θερμότητας σε ενα στοιχειώδες τμήμα του συλλέκτη.

Έστω λοιπόν το στοιχειώδες τμήμα του συλλέκτη με διαστάσεις dx,b,δ, όπως φαίνεται παράκατω.



Σχ.Α.1.3 Ροή ισχύος από ένα στοιχείο PV

Εξίσωση διατήρησης ισχύος :

$$\dot{Q}_{IN}=\dot{Q}_{OUT}$$

η οποία αναλυτικά δίνει την:

$$\dot{Q}_{sun}+\dot{Q}_{cond(x+dx)}=\dot{Q}_{refl}+\dot{Q}_{cond(x)}+\dot{Q}_{st}+\dot{Q}_{conv}+\dot{Q}_{cond1}+\dot{Q}_{rad1}+\dot{Q}_{cond2}+\dot{Q}_{rad2}$$

και με αναδιάταξη των όρων:

$$\underbrace{\left(\dot{Q}_{sun}-\dot{Q}_{refl}\right)}_{1}-\underbrace{\left(\dot{Q}_{cond(x+dx)}+\dot{Q}_{cond(x)}\right)}_{2}-\underbrace{\left(\dot{Q}_{conv1}+\dot{Q}_{rad1}+\dot{Q}_{conv2}+\dot{Q}_{rad2}\right)}_{3}-\underbrace{\dot{Q}_{st}}_{4}-\underbrace{\dot{Q}_{conv}}_{5}=0 \quad \textbf{(A.1.1)}$$

Ο όρος 1 εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της συνολικά προσπίπτουσας ισχύος και των οπτικών απωλειών και ισούται με την διαθέσιμη θερμική ισχύ :

$$\dot{Q}_{tot}=\dot{Q}_{SUN}-\dot{Q}_{refl}$$

Έστω ότι $(\tau\cdot\alpha)$ είναι το γινόμενο απορροφητικότητας του συλλέκτη και διαπερατότητας του καλύμματος , που εκφράζει τις οπτικές απώλειες.

Θα ισχύει :

$$\dot{Q}_{refl}=(1-\tau\cdot\alpha)\cdot\dot{Q}_{sun} \quad \text{ή} \quad \dot{Q}_{tot}=(\tau\cdot\alpha)\cdot\dot{Q}_{SUN} \qquad \textbf{(A.1.2)}$$

Ο όρος **5** εκφράζει την θερμική ισχύ η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική απο το Φ/Β στοιχείο. Από την θερμική ισχύ που προσπίπτει στο Φ/Β κύτταρο μόνο ένα ποσοστό μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ.

Αν εισάγουμε λοιπόν τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης n_{el} τότε ο όρος αυτός γίνεται :

$$\dot{Q}_{conv} = n_{el}\cdot\dot{Q}_{tot} \qquad \textbf{(A.1.3)}$$

Έτσι τελικά :

$$\dot{Q}_{tot}-\dot{Q}_{conv}=\dot{Q}_{tot}-n_{el}\cdot\dot{Q}_{tot}=\left(1-n_{el}\right)\cdot\dot{Q}_{tot}=\left(1-n_{el}\right)\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot\dot{Q}_{SUN}$$

Αν τώρα συμβολίσουμε με $G(t)\left(\frac{W}{m^2}\right)$ την ολική ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας ανα μονάδα επιφάνειας τότε ειναι :

$$\dot{Q}_{SUN}=G(t)\cdot A_p$$

συνεπώς :

$$\dot{Q}_{tot}-\dot{Q}_{conv}=\left(1-n_{el}\right)\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot G(t)\cdot A_p$$

και καθώς πρόκειται για διαφορικό τμήμα επιφάνειας του συλλέκτη :

$$\dot{Q}_{tot}-\dot{Q}_{conv}=\left(1-n_{el}\right)\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot G(t)\cdot b\cdot dx \qquad \textbf{(A.1.4)}$$

Ο 2ος όρος εκφράζει τη διαφορά ροής θερμότητας λόγω αγωγής απο τη θέση x+dx στη θέση x η οποία από το νόμο του Fourrier για την αγωγή,μπορεί να γραφεί και ως :

$$\dot{Q}_{cond}(x)=-k_{pv}\cdot\frac{dT}{dx}\Big|_{(x)}\cdot\delta\cdot b$$

και

$$\dot{Q}_{cond}(x+dx)=-k_{pv}\cdot\frac{dT}{dx}\Big|_{(x+dx)}\cdot\delta\cdot b$$

Τελικά :

$$\dot{Q}_{cond}(x+dx)-\dot{Q}_{cond}(x)=-k_{pv}\cdot\frac{dT}{dx}\Big|_{(x+dx)}\cdot\delta\cdot b+k_{pv}\cdot\frac{dT}{dx}\Big|_{(x)}\cdot\delta\cdot b$$

που δίνει :

$$\dot{Q}_{cond}(x+dx)-\dot{Q}_{cond}(x)=-k_{pv}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\cdot dx\cdot\delta\cdot b \qquad \textbf{(A.1.5)}$$

Ο όρος 4 εκφράζει το ρυθμό αποθήκευσης θερμότητας στο στοιχείο και επομένως γράφεται :

$$\dot{Q}_{st}(x,t)=\rho_{pv}\cdot C_{pv}\cdot\frac{\partial T}{\partial t}\cdot dx\cdot\delta\cdot b \qquad \textbf{(A.1.6)}$$

Ο όρος 3 ειναι η θερμική ισχύς που κατευθύνεται προς το περιβάλλον .

Συγκεκριμένα :

$$\dot{Q}_{conv1}=h_{c1}\cdot(T_p(x)-T_a)\cdot b\cdot dx \qquad \textbf{(A.1.7)}$$

είναι οι θερμικές απώλειες συναγωγής προς το πάνω τμήμα

$$\dot{Q}_{rad1}=h_{rpa}\cdot(T_p(x)-T_a)\cdot b\cdot dx \qquad \textbf{(A.1.8)}$$

είναι οι θερμικές απώλειες ακτινοβολίας προς το πάνω τμήμα

$$\dot{Q}_{conv2}=h_{c2}\cdot(T_p(x)-T_f(x))\cdot b\cdot dx \qquad \textbf{(A.1.9)}$$

είναι η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει το ρευστό θερμοκρασίας $T_f(x)$ απο την επιφάνεια δηλαδή η στοιχειώδης ωφέλιμη θερμική ισχύς dQ_u

$$\left(1-n_{el}\right)\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot G(t)-k_{pv}\cdot\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2}\delta-\left((h_{c1}+h_{rpa})\cdot(T_p(x)-T_a(t))+h_{c2}\cdot(T_p(x)-T_f(x))+\dot{Q}_{rad2}\right)-\rho_{pv}\cdot C_{pv}\cdot\frac{\partial^2 T_p}{\partial t}\cdot\delta=0 \qquad \textbf{(A.1.10)}$$

Η πιό πάνω αποτελεί τη μερική διαφορική εξίσωση διατήρησης της ισχύος στο στοιχειώδες τμήμα του Φ/Β πάνελ για μονοδιάστατη,πλήρως ανεπτυγμένη ροή.

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

α) Θεωρούμε ότι η ροή ακτινοβολίας είναι σταθερή δηλ.: $G \neq G(t)$ και ότι $T_a \neq T_a(t)$ τότε μετά από κάποιο εύλογο χρόνικο διάστημα το σύστημα θα ισορροπήσει και δεν θα παρουσιάζει μεταβολές με τον χρόνο . Τότε θα ισχύει :

$$T_p \neq T_p(t) \rightarrow \frac{\partial T_p}{\partial t}=0$$

Η παραδοχή της μόνιμης κατάστασης βέβαια **δεν ισχύει** στην περίπτωση της χρονικής μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Έχει αποδειχτεί **στην πράξη** ωστόσο πως ο μη μόνιμος όρος μπορεί να θεωρηθει **αμελητέος** ακόμη και στην περίπτωση που ο συλλέκτης έχει πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα.

Έτσι μπορούμε πάντα να κάνουμε την παραδοχή $\frac{\partial T_p}{\partial t}=0$ να θεωρούμε δηλαδή πως βρισκόμαστε σε σχεδόν μόνιμη κατάσταη (quasi steady state) και πως κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου (μικρού) χρονικού διαστήματος **Δt** τα μεγέθη της **ακτινοβολίας** και της **εξωτερικής θερμοκρασίας** , παραμένουν σταθερα.

β) Θεωρούμε ότι σε αυτήν την κατάσταση ισορροπίας η θερμοκρασία του συλλεκτη, είναι σταθερή δηλαδή $T_p \neq T_p(x)$, γεγονός που δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα αφού η θερμοκρασία του πάνελ μεταβάλλεται ελάχιστα στους πραγματικούς συλλέκτες.

τότε θα είναι και : $\frac{d^2T}{dx^2}=0$.

γ) Η θερμοκρασία του τοιχώματος $\mathbf{T_w}$ παραμένει και αυτή σταθερή κατά μήκος της ροής :

$$T_w \neq T_w(x)$$

δ) Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των ΦΒ στοιχείων είναι γραμμική και φθίνουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας τους:

$$n_{el}=n_{ref}\cdot\left(1-\beta\cdot(T_p-T_{ref})\right) \qquad \textbf{(A.1.11)}$$

ε) Η θερμοκρασία του που λαμβάνεται στους υπολογισμούς είναι:

$$T_f=\frac{T_{in}+T_{out}}{2}$$

Με τις ανωτέρω παραδοχές η (2) παίρνει την απλή **<u>αλγεβρική</u>** μορφή :

$$\left(1-n_{el}\right)\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot G_T-\left((h_{c1}+h_{rpa})\cdot(T_p-T_a)+h_{c2}\cdot(T_p-T_f)+h_{rpw}\cdot(T_p-T_w)\right)=0 \qquad \textbf{(A.1.12)}$$

και με το $\mathbf{n_{el}}$ να εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία η (A.1.12) είναι μια αλγεβρική εξίσωση 4ου βαθμου ως προς τις Tp,Tw και πρώτου βαθμού ως προς την Tf.

Αυτή την εξίσωση θα χρησιμοποιούμε στην ανάλυση όλων των συστημάτων ψύξης των Φ/Β πάνελ με αέρα που θα ακολουθήσει .

<u>Α 1.6 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενης διάταξης</u>

Αναφέρεται ότι τα Φ/Β στοιχεία είναι από πολλυκρυσταλλικό πυρίτιο **pc–Si** που είναι και τα πιό διαδεδομένα σε εμπορικές εφαρμογές.

Η κλίση του συλλέκτη έχει ρυθμιστεί να είναι 38° προς το Νότο,όσο δηλαδή και το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας και οι διαστάσεις του πάνελ είναι 1m x 0,4m ,σε όλες τις υπό δοκιμή διατάξεις (στο Α τμήμα), με αποτέλεσμα το εμβαδό της επιφάνειας να είναι $\mathbf{A_c=0{,}4m^2}$

Οι οπτικές απώλειες απο το κάλυμμα ή τον υαλοπίνακα λαμβάνονται από το γινόμενο (τα) όπου **τ** είναι ο συντελεστής διάβασης του προστατευτικού ή του υαλοπίνακα , και **α** είναι ο συντελεστής απορρόφησης των ΦΒ κυττάρων.

Το πάνελ των ΦΒ στοιχείων καλύπτεται με ένα πολύ λεπτό διαφανές πλαστικό προστατευτικό. Αυτό έχει πολύ υψηλή διαπερατότητα(ARC) και δεν εμποδίζει την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης προστατεύει το πάνελ απο αντίξοες καιρικές συνθήκες (χιόνι, χαλάζι)

Στην περίπτωση μας η πλακα απορρόφησης(PV πάνελ) συμπεριφέρεται ως φαιό σώμα με υψηλό δείκτη εκπομπής .

Επίσης θεωρούμε πως **PF=1** δηλαδή η διάταξη των ΦΒ κυψελών είναι τέτοια που να καλύπτει όλη την επιφάνεια του πάνελ.

Η μελέτη κάθε διάταξης θα διαχωριστεί στις περιπτώσεις **GLAZED** και **UNGLAZED** ανάλογα δηλαδή με την ύπαρξη ή μη του διάφανου υαλοπίνακα.

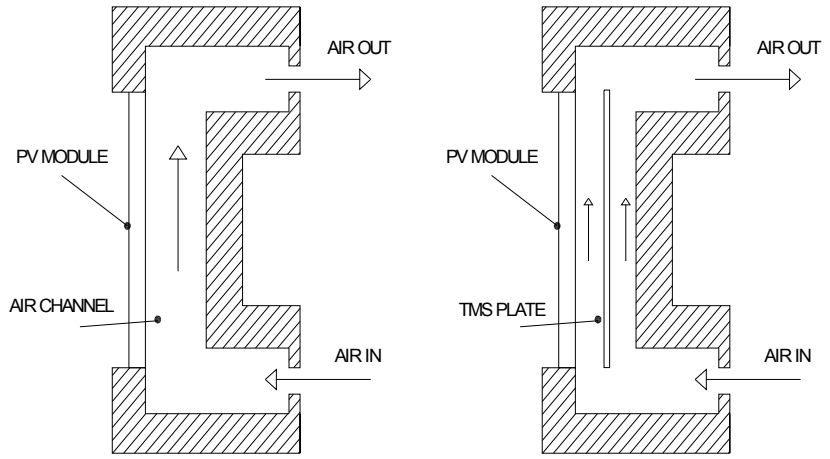
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη της πρωτης φάσης των υπολογισμών που αφορα τη σύγκριση διαφόρων διατάξεων.

πίνακας Α.1.3 ΒΑΣΙΚΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΜΗΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	(L)	1m
ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	(b)	0,4m
ΚΛΙΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	(βc)	38°
ΥΨΟΣ ΑΕΡΑΓΩΓΟΥ	(d)	Μεταβαλ/νο κατά τη μελέτη
ΠΑΧΟΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	(δins)	0,05 m
ΣΥΝΤ. ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	(kins)	0,027(W/(mK)
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ Β.Α ΑΝΑΦΟΡΑΣ	(nref)	0,127(UNGL)-0,117(GL)
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	(Tref)	298 K (25 ° C)
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ Β.Α	(β)	0,006 K^{-1}
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡ. ΑΕΡΑ	(Τα)	293 K
ΙΣΧΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	(G)	800 W/m^2
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	(Vw)	1,5 m/s
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ Β.Α ΚΙΝΗΤΗΡΑ	(nmot)	0,8
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Β.Α ΚΙΝΗΤΗΡΑ	(nmot)	0,8

Στο σχέδιο που ακολουθεί βλέπουμε ένα απλό σκαρίφημα της διάταξης μας που εκτός του συλλέκτη περιλαμβάνει , τους αγωγούς προσαγωγής και απαγωγής του αέρα με τις χαρακτηριστικές γωνίες των 90° . Η παρουσία των γωνιών έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση των συγκεντρωμένων απωλειών πίεσης.

Εξυπακούεται πως η ροή του αέρα επιτυγχάνεται με τη χρήση ανεμιστήρα που τροφοδοτείται από κινητηρα όμως δεν θα υπεισέλθουμε σε περισσότερες λεπτομέρειες πέρα από τον βαθμό απόδοσης του.



Σχ.Α.1.4 Ροή αέρα μέσα στη διάταξη

Α.1.7 Προεπισκόπηση και σχόλια

Στη μελέτη που θα ακολουθήσει για όλα τα συστήμα,**το ύψος του καναλιού (d)** της ροής θα είναι η κατασκευαστική παράμετρος παίρνοντας διάφορες τιμές και μαζί με την παροχή μάζας που θα είναι η κύρια μεταβλητή λειτουργίας, θα καθορίζουν τη θερμική και την ηλεκτρική συμπεριφορά του συλλέκτη.

Όπως προαναφέρθηκε οι εξωτερικές συνθήκες **Ir(=G_T) , Τα, Vw** στο πρώτο κομμάτι της μελέτης θα θεωρηθούν σταθερές ώστε να γίνει σύγκριση της απόδοσης του συλλέκτη ανάλογα με τη διάταξη ψύξης του.

Με βάση την εξίσωση (Α.1.11) και εκείνες που θα προκύψουν από την ενεργειακή ισορροπία σε κάθε κόμβο θα κατασκευάσουμε ένα σύστημα εξισώσεων με άγνωστες τις επί μέρους θερμοκρασίες.

Με την προσθήκη της εξίσωσης (Α.1.12) το σύστημα είναι επιλύσιμο.

Θα πρέπει ωστόσο να πούμε πως η απλοποίηση των εξισώσεων **εισάγει σφάλμα** στους υπολογισμούς και είναι αντικείμενο ειδικης πειραματικής μελέτης να υπολογιστεί το μέγεθος του σφάλματος αυτού.

Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει περισσότερο η μελέτη των παραμέτρων και ο τρόπος που επιδρούν στις διατάξεις απαγωγής θερμότητας, ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από ανάλογες μελέτες λόγω του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού.

Α.2 Η ΔΙΑΤΑΞΗ PVT REF

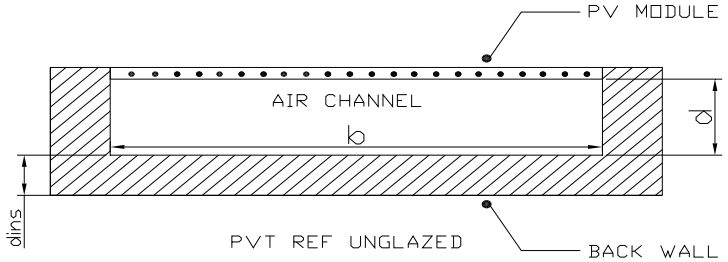
Το σύστημα αυτό αποτελεί την τυπικη διάταξη αερισμού των ΦΒ συλλεκτων (**PV/T AIR –REF**) και αυτή θα προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε ως προς τον ηλεκτρικό και τον θερμικό βαθμό απόδοσης γιαυτό και μελετάται πρώτη.

Πριν γίνει όμως οποιαδήποτε προσπάθεια βελτίωσης θα πρέπει να μελέτηθουν λεπτομερώς οι βασικές παράμετροι λειτουργίας της.

Η μελέτη αυτή θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη θερμική συμπεριφορά του συλλέκτη τόσο στην περίπτωση (**PV/T AIR –REF**), όσο και στις αλλες δύο παραλλαγές που προτείνονται και αυτό **γιατί δεχόμαστε** πως το μόνο που ουσιαστικά αλλάζει με την προσθήκη πτερυγίων ή μεταλλικής επιφάνειας συναλλαγής , είναι η υδραυλική διάμετρος D_H . Έτσι τα η διαδικασία υπολογισμού που θα περιγράψουμε σε αυτή την παράγραφο είναι ουσιαστικά **η βάση της** παρούσας εργασίας.

Θα ξεκινήσουμε με την περίπτωση που δεν υπάρχει γυάλινο ή πλαστικο θερμομονωτικό κάλυμμα πάνω από το ΦΒ πάνελ.

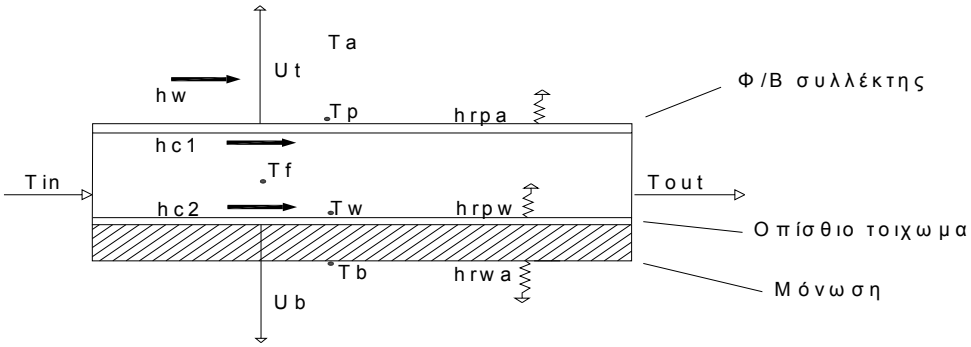
Α.2.1. REF UNGLAZED



Σχ.Α.2.1 Εγκάρσια τομή PVT REF UNGLAZED

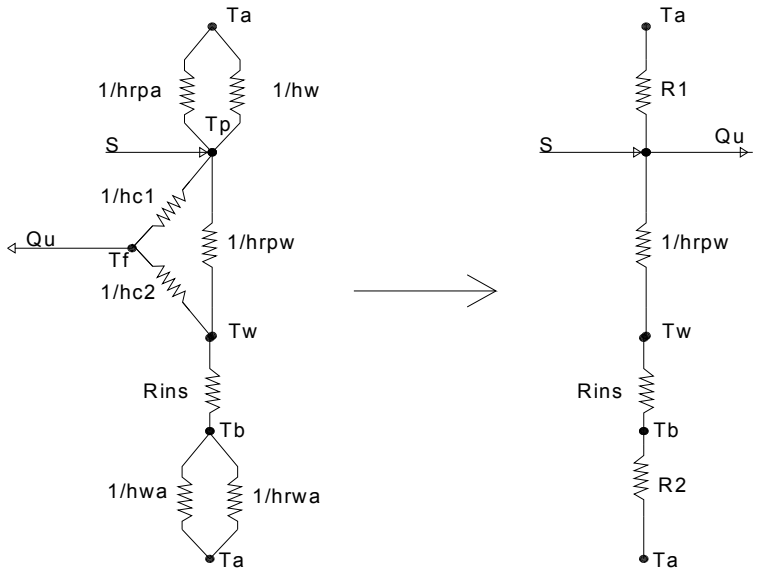
Στο πιο πάνω σχήμα είναι εμφανείς και οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις του πλαισίου ενώ η ροή του αέρα είναι κάθετη στο επίπεδο της σελίδας .

Ακολούθως δείχνεται ο ίδιος τύπος συλλέκτη σε τομή παράλληλα στη ροή του αέρα, ενώ έχουν επισημανθεί και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας



Σχ.Α.2.2 Παράλληλη τομή PVT REF UNGLAZED

Το θερμικό κύκλωμα που αντιστοιχεί στην παραπάνω διάταξη , καθώς και το ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα στο οποίο μετατρέπεται αυτό δείχνονται στο Σχ.3



Σχ.Α.2.3 Θερμικό κύκλωμα PVT REF UNGLAZED

Α.2.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ PVT REF UNGL

Οι εξισώσεις αυτές αναπαριστούν τον ισολογισμό ενέργειας σε κάθε ένα απο τους παραπάνω κόμβους σταθερής θερμοκρασίας.

PV MODULE

$$A_p \cdot I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1-n_{el}) = A_p \cdot U_t \cdot (T_p - T_a) + A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_f) + A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w)$$

ή με απαλοιφή της Ap

$$I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1-n_{el}) = U_t \cdot (T_p - T_a) + h_c \cdot (T_p - T_f) + h_{rpw} \cdot (T_p - T_w).$$

που δίνει :

$$I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1-n_{el}) - U_t \cdot (T_p - T_a) - h_c \cdot (T_p - T_f) - h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) = 0 \qquad \textbf{(A.2.1)}$$

FLUID

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout} - T_{fin}) = A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_f) + A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f)$$

που γίνεται :

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout} - T_{fin}) - A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_f) - A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) = 0 \qquad \textbf{(A.2.2)}$$

BACK WALL

$$A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) = A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) + A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a)$$

που δίνει :

$$A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) - A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) - A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a) = 0 \qquad \textbf{(A.2.3)}$$

Στις πιο πάνω εξισώσεις n_{el} είναι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης και δίδεται από τη γραμμική σχέση :

$$n_{el} = n_{ref} \cdot (1 - \beta \cdot (T_p - T_{ref})) \qquad \textbf{(A.2.4)}$$

ενώ I_r είναι η μέση ωριαία τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θεωρείται **σταθερή** .

Επίσης κάναμε την υπόθεση οτι $\mathbf{h_{c1} = h_{c2} = h_c}$ για λόγους απλότητας και διευκόλυνσης των υπολογισμών. Το γεγονός αυτό βέβαια εισάγει σφάλμα το οποίο όμως θεωρείται αμελητέο.

Η συνολική θερμότητα που χάνεται απο τον συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας είναι :

$$q_{loss} = q_t + q_b + q_e \rightarrow q_{loss} = U_t \cdot (T_p - T_a) + (U_b + U_e) \cdot (T_w - T_a)$$

με q_t, q_b, q_e να είναι οι ροές απο την κορυφή , τον πυθμένα και τα πλάγια αντίστοιχα

και

U_t, U_b, U_e οι αντίστοιχοι συντελεστές μεταφοράς

<u>Ο συντελεστής Ut</u>

Ο συντελεστής απωλειών κορυφής δίδεται απο τη σχέση :

$$U_t = 1/R_1 \rightarrow U_t = h_w + h_{rpa} \qquad \textbf{(A.2.5)}$$

Ο συντελεστής hw δίδεται από την εμπειρική σχέση :

$$h_w = 2{,}8 + 3 \cdot V_w \qquad \textbf{(A.2.6)}$$

όπου V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου.

<u>Οι συντελεστες Ub,Ue</u>

Για τον συντελεστή απωλειών πυθμένος U_b κάνουμε την παραδοχή :

$$R_{ins} \gg R_2 \rightarrow U_b = 1 / R_{ins} \longrightarrow U_b = k_{ins} / \delta_{ins}$$

Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που η θερμική αντίσταση από τον πυθμένα προς το περιβάλλον θεωρείται αμελητέα συγκρινόμενη με την αντίσταση της μόνωσης .

Έτσι λοιπόν :

$$Q_b + Q_e = A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a) + A_e \cdot U_b \cdot (T_w - T_a)$$

Τις περισσότερες φορές ωστόσο θέλουμε να ενσωματώνουμε τις πλαϊνές απώλειες , στις απώλειες πυθμένα.

$$q_b \leftarrow q_b + q_e$$

Θέλουμε να γράφουμε :

$$Q_b = A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a)$$

τότε για να συμπεριλάβουμε τις απώλειες απο το πλάι, χωρίς να αλλάξει ο τρόπος γραφής , θα πρέπει να τις ενσωματώσουμε στο U_b , οπότε :

$$U_b = (1 + \frac{A_e}{A_p}) \rightarrow U_b = (1 + \frac{2d}{b}) \qquad \textbf{(A.2.7)}$$

και κατά συνέπεια :

$$q_{loss} = q_t + q_b \rightarrow Q_{loss} = A_p \cdot \left(U_t \cdot (T_p - T_a) + U_b \cdot (T_w - T_a)\right)$$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας h_{rpa} είναι :

$$h_{rpa} = \sigma \cdot \varepsilon p \cdot \frac{(T_p^4 - T_s^4)}{(T_p - T_a)} \qquad \textbf{(A.2.8)}$$

όπου θερμοκρασία του ουράνιου θόλου δίδεται απο την προσεγγιστική σχεση :

$$T_s = 0{,}0552 \cdot T_a^{1,5} . \qquad \textbf{(A.2.9)}$$

<u>*Ο συντελεστης συναγωγης hc*</u>

Ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής h_c μέσα στο κανάλι θα υπολογιστεί απο τον αριθμό Nu της ροής .

Απο τη βιβλιογραφία βρίσκουμε ότι για την περίπτωση της ροής που μας ενδιαφέρει , η πιο κατάλληλη έκφραση του αριθμού Nu είναι :

$$Nu = 0{,}0182 \cdot \mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} \cdot \left[1 + S \cdot \frac{D_H}{L}\right] \qquad \textbf{(A.2.10)}$$

με

$$S = 14{,}3 \cdot \log(L/D_H) - 7{,}9 \qquad \textbf{(A.2.11)}$$

Η σχέση αυτή έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μήκη συλλέκτη L<1m

Η υδραυλική διάμετρος δίδεται απο την συνήθη σχέση :

$$D_H = \frac{4 \cdot A_d}{S} \qquad \textbf{(A.2.12)}$$

όπου με Ad συμβολίζεται η εγκάρσια διατομή

Σε κάθε περίπτωση είναι :

$$h_c = \frac{N_u \cdot k_a}{D_H} \qquad \textbf{(A.2.13)}$$

Οι Απώλειες πίεσης της ροής και ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύος

Εφ'οσον η ροή στον αγωγό είναι εξαναγκασμένη, **πρέπει να υπολογίσουμε** την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει ο ανεμιστήρας που την προκαλεί .

Η ισχύς αυτή **προφανώς και αναμένουμε να υπερκαλύπτεται** από την αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του συλλέκτη.

Επίσης σε πρακτικές εφαρμογές η ηλεκτρική ισχύς θα πρέπει να καλύπτει και την ισχύ συστηημάτων παρακολούθησης της ηλιακή διαδρομής αν υπάρχουν, ωστόσο εδώ δεν θα ασχοληθούμε με αυτό.

Η ανάλυση των απωλειών σε γραμμικές και συγκεντρωμένες είναι η συνηθισμένη.

$$Hf = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot f \cdot \frac{L}{DH}$$ (**Ύψος γραμμικών απωλειών**) **(A.2.14)**

με

$$f = 0,316 \cdot \mathrm{Re}^{-0,25}$$ (**Παράγων τριβής**) **(A.2.15)**

Οι συγκεντρωμένες απώλειες είναι κυρίως οι απώλειες πίεσης λόγω των γωνιών που κάνει ο αγωγός,τόσο πριν την είσοδο,όσο και μετά την έξοδο

$$Hc = \sum_i k_i \cdot \frac{v^2}{2g}$$ (**Ύψος συγκεντρωμένων απωλειών**) **(A.2.16)**

με k_i να ειναι ο συντελεστής απωλειών για τις γωνίες 2*90°

Το συνολικό ύψος των απωλειών λιοπόν θα είναι :

$$H_t = H_c + H_f \qquad \textbf{(A.2.17)}$$

και είναι το ύψος που θα πρέπει να καλύψει ο ανεμιστήρας .

Κατά τα γνωστά απο τις υδροδυναμικές μηχανές , η πτώση πίεσης θα είναι :

$$\Delta \mathrm{P} = g \cdot \rho \cdot Ht \qquad \textbf{(A.2.18)}$$

και η ηλεκτρική ισχύς του ανεμιστήρα :

$$P = \frac{\dot{m} \cdot \Delta P}{\rho \cdot n_{fan} \cdot n_{motor}} \qquad \textbf{(A.2.19)}$$

Προφανώς η ισχύς αυτή θα πρέπει να αφαιρεθεί από την διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύ του Φ/Β συλλέκτη και να προκύψει η ωφέλιμη ηλεκτρική ισχύς , αυτή δηλαδή που θα είναι διαθέσιμη για κατανάλωση.

$$P_{\omega\varphi}=Ap\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot nel\cdot G_T-P \qquad \textbf{(A.2.20)}$$

Τελικά το μέγεθος που μας παρέχει την ηλεκτρική αποδοτικότητα του συλλέκτη ειναι ο ολικός(καθαρός) ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης **ntot** που **περιλαμβάνει τόσο τις οπτικές απώλειες του προστατευτικού καλύμματος , όσο και τις απώλειες απο τη χρήση της αντλίας αλλά φυσικά και την επίδραση της θερμοκρασίας :**

$$n_{tot}=\frac{P_{\omega\varphi}}{A_p\cdot I_r} \qquad \textbf{(A.2.21)}$$

Είναι δεδομένο λοιπόν ότι για δοσμενές συνθήκες λειτουργίας και κατασκευης, θα υπάρχει μια οριακη παροχή $\dot{m}_o$ για την οποία επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ωφέλιμης ηλεκτρικής ισχύος.

Θερμοφυσικές ιδιότητες αέρα ως ιδανικό αέριο

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα στον αγωγό υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία :

$$T_f=\frac{T_{in}+T_{out}}{2}$$

Στις περιπτώσεις που εξετάζουμε , η θερμοκρασία εισόδου είναι και η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα .

Οι θερμοκρασίες αυτές κυμαίνονται μεταξύ **0-40 °C** στο μεγαλύτερο μέρος του έτους στη χώρα μας.

Η θερμοκρασία εξόδου στους συλλέκτες χωρίς κάλυμμα παρουσιάζει μικρή μεταβολή ως προς την είσοδο για τις συνηθίσμενες συνθήκες ροής.

Επειδή οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα δίνονται σε πίνακες για συγκεκριμένες θερμοκρασίες, για να παραλάβουμε αναλυτικές σχέσεις που μας δίνουν την τιμή τους σε κάποια ενδιάμεση θερμοκρασία πρέπει να κάνουμε γραμμική παρεμβολή.

Για τους λόγους που αναφέραμε,η παρεμβολή θα γίνει μεταξύ των θερμοκρασιών 270-310 K

Οι τιμές των κυριότερων θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα στις θερμοκρασίες αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα .

πίνακας Π.Α.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες αέρα (270-310 K)

T (K)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	c_p (kJ/kg·K)	γ	$\bar{v}_s$ (m/s)	η (N·s/m²)	λ (W/m·K)	Pr
270	0.7649	−32.6	6.7609	1.004	1.400	329.4	1.70.−5	0.0237	0.722
310	0.8782	7.6	6.8997	1.005	1.400	352.9	1.90.−5	0.0265	0.719

Έτσι λοιπόν με $v=1/\rho$ και για γραμμική παρεμβολή προκύπτουν οι παρακάτω αναλυτικές εκφράσεις :

$$\rho(T)=2{,}441-0{,}0042\cdot T \qquad \left(kg/m^3\right) \qquad \textbf{(A.2.22)}$$

$$k(T)=7\times10^{-5}\cdot T+0{,}0048 \qquad \left(\frac{W}{m\times K}\right) \qquad \textbf{(A.2.23)}$$

$$\mu(T)=(5\times10^{-3}\cdot T+0{,}35)\times10^{-5} \qquad \left(\frac{N\times s}{m^2}\right) \qquad \textbf{(A.2.24)}$$

$$Cp=1005 \qquad \left(\frac{J}{kg\times K}\right) \qquad \textbf{(A.2.25)}$$

$$Pr=0{,}719 \qquad \textbf{(A.2.26)}$$

A.2.1.2 Βέλτιστη παροχή mo και μέγιστη παροχή mmax

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο,η παρουσια της αντλιας που δημιουργεί τη ροή του αέρα, έχει σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση μέρους της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται.

Η ισχύς που απορροφά η αντλία όμως αυξάνει σχεδόν εκθετικά με την αύξηση της παροχής όπως θα δούμε. Αυτό σημαίνει οτι ναι μεν αύξηση της παροχής βελτιώνει την απαγωγή θερμότητας , ψύχοντας πιό αποτελεσματικά το πάνελ, ωστόσο το ηλεκτρικό κόστος που «πληρώνουμε» αυξάνει με την παροχή.

Από την άλλη το ηλεκτρικό όφελος απο την ψύξη (αύξηση του β.α του πάνελ) αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την παροχή .

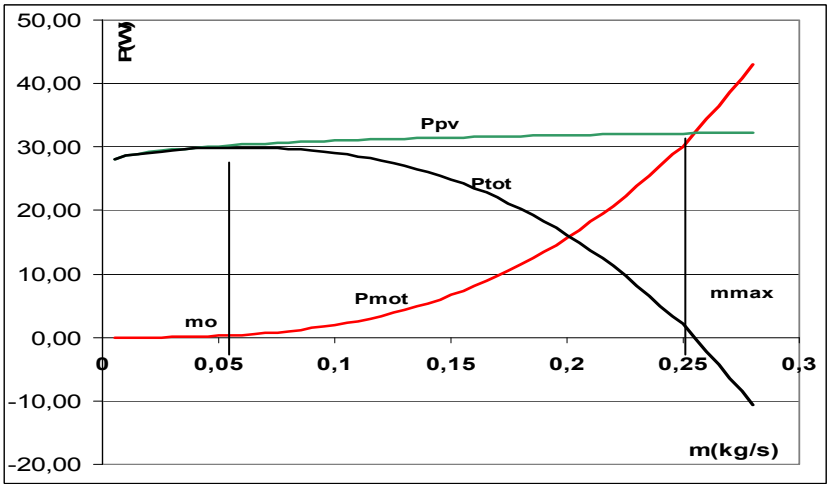
Επόμενο ειναι λοιπόν η διαφορά τους που είναι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς να παρουσιάζει ένα μέγιστο για μια τιμή της παροχής που ονομάζουμε βέλτιστη παροχή και τη συμβολίζουμε $\dot{m}_o$.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο τρόπος μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος και της ισχύος του κινητήρα με την παροχή ,ενώ έχουν σημειωθεί οι παροχές m_o και m_{max} που ειναι η παροχη για την οποια $n_{tot}=0$,οποτε δεν υπάρχει παραγωγη ηλεκτρικής ισχύος.

Σε αυτή την οριακή κατάσταση ο συλλέκτης λειτουργεί ως **αυτόνομος θερμαντής αέρα** (AIR - HEATER),διότι παράγει ζεστό αέρα χωρίς την κατανάλωση ισχύος εξωτερικά.

Όμως αυτή **δεν είναι και η βέλτιστη κατάσταση** για την παραγωγή θερμού αέρα κατανάλωσης αφού λόγω της υψηλής τιμής της ροής , η θερμοκρασία εξόδου του είναι σχετικά χαμηλή (λίγο πάνω από την T_{amb}) και συνεπώς κατάλληλη μόνο για συγκεκριμές εφαρμογές που ενδιαφέρει το μέγεθος της παροχής(π.χ ξήρανση) και όχι για θέρμανση χώρων .

Πέρα από αυτή την τιμή της παροχής το σύστημα θα πρέπει να τροφοδοτηθεί απο εξωτερική πηγή ισχύος για να λειτουργήσει(π.χ ηλεκτρικό δίκτυο).



Σχ.Α.2.4 Οι τιμές $\dot{m}_o$ και $\dot{m}_{max}$

Α.2.1.3 Επίλυση των εξισώσεων

Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν αναλυτικά πιο πάνω και αφορούν στη διάταξη **REF-UNGL** λύθηκαν με τη χρηση καταλληλου υπολογιστικου κωδικα.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι γραμμένος σε **FORTRAN 90** και παρατίθεται στο τέλος της εργασίας ως παράρτημα .

Σε αυτόν υπολογίζονται αναλυτικά σε συνάρτηση με την παροχή $\dot{m}$ και την απόσταση d του τοιχώματος απο το πάνελ(βάθος καναλιού) ,η μέση θερμοκρασία του συλλεκτη T_p , η μεση θερμοκρασία του απέναντι τοιχώματος T_w ,η θερμοκρασια εξόδου του αέρα T_{out} καθώς και ο ηλεκτρικός και ο θερμικός βαθμός απόδοσης n_{el} και n_{th} αντίστοιχα για κάθε περίπτωση.

Η αναλυτική παραμετρική μελέτη του **REF-UNGL** θα αποτελέσει τη βάση της εργασίας και παρακάτω αυτό που θα αλλάξει στις βελτιωσεις TMS και FIN θα είναι ουσιαστικά η υδραυλική διάμετρος του καναλιού.

Ας δούμε όμως στον πιό κάτω πίνακα ,ποιές είναι οι βασικές παράμετροι εκτός των κατασκευαστικών, που επηρρεάζουν το σύστημά μας (είσοδοι) και ποιά είναι τα μεγέθη που θέλουμε να μελετήσουμε(έξοδοι)

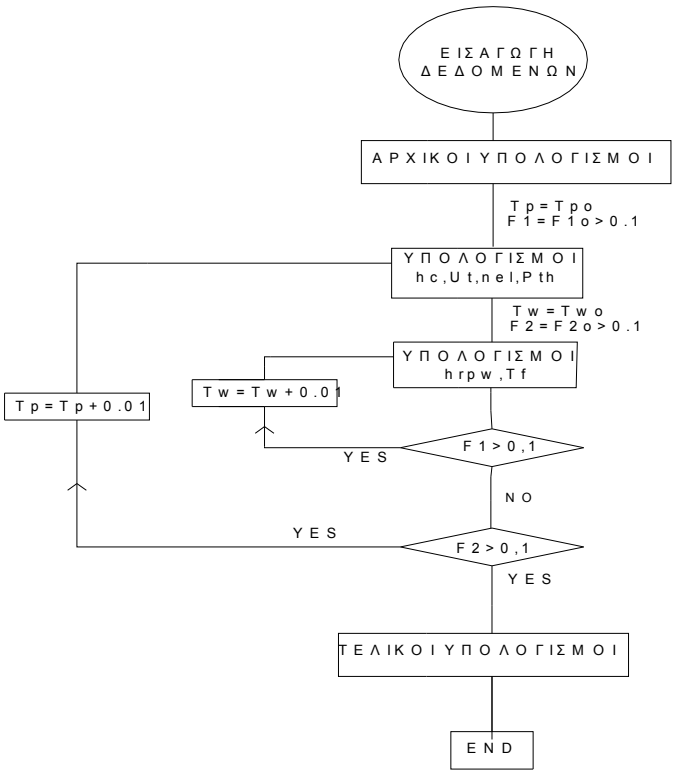
ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΙΣΟΔΟΙ

I_r	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
T_a	
V_w	
d_{ins}	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
k_{ins}	
d	
$\dot{m}$	ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ

→

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΟΔΟΙ

T_p	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ
T_w	
T_f	
n_{th}	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
n_{el}	
n_{tot}	
$\dot{m}$	ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ



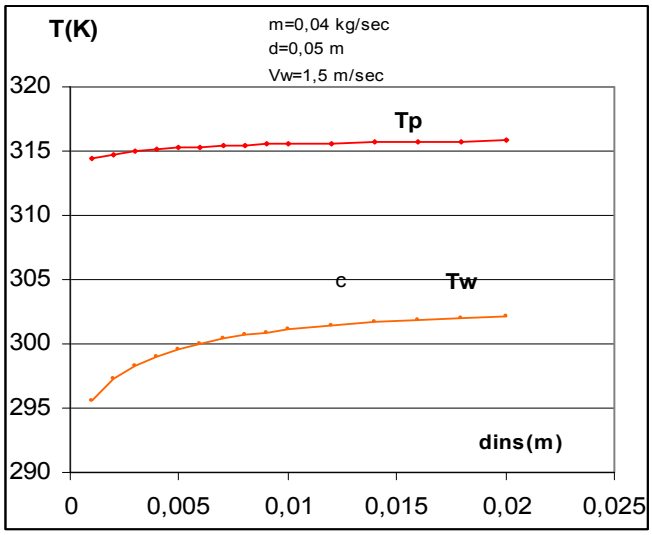
Σχ.Α.2.5 Το δομικό διάγραμμα των υπολογισμών

Με τη χρήση του κώδικα μπορούμε αρχικά να μελετήσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή κάποιων παραμέτρων όπως το πάχος της μόνωσης (d_{ins}) και η ταχύτητα του ανέμου που πνέει πάνω απο την επιφάνεια (V_w) .

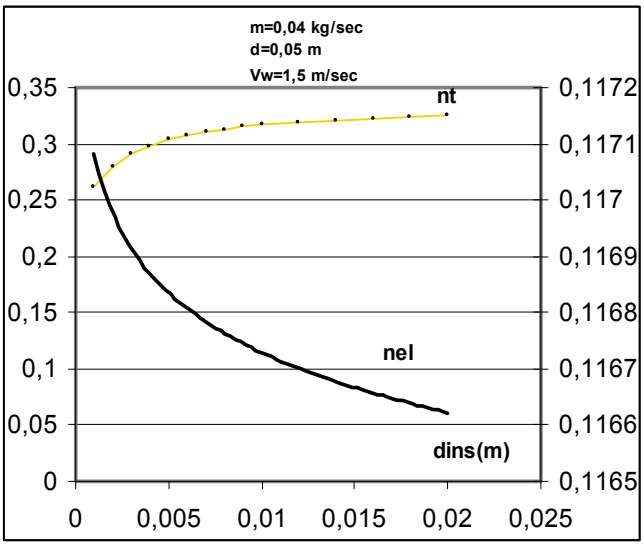
Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Α.2.1.4 Μεταβολή παραμέτρων με το παχος της μονωσης dins

Όπως αναφέραμε ήδη μια απο τις σημαντικές παραμέτρους της μελέτης είναι το πάχος της μόνωσης dins. Ας δούμε λοιπόν πως επηρρεάζει κάποιες παραμέτρους:



Σχ.Α.2.6 Μεταβολή θερμοκρασιών – πάχος μονωσης



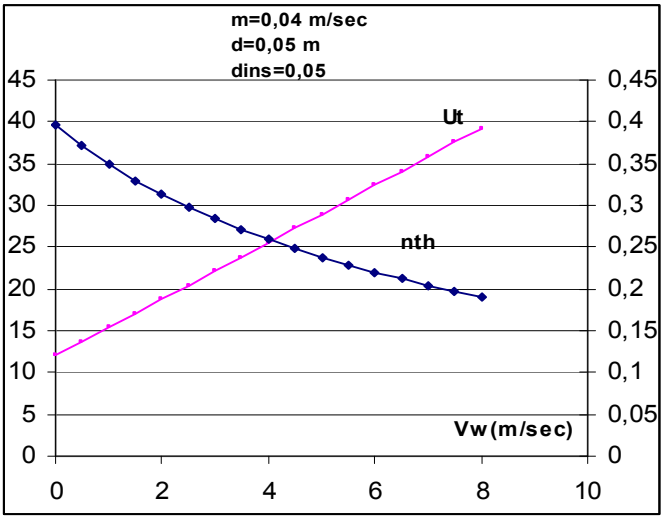
Σχ.Α.2.7 β.α – πάχος μονωσης

Όπως είναι λογικό η αύξηση του πάχους της μόνωσης προκαλεί σημαντική αύξηση του θερμικού β.α ενώ η πτώση του ηλεκτρικού β.α είναι μάλλον πολύ μικρή.

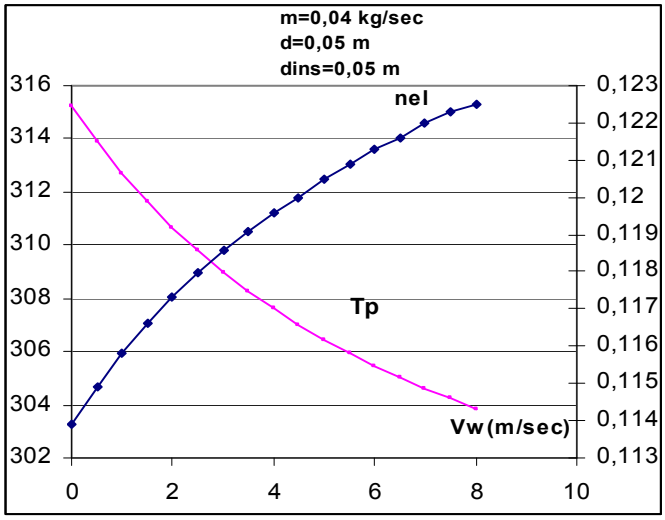
Πάντως φαίνεται πως η επίδραση της δεν είναι τόσο ισχυρή από κάποιο όριο αυξησης και επειτα .

Στην πιο πάνω περίπτωση το όριο αυτό είναι περίπου $d_{ins}=0,02$ m

Α.2.1.5 Μεταβολή παραμέτρων με την ταχύτητα του ανέμου



Σχ.Α.2.8 Μεταβολή θερμοκρασιών – ταχύτητα ανέμου



Σχ.Α.2.9 β.α – ταχύτητα ανέμου

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί λόγω της αύξησης των απωλειών κορυφής U_t , μείωση της θερμοκρασίας του πάνελ και

συνακολούθως αύξηση στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης . Ωστόσο μειώνει σημαντικά τη θερμική απόδοση του συστήματος.

Χαρακτηριστικό είναι οτι μιά αύξηση στον nel κατα **8%** λόγω αύξησης του U_t ακολουθείται απο μείωση του n_{th} σχεδόν κατά **50%.**

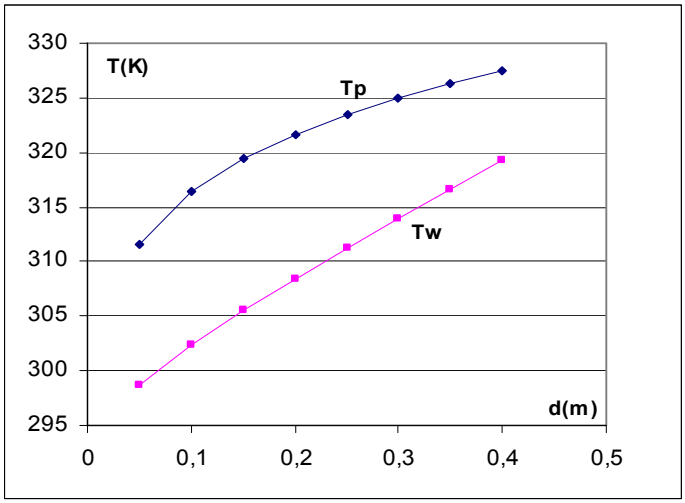
Συνεπώς , ισχυροί άνεμοι είναι επιθυμητοί μόνο σε περιπτώσεις που δεν μας ενδιαφέρει τόσο η θερμική απόδοση του συστήματος μας. Κάτι τέτοιο συμβαίνει μόνο το καλοκαίρι για τους υβριδικούς οικιακούς συλλέκτες αλλά ισχύει πάντα για διατάξεις που αποσκοπούν απλώς στην αποτελεσματική ψύξη του πάνελ, όπως μεγάλες συστοιχίες ΦΒ συλλεκτών ηλεκτροπαραγωγής.

Α.2.1.6 Μεταβολή παραμέτρων με το βάθος d

Η άλλη κατασκευαστική παράμετρος που μας ενδιαφέρει είναι η απόσταση d στην οποία τοποθετείται το πάνελ από το οπίσθιο τοίχωμα .

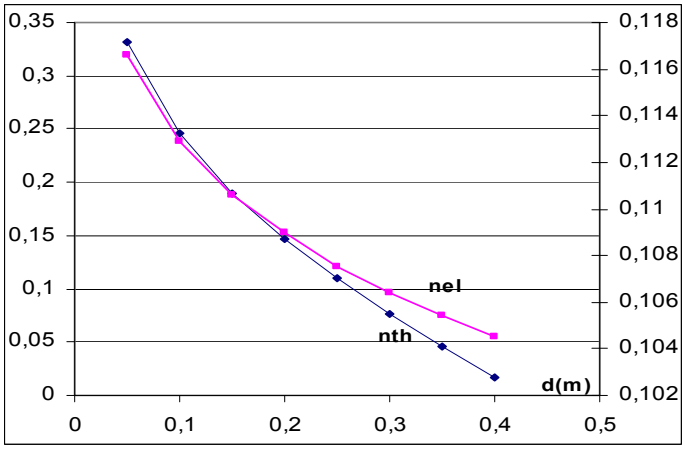
Η παράμετρος αυτή είναι θεμελιώδους σημασίας καθώς η μεταβολή της έχει πολύ σημαντική επίδραση στο σημείο θερμικής και ηλεκτρικής ισορροπίας του συστήματος μας.

Για του λόγου το αληθές παρατίθενται τα ακόλουθα διαγράμματα :



$\dot{m} = 0{,}04$ kg/sec
$V_w = 1{,}5$ m/sec
$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K

Σχ.Α.2.10 Μεταβολή θερμοκρασίας – d



$\dot{m} = 0{,}04$ kg/sec
$V_w = 1{,}5$ m/sec
$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K

Σχ.Α.2.10 Μεταβολή β.α – d

Από τα ανωτέρω διαπιστώνεται ότι τόσο η ηλεκτρική οσο και η θερμική απόδοση του συστήματος ευνοείται όταν το d παίρνει όσο το δυνατό πιο μικρές τιμές.

Σε επόμενη παράγραφο θα μελετήσουμε αν και εφόσον μείωση του d εχει θετική επίδραση και στον καθαρό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ntot, δεδομένου πως μείωση του d προκαλεί και μεγαλύτερες απώλειες πίεσης στη ροή.

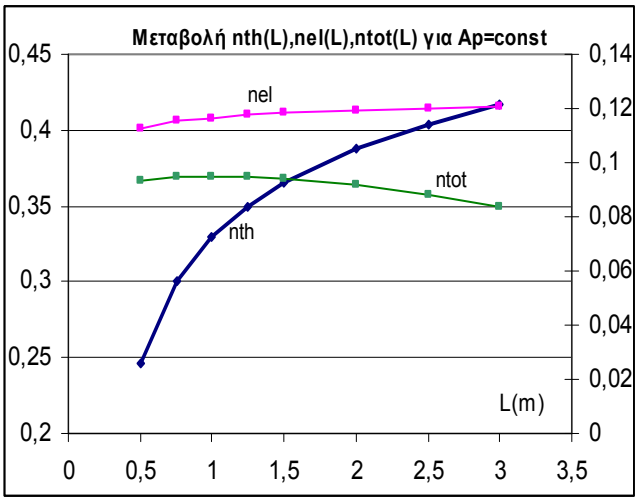
Α.2.1.7 Μεταβολή παραμέτρων με το μήκος του συλλέκτη L

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος στη μεταβολή του μήκους του συλλέκτη.

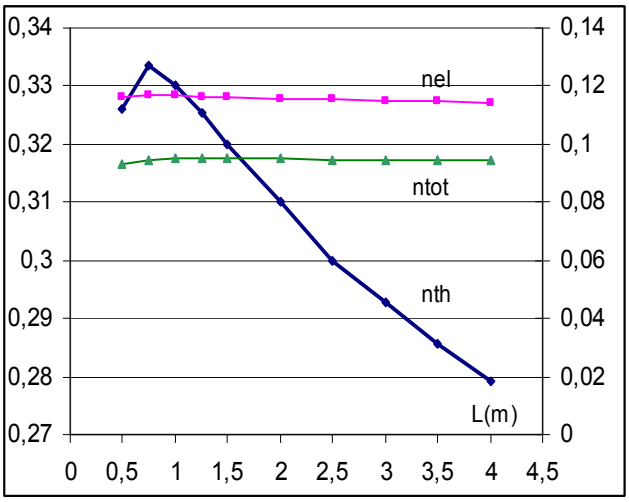
Στο σχ.Α.2.11 φαίνεται η μεταβολή των β.α συναρτήσει του μήκους για σταθερή επιφανεια συλλεκτη $Ap=0,4$, συνεπώς αυξηση του μήκους αντιστοιχει σε αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή του πλάτους.

Αντίθετα στο σχ.Α.2.12 εξετάζεται η απόδοση του συστήματος για μεταβολή του μήκους L του συλλέκτη με $b=0,4m$.

$\dot{m}=0,04$ kg/sec	$I_r = 800$ W/m^2	$d = 0,05$ m
$Vw=1,5$ m/sec	$Ta=293$ K	$d_{ins}=0,05$ m



Σχ.Α.2.11 Μεταβολή β.α – μήκος L



Σχ.Α.2.12 Μεταβολή β.α – μήκος L

Σχόλια: Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε οτι για δεδομένη την επιφάνεια του συλλεκτη (α), η γεωμετρία που ενδείκνυται για να αυξήσουμε τη θερμική απόδοση είναι μεγάλη σχέση μήκος/πλάτος , ενώ για δεδομένο το πλάτος του συλλεκτη (β) υπάρχει ενα βέλτιστο μήκος που στη περίπτωση μας είναι περίπου **L=1m** .

Εξάλλου ο καθαρός βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{tot} εμφανίζει ένα μέγιστο στη θέση **L=1m** στην (α) περίπτωση ενω παραμένει πρακτικά ανεπηρρέαστος από το μήκος του αγωγού όταν το πλάτος του είναι συγκεκριμένο

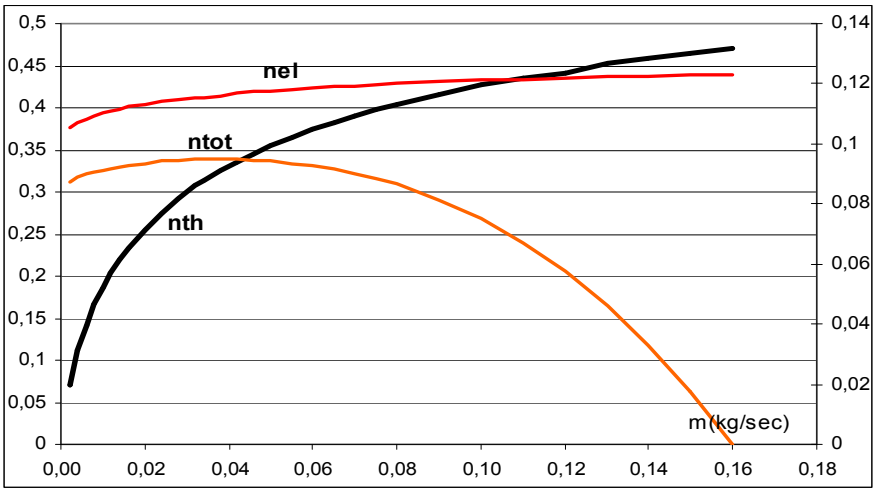
Μέχρι τώρα είδαμε τις μεταβολές που προκαλεί η μεταβολή των βασικών γεωμετρικών μεγεθών του συλλέκτη.Ωστόσο αφού αυτά επιλεγούν,η βασική παράμετρος λειτουργίας του συλλέκτη ειναι η παροχη μάζας αέρα που διοχετεύεται στο κανάλι ροης m(kg/sec).

Ακολουθεί μια ανάλυση της λειτουργίας του συλλέκτη δεδομένων των γεωμετρικών μεγεθών και των εξωτερικών συνθηκών και με **μόνη** μεταβλητή την παροχή μαζας $\dot{m}$ και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Α.2.1.8 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ (REFU)

Η πιό σημαντική παράμετρος του συστήματος μας είναι αναμφίβολα η παροχή μάζας αέρα m που διοχετεύεται απο την αντλία.

Θα εξετάσουμε λοιπόν την μεταβολή των παραμέτρων απόδοσης $(n_{th}, n_{el}, n_{tot})$ και των θερμοκρασιών (T_p, T_w, T_{out}) με την παροχή m και αυτό θα γίνει για τρεις διαφορετικές τιμές της απόστασης $(d=0.05, d=0.10, d=0.15)$.

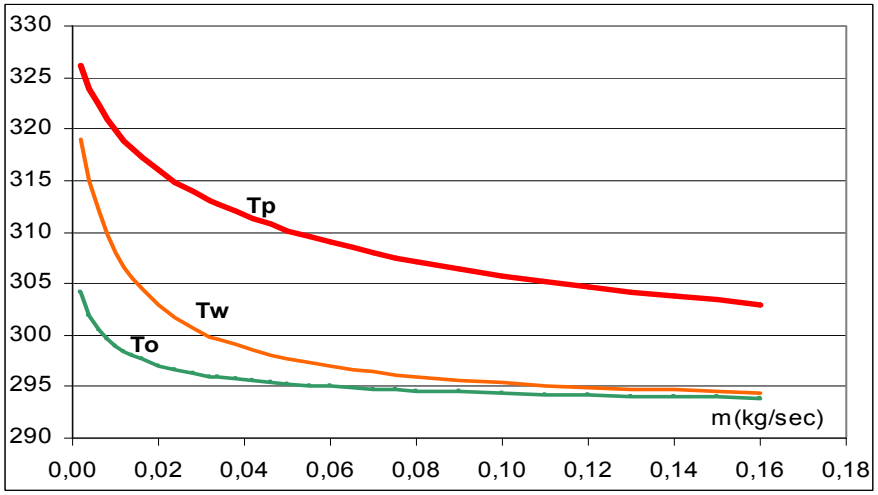


$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
$V_w = 1,5$ m/sec
$d_{ins} = 0,05$ m
$k_{ins} = 0,027$ W/m×K
$d = 0,05$ m

Σχ.Α.2.13 Μεταβολή βαθμών αποδοσης– παροχής (d=0,05 m)

Βλέπουμε ότι τόσο ο θερμικός , όσο και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι αύξουσες συναρτήσεις της παροχής μάζας.

Αυτό όμως δεν συμβαίνει για τον καθαρό ηλεκτρικό βαθμό και έτσι βλέπουμε οτι υπάρχει μια παροχή **mo** κατά την οποία αυτός παίρνει τη μέγιστη τιμή του και έπειτα φθίνει για να μηδενιστεί τελικά.

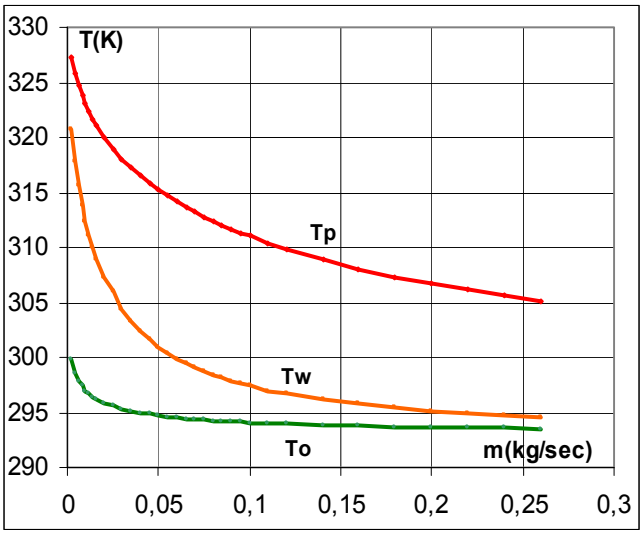


$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
$V_w = 1,5$ m/sec
$d_{ins} = 0,05$ m
$k_{ins} = 0,027$ W/m×K
$d = 0,05$ m

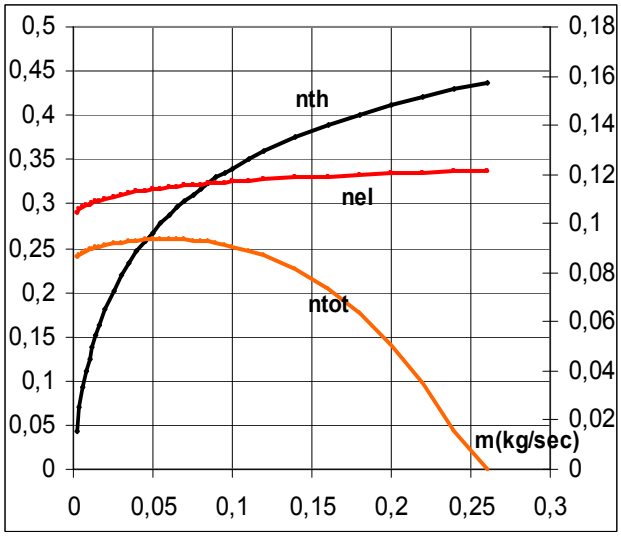
Σχ.Α.2.14 Μεταβολή βαθμών αποδοσης– παροχής (d=0,05 m)

Από την ανάγνωση του διαγράμματος παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες μειώνονται εκθετικά με την παροχή . Παίρνουν την μέγιστη τιμή τους όταν το σύστημα παροχής αέρα δεν λειτουργεί, και συγλίνουν προς την κατώτερη δυνατή θερμοκρασία που είναι αυτή του αέρα στην είσοδο (T_{in}).

$I_r = 800 \quad W/m^2$	$T_a = 293 \quad K$
$d_{ins} = 0{,}05 \quad m$	$d = 0{,}10 \quad m$

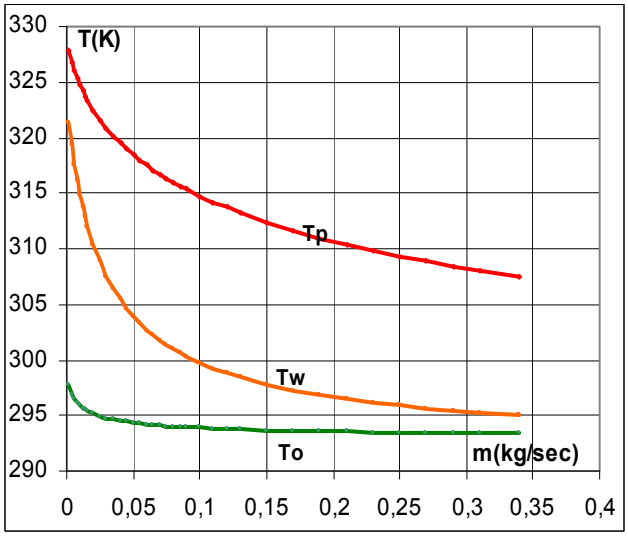


Σχ.Α.2.15 Μεταβολή θερμοκρασιών παροχής (d=0,10 m)

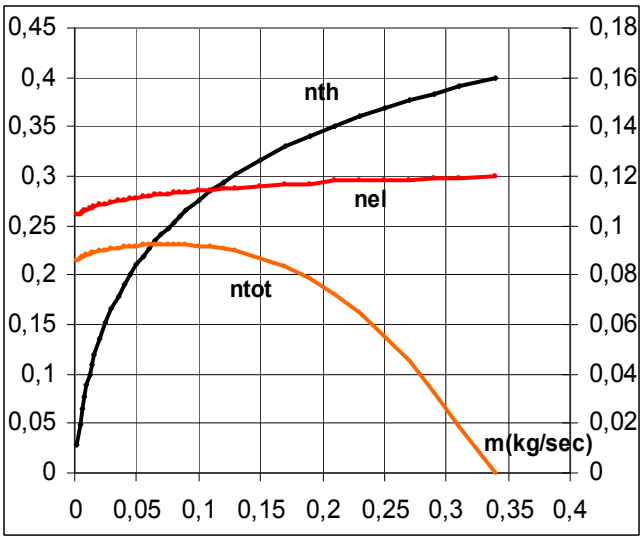


Σχ.Α.2.16 Μεταβολή βαθμών απόδοσης παροχής (d=0,10 m)

$I_r = 800 \quad W/m^2$	$T_a = 293 \quad K$
$d_{ins} = 0{,}05 \quad m$	$d = 0{,}15 \quad m$

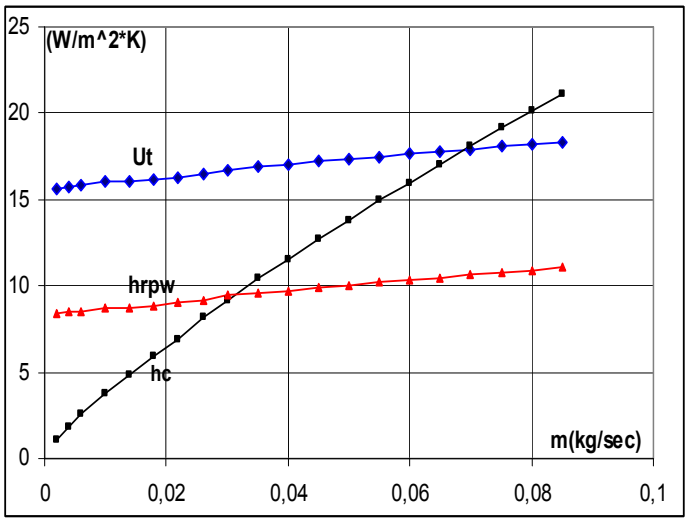


Σχ.Α.2.15 Μεταβολή θερμοκρασιών παροχής (d=0,15m)



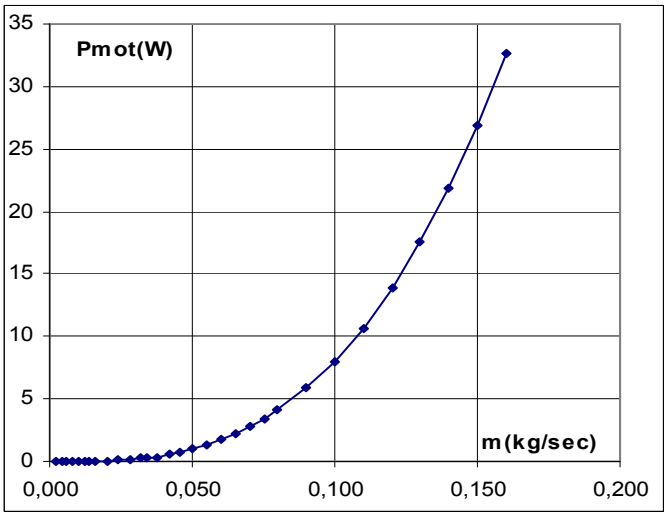
Σχ.Α.2.16 Μεταβολή βαθμών απόδοσης παροχής (d=0,15 m)

Μεταβολή συντελεστων Ut,hc,hrpw - m



Σχ.Α.2.17 Μεταβολή Ut,hc,hrpw -παροχή

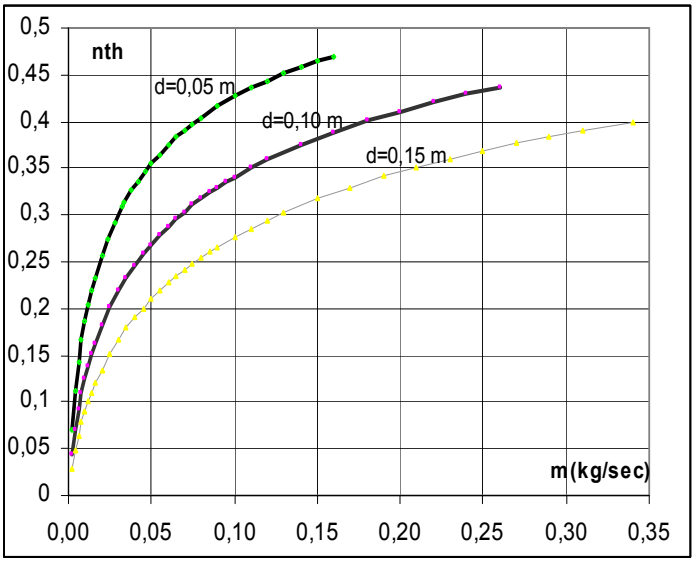
Μεταβολή Pmot - m



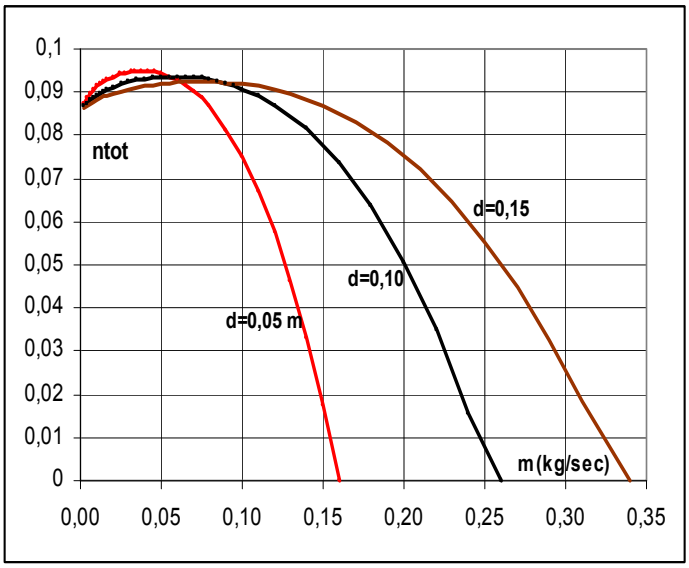
Σχ.Α.2.18 Μεταβολή ισχύος κινητήρα-παροχή

Α.2.1.9 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ REFU

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα παρακατω διαγράμματα όπου και είναι φανερό ότι η μείωση της απόστασης d συμβάλλει στην επίτευξη υψηλότερου θερμικού βαθμού απόδοσης(Σχ.1), ενώ ο καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης φαινεται να μετατοπίζει το μέγιστο του προς υψηλότερες παροχές και ταυτόχρονα να μειώνεται λίγο με την αύξηση του βάθους του καναλιού(ΣΧ.2).



Σχ.Α.2.19 Σύγκριση των θερμικών θαθμών απόδοσης



Σχ.Α.2.20 Σύγκριση των καθαρων ηλεκτρικών β.α

Στους πίνακες που ακολουθούν αποτυπωνονται με αριθμούς τόσο το σημείο βέλτιστης παροχής (**ntot=max**) όσο και για το σημείο μέγιστης παροχής (**ntot=0**)

Γίνεται δε ξακάθαρο πλέον οτι **τα μικρότερα βαθη καναλιού d υπερέχουν** τόσο στη συνολική ηλεκτρική απόδοση όσο και στη θερμικη!

Πίνακας Α.2.2 Αποτελέσματα για το σημείο βέλτιστης παροχής

$d(m)$	$\dot{m}_o(kg/\sec)$	n_{tho}	n_{elo}	n_{tot}	$T_{pm}(m_o)$	$T_{wm}(m_o)$
0,05	**0,040**	**0,331**	**0,1165**	**0,095**	**311,54**	**298,9**
0,10	**0,060**	**0,287**	**0,1147**	**0,0936**	**314,63**	**299,86**
0,15	**0,082**	**0257**	**0,1134**	**0,0924**	**315,8**	**300,6**

Πίνακας Α.2.3 Αποτελέσματα για το σημείο μέγιστης παροχής

$d(m)$	$\dot{m}_{\max}(kg/\sec)$	$n_{th\ \max}$
0,05	**0,159**	**0,471**
0,10	**0,258**	**0,437**
0,15	**0,34**	**0,40**

Α.2.1.10 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είδαμε σε κάθε περίπτωση πως αύξηση της παροχής σημαίνει και αύξηση της θερμικής ισχύος αφού διατίθεται μεγαλυτερη μάζα του ρευστού για την αφαίρεση θερμότητας.

Αντίθετα παρόλο που όσο αυξάνει η παροχή , αυξάνει ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης , ταυτόχρονα αυξάνει και η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος από τον κινητήρα , με αποτέλεσμα για κάποια οριακή τιμή της παροχής $\dot{m}_{\max}$ το ηλεκτρικό ώφελος από τη χρήση της αντλίας να εξισορροπείται από την ηλεκτρική κατανάλωση της.

Αυτή η οριακή παροχή διαφέρει για κάθε d και μάλιστα φαίνεται να μετατοπίζεται προς μεγαλύτερες τιμές παροχής. Στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης μας.

Μια πολύ σημαντική παρατήρηση που μπορεί να γίνει απο τον πίνακα είναι ότι όταν επιθυμούμε τη **μέγιστη ηλεκτρική** ισχύ του πάνελ(**ψύξη ΦΒ**) , είναι προτιμότερο να εξασφαλίσουμε όσο το δυνατό μικρότερη απόσταση του πάνελ από το τοίχωμα.

Το ίδιο ισχύει και στην ακραία περίπτωση που ο συλλέκτης μας θέλουμε να λειτουργήσει αποκλειστικά ως **θερμαντής αέρα** χωρις δηλαδη να παράγει ή να καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ $\left(n_{tot}=0\right)$.

Πάλι λοιπόν φαίνεται πως πρέπει η d να είναι κατα το δυνατο μικρότερη.

Σε άλλες ωστόσο εφαρμογές όπου το θερμικό φορτίο είναι δεδομένο ίσως να ευνοείται μια διαφορετική απόσταση d και αυτό είναι κάτι που θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση.

A.2.2. REF GLAZED

A.2.2.1 Η χρήση υαλοπίνακα

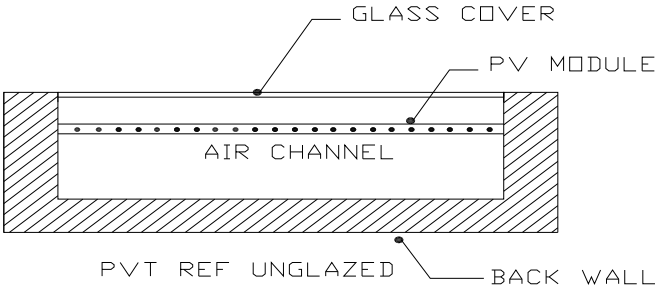
Ένας πολύ αποδοτικός τρόπος να αυξήσουμε το θερμικό κέρδος του συλλέκτη είναι να τοποθετήσουμε έναν πλαστικό ή γυάλινο κάλυμμα πάνω από το πάνελ.

Το κάλυμμα αυτό πρέπει να έχει κατά το δυνατό καλύτερες οπτικές ιδιότητες(υψηλό συντελεστή διαπερατότητας τ) ώστε οι οπτικές απώλειες να ελαχιστοποιούνται.

Το κάλυμμα τοποθετείται σε κάποια απόσταση d' από το πάνελ και έτσι ανάμεσά τους δημιουργείται ένα διάκενο που περιέχει αέρα και δρα ως μόνωση αυξάνοντας τη δυσκολία διαρροής θερμότητας απο την κορυφή.

Έτσι μειώνεται ο συντελεστής απωλειών κορυφής U_t και περισσότερη θερμότητα παγιδεύεται στο εσωτερικό του συλλέκτη και συλλέγεται από τον αέρα.

Το ύψος του διακένου είναι μια σημαντική σχεδιαστική παράμετρος που πρέπει να επιλεγεί σωστά.



Σχ.Α.2.21 Εγκαρσια τομη PVT REF UNGLAZED

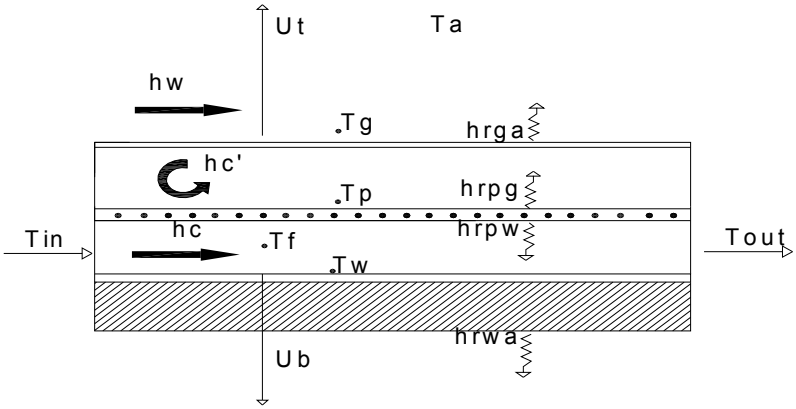
Τα καλύμματα είναι πολύ συνηθισμένα στους συμβατικούς θερμικούς συλλέκτες FPC. Ωστόσο στους υβριδικούς ΦΒ/Θ η χρήση τους δεν είναι απαραίτητα ευεργετική για τη συνολική απόδοση του συστήματος καθώς η αυξηση του n_{th} συνοδεύεται απο αύξηση της θερμοκρασίας του πάνελ που όπως είδαμε οδηγεί σε μείωση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης.

Η χρήση του καλύμματος θα πρέπει να προτιμάται σε εφαρμογές όπου η θέρμανση του αέρα έχει ιδιαίτερη σημασία (π.χ θέρμανση τον χειμώνα) έναντι της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και πάντως μέσα σε κάποια όρια.

Σε αυτή την παράγραφο θα υπολογίσουμε το θερμικό κέρδος και τις ηλεκτρικές απώλειες από τη χρήση του καλύμματος , θα δούμε επίσης ποιά είναι η βέλτιστη παροχή m_o για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και ποιά είναι η μέγιστη επιτρεπτή παροχή m_{max} .

Πίνακας Α.2.4 Χαρακτηριστικά υαλοπίνακα

Υλικο : low iron glass	
t_g=0,004 m	**Πάχος καλύμματος**
τ_g=0,9	**Διαπερατότητα καλύμματος**
d'=0,05 m	**Ύψος διακένου**
ε_g=0,9	**Συντελεστής εκπομπής**

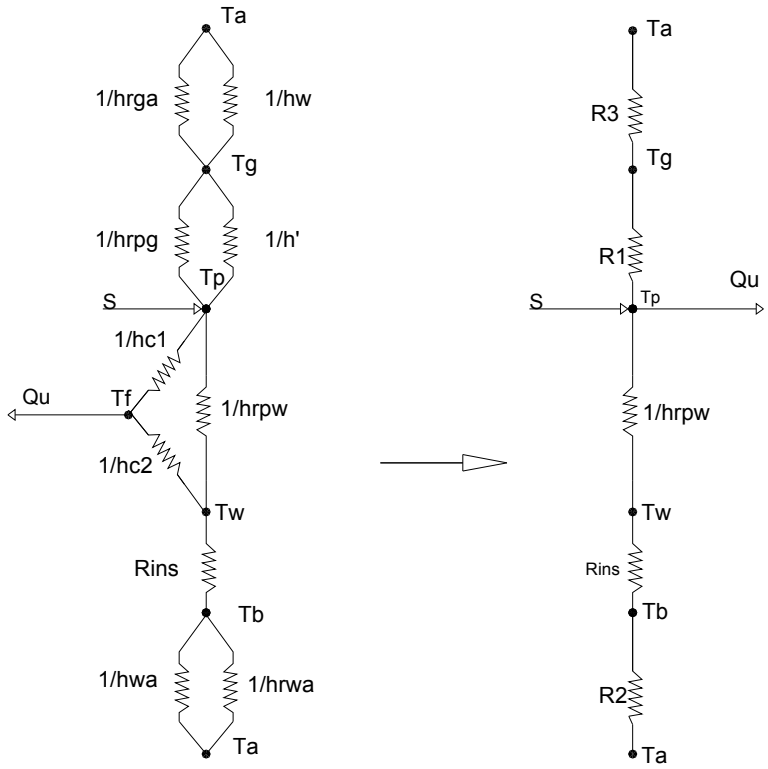


Σχ.Α.2.22 Παράλληλη τομή PVT REF GLAZED

Στην περίπτωση που εξετάζουμε το πάνελ επικοινωνεί θερμικά στο άνω του μέρος με τον αέρα που βρίσκεται στο διάκενο (ελεύθερη συναγωγή,συντελεστής hc') και με το κάλυμμα (ακτινοβολία, συντελεστής h_{rpg}) .

Το κάλυμμα από την άλλη είναι αυτό που ανταλάσσει θερμότητα με το εξωτερικό περιβάλλον.

Αν λοιπόν ξανασχεδιάσουμε το θερμικό κύκλωμα όπως και προηγουεμένως θα πρέπει να προσθέσουμε και τον κόμβο θερμοκρασίας Tg' .



Σχ.Α.2.23 Θερμικό κύκλωμα PVT REF GLAZED

A.2.2.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ PVT REF GL

Στις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις πρέπει να προστεθεί αυτή της θερμικής ισορροπίας του κόμβου (g) και να διορθωθεί η εξίσωση του πάνελ, ως προς τον συντελεστή απωλειών κορυφής.

Τελικά :

COLLECTOR COVER

$$(h_{r,pg}+hc')\cdot(T_p-T_g)=(hr_{ga}+h_w)\cdot(T_g-T_a) \qquad \textbf{(A.2.28)}$$

PV MODULE

$$I_r\cdot(\tau\cdot\alpha)\cdot(1-n_{el})-(h_{r,pg}+hc')\cdot(T_p-T_g)-h_c\cdot(T_p-T_f)-h_{rpw}\cdot(T_p-T_w)=0 \qquad \textbf{(A.2.29)}$$

Ισχύουν όμως και οι άλλες δύο εξισώσεις :

FLUID

$$\dot{m}\cdot C_p\cdot(T_{fout}-T_{fin})-A_p\cdot h_c\cdot(T_p-T_f)-A_{int}\cdot h_c\cdot(T_w-T_f)=0 \qquad \textbf{(A.2.30)}$$

BACK WALL

$$A_p\cdot h_{rpw}\cdot(T_p-T_w)-A_{int}\cdot h_c\cdot(T_w-T_f)-A_p\cdot U_b\cdot(T_w-T_a)=0 \qquad \textbf{(A.2.31)}$$

Οι συντελεστες μεταφορας $h_{r,pg}$ ***και*** $h_{r,ga}$

$$h_{r,pg}=\sigma\cdot\varepsilon_{pg}\cdot(T_p-T_g)\cdot(T_p^2+T_g^2) \quad \text{με} \quad \varepsilon_{pg}=\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_p}+\frac{1}{\varepsilon_g}-1} \qquad \textbf{(A.2.32)}$$

και :

$$h_{r,ga}=\sigma\cdot\varepsilon_g\cdot\frac{(T_g^4-T_s^4)}{(T_g-T_a)} \qquad \textbf{(A.2.33)}$$

Οι συντελεστης hc΄

Από τις πιό πάνω εξισώσεις διαφαίνεται ότι οι απώλειες κορυφής εξαρτώνται σημαντικά από τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το πάνελ προς τον αέρα που υπάρχει στο διάκενο.

Στην ιδανική περίπτωση που θεωρήσουμε ότι ο αέρας είναι ακίνητος τότε έχουμε μεταφορά με αγωγή δια μέσου του αέρα.

Σε αυτή την περίπτωση είναι :

$$h_c'=\frac{k_{air}}{d'} \qquad \textbf{(A.2.34)}$$

Ωστόσο η έκφραση αυτή μπορεί να βελτιωθεί και να λάβει υπόψη την φυσική κυκλοφορία του αέρα μέσα στο διάκενο.

Τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση του **Hollands** για τους κεκλιμένους ηλιακούς συλλέκτες,που παρέχει τον αριθμό Nusselt της ροής

$$N_u = \frac{h'_c \cdot \delta}{k_{air}} \qquad \textbf{(A.2.35)}$$

$$N_u = 1{,}0 + 1{,}446 \cdot \left(1 - \frac{1708}{R_a \cdot \cos\beta}\right)^{+} \cdot \left(1 - \frac{(\sin 1{,}8 \cdot \beta)^{1,6} \cdot 1708}{R_a \cdot \cos\beta}\right) + \left[\left(\frac{R_a \cdot \cos\beta}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right]^{+} \qquad \textbf{(A.2.36)}$$

Στην πιο πάνω εξίσωση οι παρενθέσεις με + μηδενίζονται αν το περιεχόμενο τους είναι αρνητικό και β είναι η γωνία κλίσης του συλλέκτη.

Επίσης :

$$R_a = \frac{g \cdot B \cdot (T_p - T_g) \cdot d'^3}{a \cdot v} \qquad \textbf{(A.2.37)}$$

με :

$$B = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial T}\right)_p \rightarrow B = \frac{1}{T}$$ με την υπόθεση οτι ο αέρας είναι τέλειο αέριο

και :

$$a = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται και πάλι με τη χρήση προγράμματος γραμμένου σε κώδικα FORTRAN 90 .

Το δομικό διάγραμμα του προγράμματος δεν διαφέρει και πολύ από πριν , με την προσθήκη ενός βρόχου υπολογισμού της θερμοκρασίας **Tg** αλλά και μιας υπορουτίνας υπολογισμού του $h_{c'}$.

Ακολουθεί η έκθεση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης.

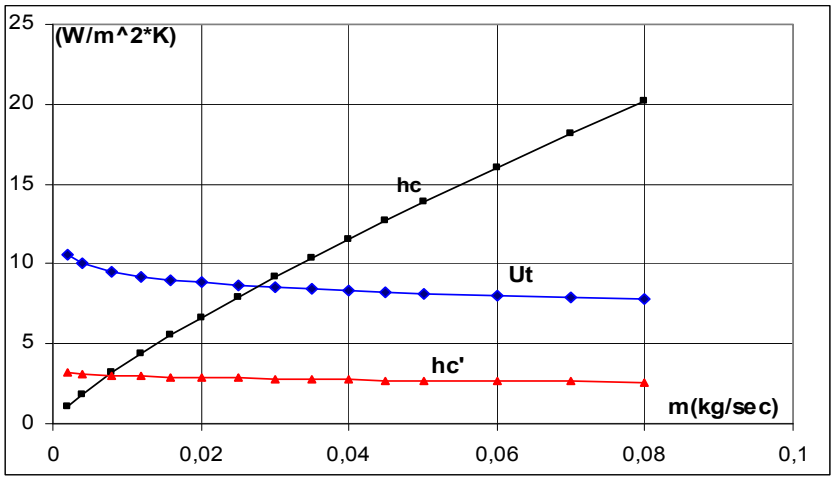
Επισημαίνεται πως μελετήθηκε **μόνο** η περίπτωση οπου $d=0{,}05$ m μιάς και όπως δείξαμε στην προηγούμενη παράγραφο , αυτή παρουσιάζει τον πιο υψηλό θερμικό και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, ενώ το καλυμμα τοποθετήθηκε σε απόσταση $d'=0{,}03$ m από την επιφάνεια **PV**.

Τέλος θα γινει σύγκριση των δύο παραλλαγών (**REF UNGL - REF GL**) για να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα απο τη χρήση του διάφανου καλύμματος.

A.2.2.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ(REFG)

Από το διάγραμμα (σχ. Α.2.24) γίνεται φανερό πως η μεταβολή της παροχής έχει σχετικά ασθενή επίδραση στην τιμή του συντελεστή **hc'** , ενώ αντιθετα με οτι συνεβαινε στο REFUNGL η αύξηση της παροχής μειώνει σημαντικά το συντελεστή απωλειών κορυφής $\mathbf{U_t}$ του οποιου η τιμη παντως συγκλινει προς μια σταθερη τιμη.

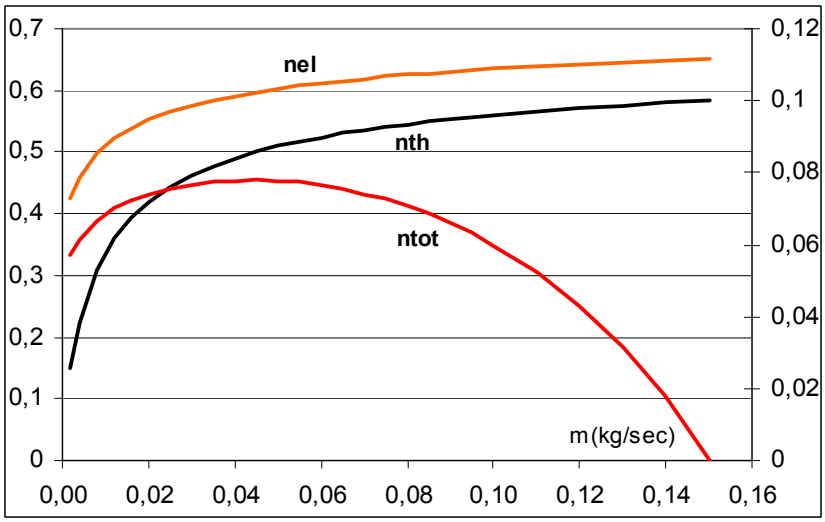
Η συμπεριφορά του hc δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή σε σχέση με πριν μιας και αυτός εξαρταται ελαχιστα απο τη θερμοκρασία του συλλέκτη που όπως θα δούμε παρακάτω ειναι αυξημένη.



$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
Vw = 1,5 m/sec
$d_{ins} = 0{,}05$ m
$k_{ins} = 0{,}027$ W/m×K
d = 0,05 m
d' = 0,03 m

Σχ.Α.2.24 Μεταβολη Ut,hc,hc'με την παροχή (REFGL)

Στο παρακάτω διάγραμμα(σχ. Α2.25) είναι εμφανής η **αποτελεσματικότητα** του καλύμματος για την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης και η αναμενόμενη πτώση της ηλεκτρικής απόδοσης σε σχέση με την πείρπτωση REFU

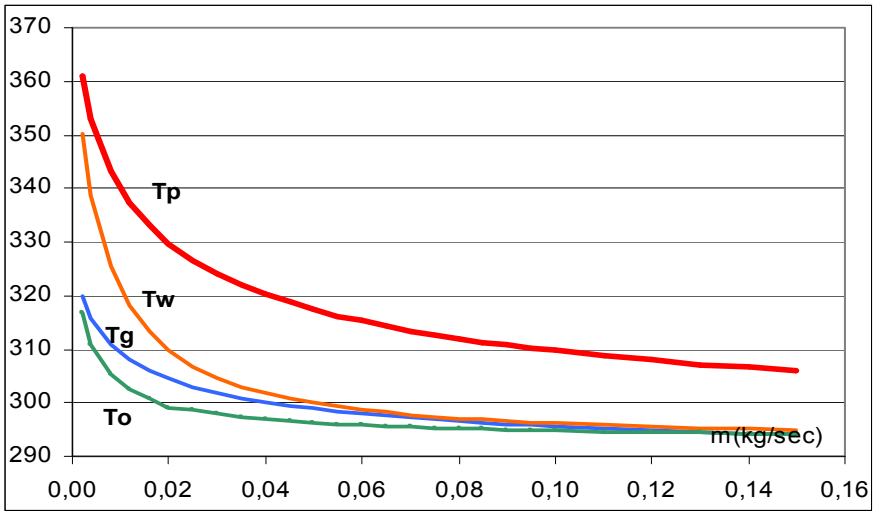


$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
Vw = 1,5 m/sec
$d_{ins} = 0{,}05$ m
$k_{ins} = 0{,}027$ W/m×K
d = 0,05 m
d' = 0,03 m

Σχ.Α.2.25 Μεταβολη β.α με την παροχή (REFGL)

Στο ακόλουθο διαγραμμα γίνεται φανερό ότι για σχετικά χαμηλές παροχές (όπου ο συλλέκτης δεν ψύχεται επαρκώς) εμφανίζονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες **Tp** και **Tw** που πλησιάζουν ή και ξεπερνούν τους **360 K(87 C)** .

Έχει σημανθεί επίσης και η θερμοκρασία του υαλοπίνακα που όπως φαίνεται δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη μεταβολή και παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα(300-320K). Οι διαφορές σε σχέση με το REFU θα γίνουν καλύτερα αντιληπτές στη σύγκριση των δυο διατάξεων που θα ακολουθήσει



$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
$V_w = 1,5$ m/sec
$d_{ins} = 0,05$ m
$k_{ins} = 0,027$ W/m×K
$d = 0,05$ m
$d' = 0,03$ m

Σχ.Α.2.26 Μεταβολή θερμοκρασιών με την παροχή (REFGL)

Μεταβολή των β.α με την παροχή για d=0,05

Στους πίνακες που ακολουθούν μπορούμε να δούμε τις ακριβείς αριθμητικές τιμές των κυρίων μεγεθών εξόδου τόσο στο σημείο **m_o** όσο και στο σημείο **m_{max}**

d(m)	$\dot{m}_o$(kg/sec)	η_{tho}	η_{elo}	η_{tot}	$T_{pm}(m_o)$	$T_{wm}(m_o)$	$T_{gm}(m_o)$
0,05	**0,046**	**0,501**	**0,1024**	**0,0779**	**318,74**	**300,75**	**296,73**

πίνακας Π.Α.2.5

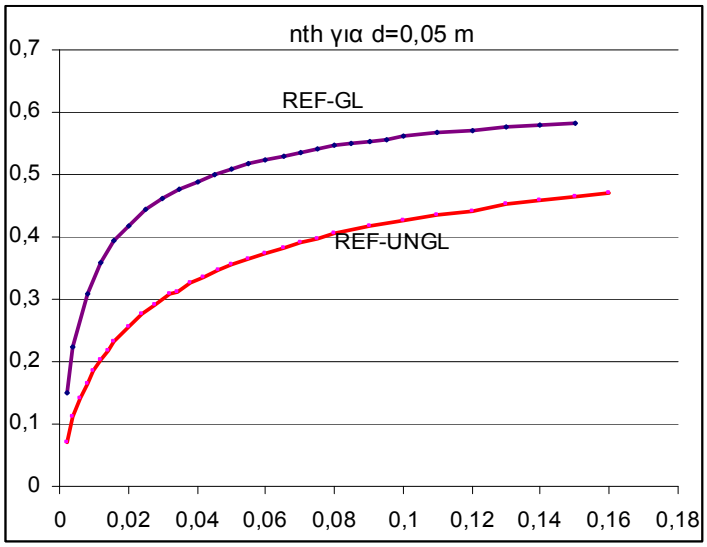
d(m)	$\dot{m}_{max}$(kg/sec)	$\eta_{th\ max}$
0,05	**0,152**	**0,583**

πίνακας Π.Α.2.6

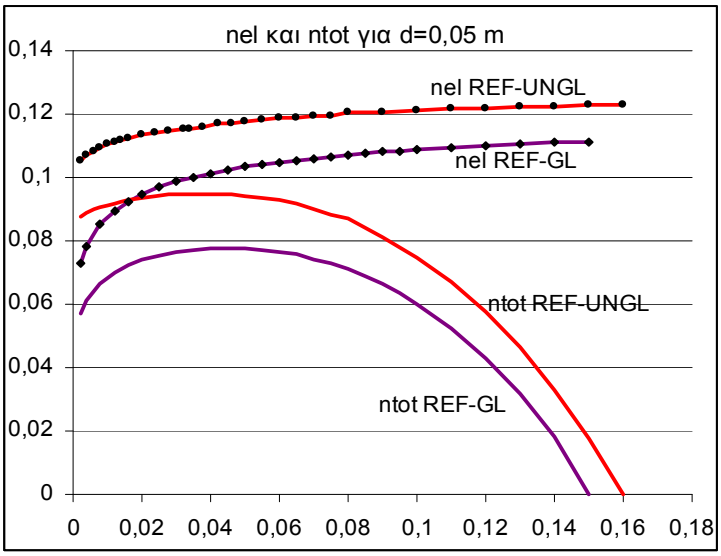
Διαπιστώνουμε αυτό που ήταν φανερό και πριν ότι δηλαδή η χρήση καλύμματος αυξάνει αρκετά τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Μάλιστα ο μέγιστος **η_{th}** είναι ίσος με **58,3%** έναντι μόλις **40%** του REFU.

Ακολουθεί η απευθείας σύγκριση των δύο διατάξεων.

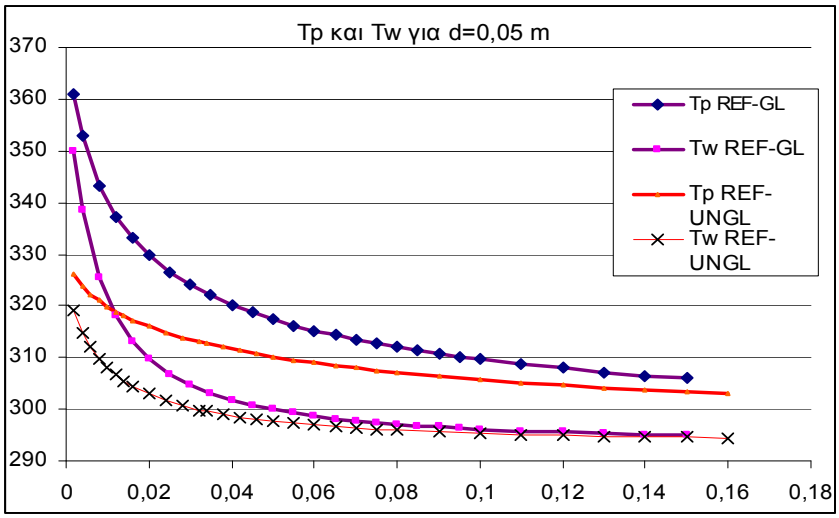
Α.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REFU-REFG



Σχ.Α.2.27 Σύγκριση nth



Σχ.Α.2.28 Σύγκριση nel-ntot



Σχ.Α.2.29 Σύγκριση θερόκρασιών

Α.2.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – συμπεράσματα

Απο τη σύγκριση προκύπτει οτι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παραδίδει το σύστημα είναι 9,49% ενώ με υαλοπίνακα ειναι 8,12% . Υπάρχει δηλαδή μια πτώση της τάξης του 15% στην ηλεκτρική ισχύ. Σε αντιστάθμισμα όμως στο σημείο αυτό , το σύστημα με υαλοπίνακα παραδίδει έναν θερμικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 53,1% έναντι 32,9% του συστήματος χωρίς κάλυμμα, υπάρχει δηλαδή μια αύξηση της θερμικής ισχύος της τάξης του 62%.

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη πολλές φορές το αν θα επιλέξουμε τη λύση του καλύμματος εξαρτάται απο το αν έχουμε την πολυτέλεια να κάνουμε το συμβιβασμό της μειωμένης ηλεκτρικής απόδοσης προκειμένου να παραλάβουμε περισσότερη θερμότητα.

Αυτό φυσικά εξαρτάται απο το είδος της εφαρμογής για την οποία προορίζεται ο συλλέκτης.

A.3 Η ΔΙΑΤΑΞΗ PVT TMS

Η πρώτη βελτίωση που θα μελετήσουμε προκειμένου να αυξήσουμε τον θερμικό βαθμό απόδοσης θα είναι η τοποθέτηση μιας μεταλλικής επιφάνειας στο εσωτερικό του αγωγού,παράλληλα στη ροή του αέρα.

Η επιφάνεια αυτή που στο εξής θα αναφέρεται ως TMS (Thin Metal Sheet) θα βοηθήσει στην μεταφορά θερμότητας με τον εξής μηχανισμό:

Η θερμότητα που ακτινοβολείται απο τον συλλέκτη απορροφάται από την επιφάνεια και αυξάνει τη θερμοκρασία της .

Ένα μέρος από αυτή μεταφέρεται στο ρευστό δια μέσου συναγωγής και το υπόλοιπο ακτινοβολείται προς το πίσω τοίχωμα .

Το πλεονέκτημα σε σχέση με την απλή διάταξη (REF) είναι προφανώς η αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας συναγωγής η οποία πραγματοποιείται κυρίως από την μεταλλική επιφάνεια στην ενδιάμεση θερμοκρασία T_t .

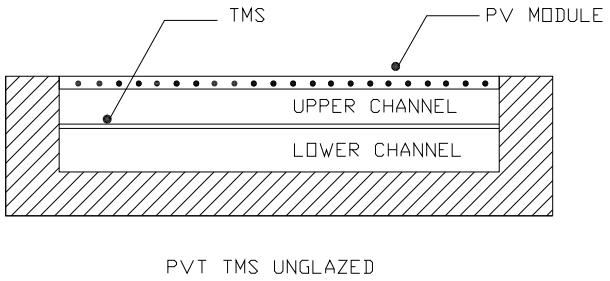
Έτσι, αυτό που αλλάζει πλέον κατά τους υπολογισμούς είναι η βρεχόμενη περίμετρος της εγκάρσιας διατομής, που αυξάνει, ενώ το εμβαδό της παραμένει πρακτικά το ίδιο. Η επιφάνεια δηλαδή έχει αμελητέο πάχος (κάποιων χιλιοστών).

Μια νέα παράμετρος που εισάγεται στην περίπτωση αυτή είναι ο λόγος παράκαμψης της ροής r που είναι ο λόγος των παροχών μάζας του άνω και του κάτω αγωγού που στη μελέτη μας λαμβάνεται ως **r=0,5**.

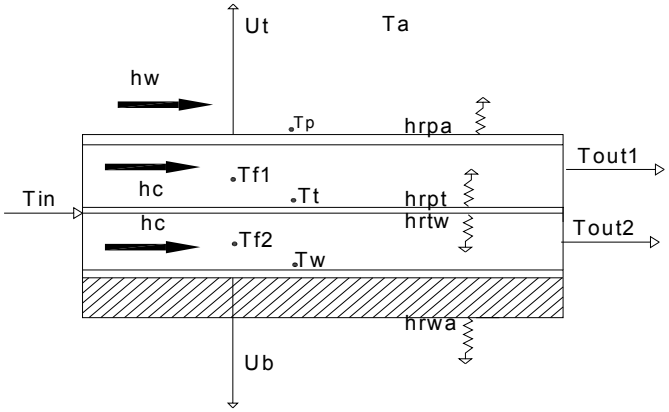
Και πάλι θα ξεκινήσουμε εξετάζοντας την απόδοση του TMSUNGL συστήματος,αυτού δηλαδή στο οποίο δεν έχει τοποθετηθεί κάλυμμα και θα δούμε πως επηρρεάζει τις βασικές παραμέτρους εξόδου η προσθήκη της TMS.

A.3.1 TMS UNGLAZED

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη που θα μελετηθεί.

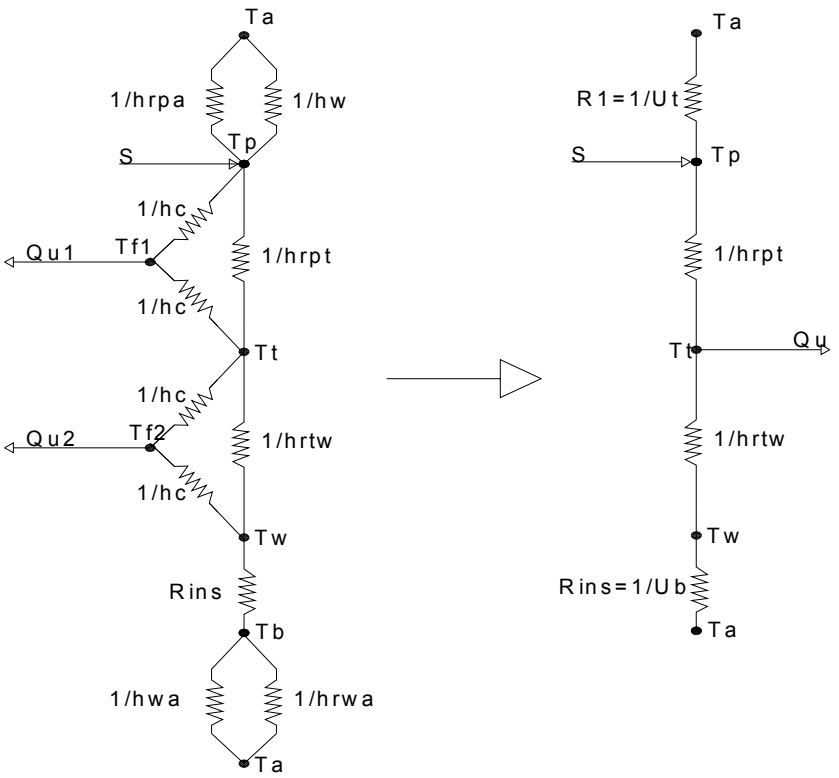


Σχ.Α.3.1 Εγάρσια τομή PVT TMS UNGLAZED



Σχ.Α.3.2 Παράλληλη τομή PVT TMS GLAZED

Το θερμικό κύκλωμα περιλαμβάνει επιπλέον τώρα και τον ενδιάμεσο κόμβο θερμοκρασίας T t .



Σχ.Α.3.3 Θερμικό κύκλωμα PVT REF UNGLAZED

Α.3.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ PVT TMS UNGL

Οι εξισώσεις ισορροπίας για κάθε κόμβο είναι:

PV MODULE

$$A_p \cdot I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1 - n_{el}) = A_p \cdot U_t \cdot (T_p - T_a) + A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_{f1}) + A_p \cdot h_{rpt} \cdot (T_p - T_t) \qquad \textbf{(A.3.1)}$$

ή με απαλοιφή της Ap

$$I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1 - n_{el}) = U_t \cdot (T_p - T_a) + h_c \cdot (T_p - T_{f1}) + h_{rpt} \cdot (T_p - T_t) \quad .$$

που δίνει :

$$I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1 - n_{el}) - U_t \cdot (T_p - T_a) - h_c \cdot (T_p - T_{f1}) - h_{rpt} \cdot (T_p - T_t) = 0 \qquad \textbf{(A.3.2)}$$

FLUID 1

$$r \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout1} - T_{fin}) = A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_{f1}) + A_p \cdot h_c \cdot (T_t - T_{f1})$$

που γίνεται :

$$r \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout1} - T_{fin}) - A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_{f1}) - A_p \cdot h_c \cdot (T_t - T_{f1}) = 0 \qquad \textbf{(A.3.3)}$$

TMS

$$h_{rpt} \cdot (T_p - T_t) = h_c \cdot (T_t - T_{f1}) + h_c \cdot (T_t - T_{f2}) + h_{rt} \cdot (T_t - T_w) \qquad \textbf{(A.3.4)}$$

FLUID 2

$$(1-r) \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot \left(T_{fout2} - T_{fin}\right) = A_p \cdot h_c \cdot \left(T_t - T_{f2}\right) + A_{int} \cdot h_c \cdot \left(T_w - T_{f2}\right)$$

που γίνεται :

$$(1-r) \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot \left(T_{fout2} - T_{fin}\right) - A_p \cdot h_c \cdot \left(T_t - T_{f2}\right) - A_{int} \cdot h_c \cdot \left(T_w - T_{f2}\right) = 0 \qquad \textbf{(A.3.5)}$$

BACK WALL

$$A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) = A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) + A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a)$$

που δίνει :

$$A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) - A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) - A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a) = 0 \qquad \textbf{(A.3.6)}$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Θεωρήσαμε και εδώ ότι οι επιφάνειες του πάνελ **Ap** και της **TMS** εχουν το ιδιο εμβαδο δηλ. :

$$A_p = A_t$$

Επίσης για τους συντελεστές ακτινοβολίας μεταξύ των επιφανειών έγινε και πάλι η καθιερωμένη παραδοχή των άπειρων παραλλήλων επιπέδων επιφανειών .

Θα πρέπει να επισημανθεί οτι ως θερμοκρασία εξόδου έχει ληφθεί ο μέσος όρος των $\mathbf{T_{out1}}$ και $\mathbf{T_{out2}}$:

$$T_{out} = \frac{T_{out1} + T_{out2}}{2}$$

Θεωρούμε δηλαδή ότι τα δυο ρεύματα αναμιγνύονται αδιαβατικά κατα την έξοδό τους

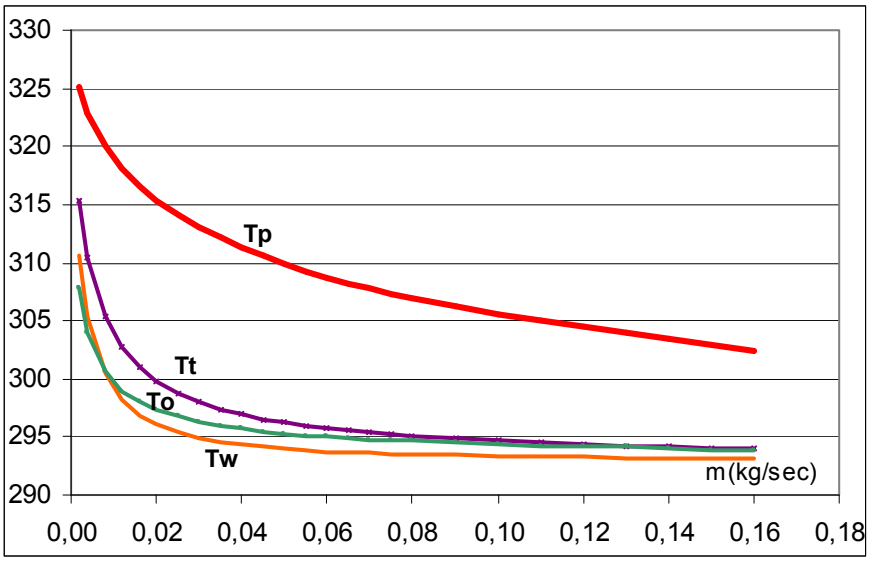
Στα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν θα θεωρούμε ως θερμοκρασία T_f του ρευστού τον αριθμητικο μεσο **των** T_{f1} **,** T_{f2} δηλαδη **:**

$$T_f = \frac{T_{f1} + T_{f2}}{2}$$

Ακολουθεί και πάλι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την απόδοση του συλλέκτη με τη μορφή διαγραμμάτων,συναρτήσει της παροχής μάζας αέρα για τις τρεις τιμές της d .

Α.3.1.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ (TMSU)

Μεταβολή των βαθμών απόδοσης με την παροχη μαζας για d=0,05



$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
Vw = 1,5 m/sec
$d_{ins} = 0{,}05$ m
$k_{ins} = 0{,}027$ W/m×K
d = 0,05 m

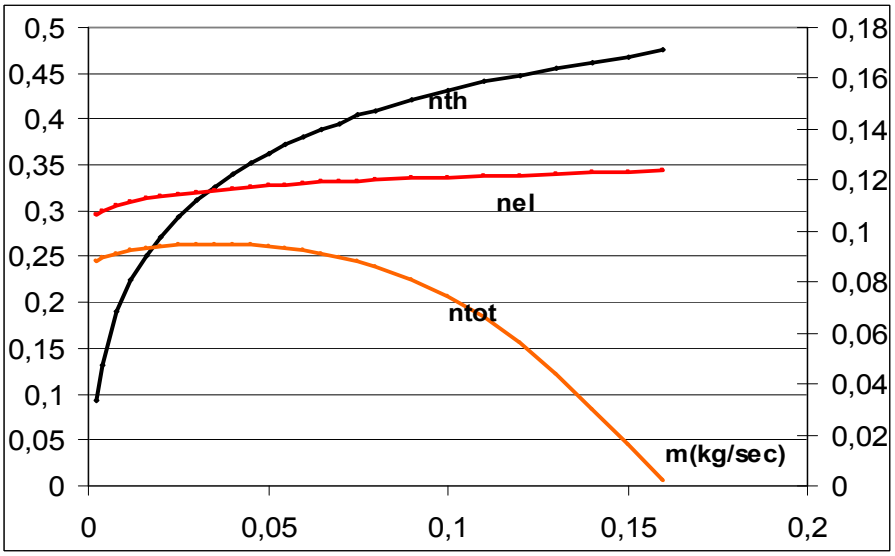
Σχ.Α.3.4 Μεταβολή θερμοκρασιών με την παροχή (TMSU)

Εκ πρώτης όψεος οι θερμοκρασίες φαίνεται να ειναι στα ιδια επιπεδα με το REF σύστημα.

Επίσης έχει σημανθεί και η θερμοκρασία της ενδιάμεσης μεταλλικής επιφάνειας η οποία είναι κατά τι μεγαλύτερη αυτής του τοιχώματος αφού η TMS είναι ο αμεσος αποδέκτης της ακτινοβολίας του πάνελ.

Δεδομένης της επαφής του ρευστού με την TMS και του τρόπου υπολογισμού της To δεν πρέπει να μας παραξενεύει το γεγονός οτι **T_o>T_w.**

Μεταβολή των θερμοκρασιών με την παροχή μαζας για d=0,05



$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
Vw = 1,5 m/sec
$d_{ins} = 0{,}05$ m
$k_{ins} = 0{,}027$ W/m×K
d = 0,05 m

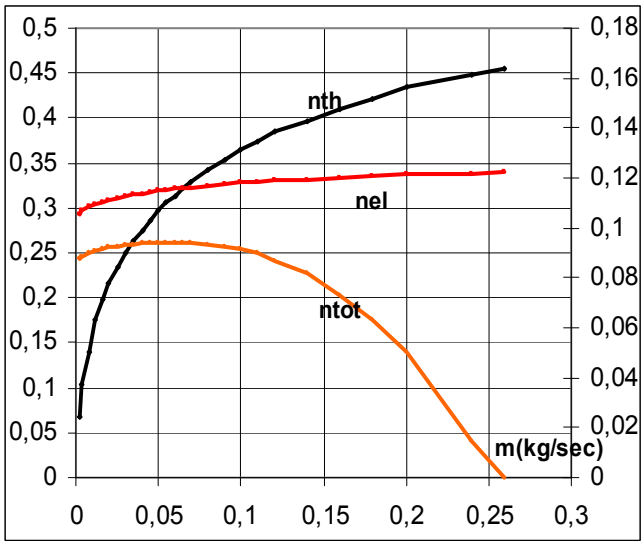
Σχ.Α.3.5 Μεταβολή β.α με την παροχή (TMSUNGL)

Με μια πρώτη ματιά είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς πως η διάταξη T**MS** εμφανίζει σαφώς ανώτερο θερμικό β.α από την αντίστοιχη **REF** ενώ για τον ηλεκτρικό και τον καθαρό ηλεκτρικό β.α δεν μπορεί να γίνει ακόμα λόγος

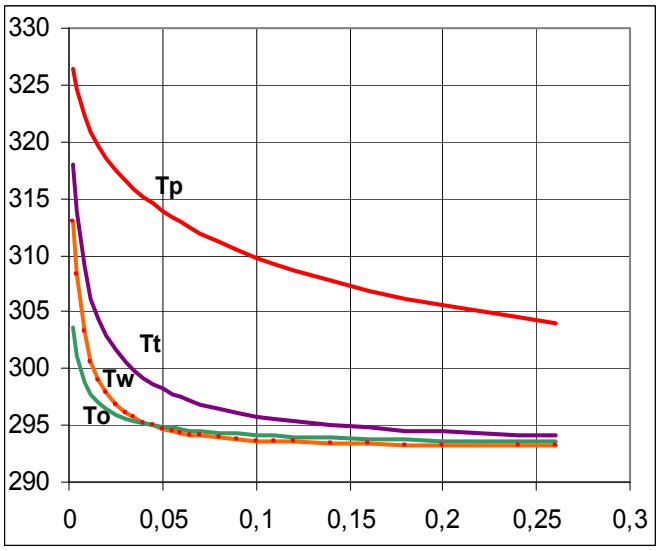
Θα δούμε τι συμβαίνει παρακάτω όταν θα γίνει η αναλυτική σύγκριση των συλλεκτών.

Μεταβολή των β.α και των θερμοκρασιών με την παροχη για d=0,10 και d=0,15 m

$I_r = 800 \quad W/m^2$	$T_a = 293 \quad K$
$d_{ins} = 0{,}05 \quad m$	$d = 0{,}10 \quad m$

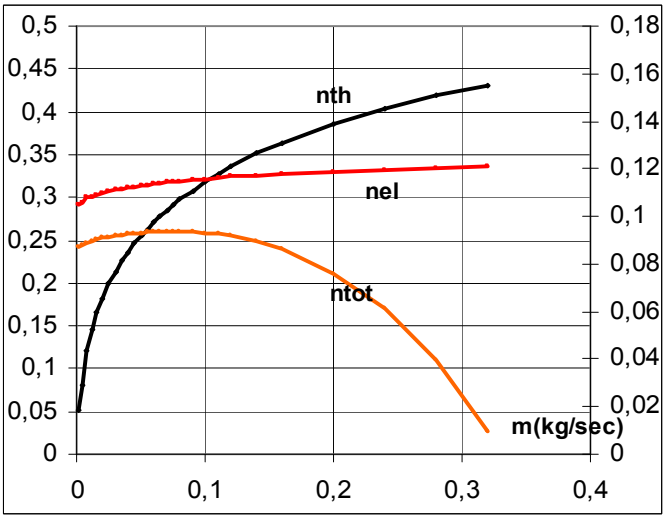


Σχ.Α.3.6 Μεταβολή β.α- παροχή (d=0,10 m)

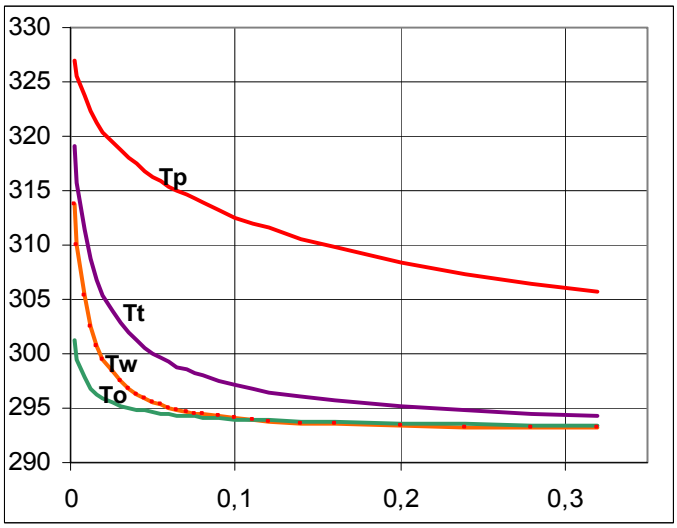


Σχ.Α.3.7 Μεταβολή θερμοκρασιών- παροχή (d=0,10 m)

$I_r = 800 \quad W/m^2$	$T_a = 293 \quad K$
$d_{ins} = 0{,}05 \quad m$	$d = 0{,}15 \quad m$

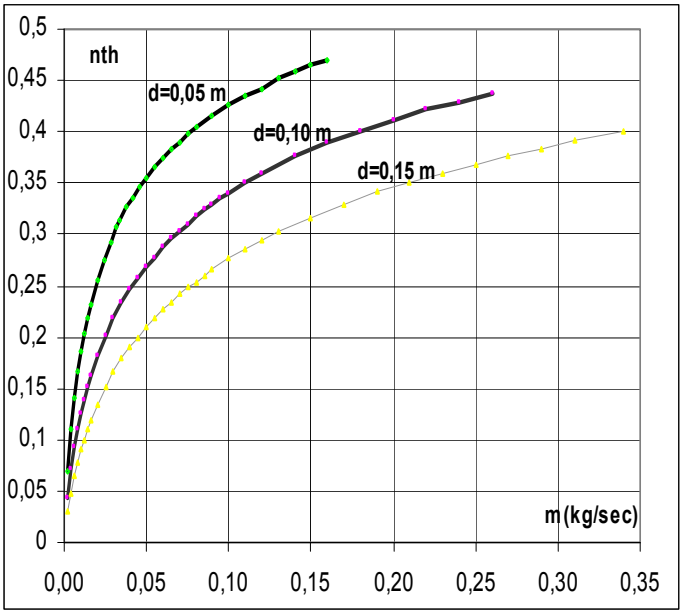


Σχ.Α.3.8 Μεταβολή β.α- παροχή (d=0,15 m)

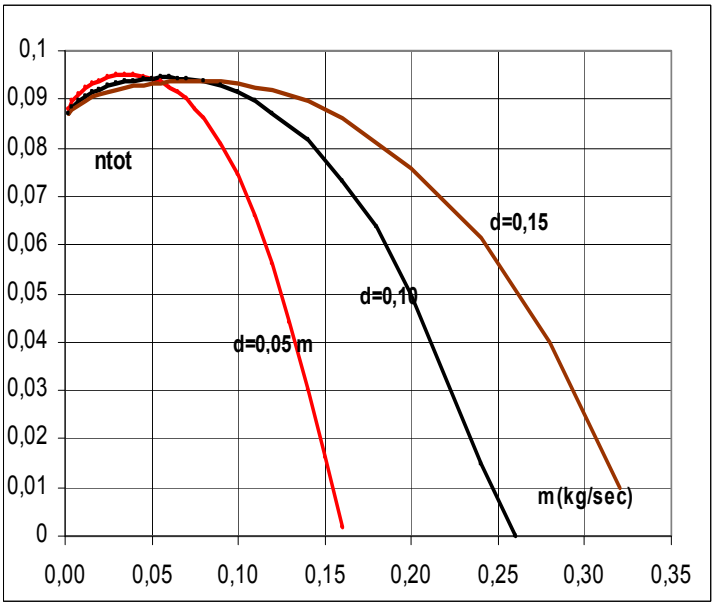


Σχ.Α.3.9 θερμοκρασιών- παροχή (d=0,15 m)

Α.3.1.3 Σύγκριση βαθμών απόδοσης για d=0,05 , d=0,10 και d=0,15



Σχ.Α.2.19 Σύγκριση των θερμικών θαθμών απόδοσης



Σχ.Α.2.20 Σύγκριση των καθαρων ηλεκτρικών β.α

Αποτελέσματα για το σημείο βέλτιστης παροχής

TMS - UNGL

$d(m)$	$\dot{m}_o(kg/\sec)$	n_{tho}	n_{elo}	n_{tot}	$T_{pm}(m_o)$	$T_{wm}(m_o)$
0,05	**0,036**	**0,329**	**0,1164**	**0,0952**	**311,74**	**294,56**
0,10	**0,064**	**0,32**	**0,1158**	**0,0944**	**312,9**	**294,29**
0,15	**0,082**	**0,306**	**0,1150**	**0,0937**	**313,6**	**294,05**

πίνακας Π.Α.3.1

Αποτελέσματα για το σημείο μέγιστης παροχής

TMS - UNGL

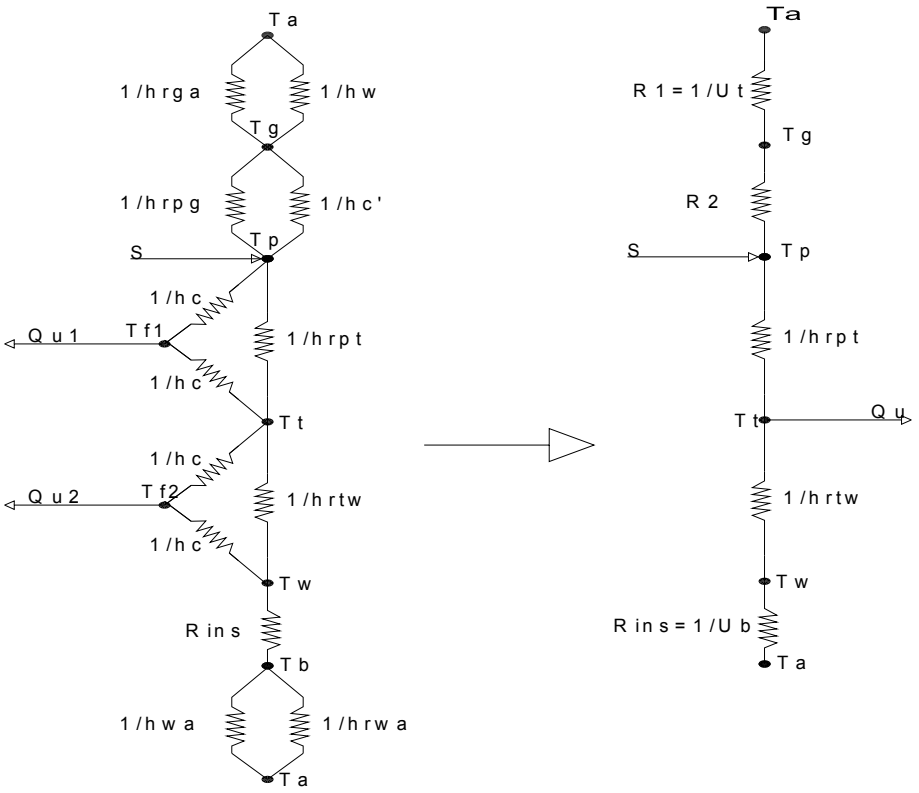
$d(m)$	$\dot{m}_{max}(kg/\sec)$	$n_{th\ max}$
0,05	**0,161**	**0,476**
0,10	**0,26**	**0,455**
0,15	**0,335**	**0,4339**

πίνακας Π.Α.3.2

Από τα παραπάνω στοιχεία, βλέπουμε και πάλι όπως αναμενόταν το όφελος απο τη μικρή απόσταση τοποθέτησης της επιφάνειας του ΦΒ συλλέκτη, ενώ μπορούμε να παρατηρήσουμε και την πτώση της θερμοκρασίας **Tw** λόγω της σκίασης που δέχεται απο την ενδιάμεση επιφάνεια.

A.3.2 TMS GLAZED

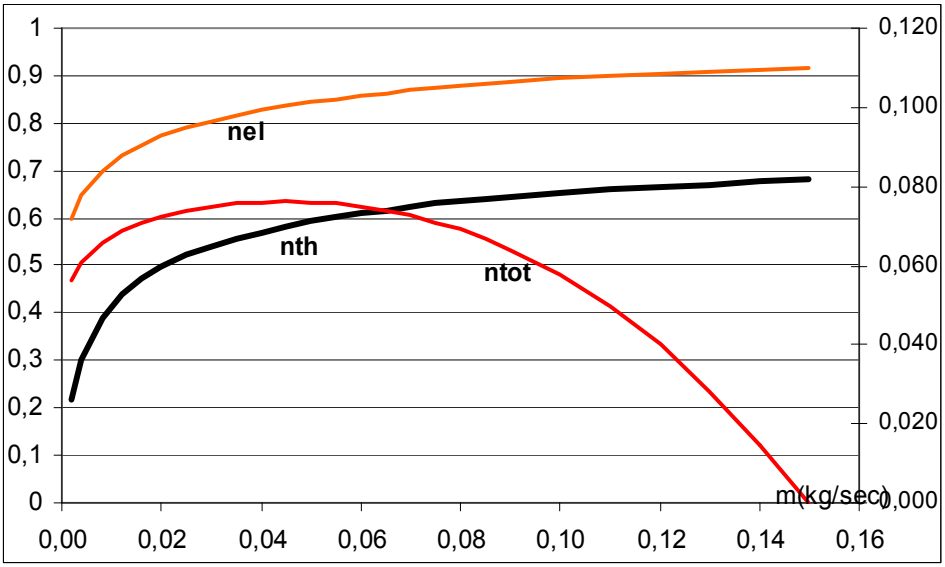
Σε αυτή τη συντομη παράγραφο θα δούμε την επίδραση που έχει η προσθήκη διαφανούς καλύμματος στις θερμοκρασίες και στους βαθμούς απόδοσης της διάταξης TMS .



Σχ.Α.3.10 Θερμικό κύκλωμα PVT TMS GLAZED

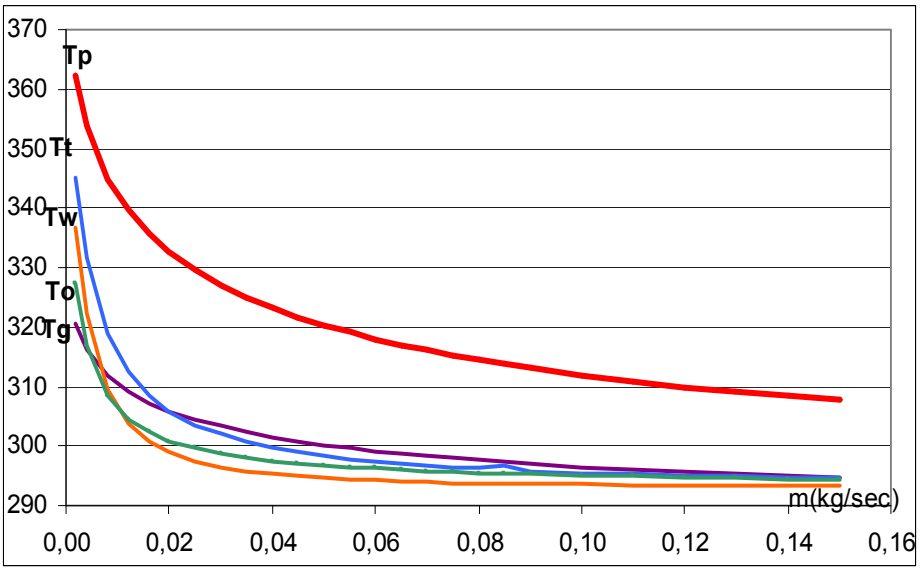
Α.3.2.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ (TMSG)

Μεταβολή των βαθμών απόδοσης με την παροχη μαζας για d=0,05



Σχ.Α.3.11 Μεταβολή β.α με την παροχή (TMSGL)

Μεταβολή των βαθμών απόδοσης με την παροχη μαζας για d=0,05



Σχ.Α.3.12 Μεταβολή θερμοκρασιών με την παροχή (TMSG)

Στους πίνακες που ακολουθούν μπορούμε να δούμε τις ακριβείς αριθμητικές τιμές των κυίων μεγεθών εξόδου τόσο στο σημείο **mo** όσο και στο σημείο **mmax**

$d(m)$	$\dot{m}_o(kg/sec)$	n_{tho}	n_{elo}	n_{tot}	$T_{pm}(m_o)$	$T_{wm}(m_o)$	$T_{gm}(m_o)$
0,05	**0,046**	**0,5824**	**0,1003**	**0,0761**	**321,7**	**295**	**300,02**

Πίνακας Π.Α.3.3

d(m)	$\dot{m}_{max}(kg/sec)$	n_{thmax}
0,05	**0,150**	**0,68**

πίνακας Π.Α.3.4

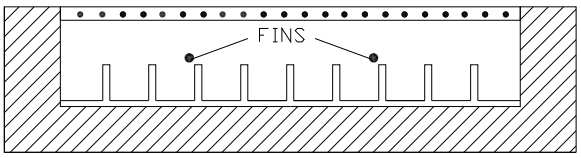
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Είναι αξιοσημείωτο ότι **παρά** την προσθήκη υαλοπίνακα στο TMS , η θερμοκρασία του τοιχώματος Tw παραμένει στα ίδια χαμηλα επίπεδα λόγω της σκίασης που δέχεται η αντίστοιχη επιφάνεια, ενώ η θερμοκρασία του πανελ ανεβαίνει κατά πολλους βαμούς μειώνοντας και τη ηλεκτρική απόδοση .

Ένα αλλο σημαντικό χαρακτηριστικο, είναι ότι φαίνεται να πετυχαίνουμε αρκετά καλύτερη θερμική αποδοση σε σχεση με το **REFGL** ενω όπως είδαμε η αντίστοιχη βελτίωση απο **REFU** σε **TMSU** ήταν αμελητέα για το δεδομενο βαθος των **5cm.**

Α.4 Η ΔΙΑΤΑΞΗ PVT FIN

Η δεύτερη "έξυπνη" βελτίωση που μπορούμε να κάνουμε είναι να τοποθετήσουμε μεταλλικά πτερύγια (fins) ψύξης που είναι πακτωμένα στο οπίσθιο τοίχωμα. Τα πτερύγια ασφαλώς τοποθετούνται παράλληλα στη ροή του αέρα.

Με τον τρόπο αυτό αυξάνουμε σημαντικά την συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή ανάμεσα στο τοίχωμα και τον αέρα χάρη στην αυξημένη επιφάνεια συναλλαγής τους.



PVT FIN UNGLAZED

Σχ.Α.4.1 Εγκάρσια τομή PVT FIN (UNGLAZED)

Α.4.1 Στοιχεία θεωρίας πτερυγίων

Όπως είναι γνωστό από τη μεταφορά θερμότητας , η ροή θερμότητας από ένα σώμα προς ενα ρευστό που το περιβάλλει είναι κάθετη προς την εξωτερική επιφάνεια του σώματος .

Στην περίπτωση που μπορούμε να δεχτούμε οτι η μετάδοση θερμότητας γίνεται μεταξύ μιας επίπεδης επιφάνειας με εμβαδό A και σταθερή θερμοκρασία T_w και ενός ρευστού θερμοκρασίας T_f ,με συντελεστή συναγωγής h_c τότε η θερμότητα που μεταφέρεται ειναι: $\dot{Q}=A \cdot h_c \cdot (T_w-T_f)$

Θέλοντας να ενισχύσουμε την ροή αυτή θα πρέπει να αυξήσουμε κάποιους από τους όρους της πιο πάνω εξίσωσης.

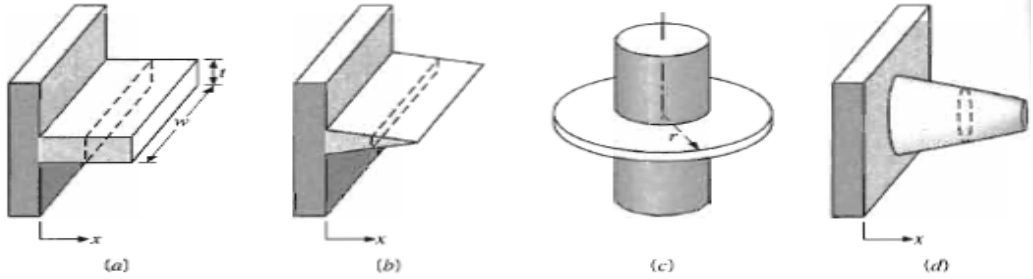
Με δεδομένα τα T_w, T_f θα πρέπει να ασχοληθούμε με τους άλλους δύο.

Επειδή όμως ο συντελεστής συναγωγής αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας της ροής του ρευστού , γεγονός που σημαίνει την κατανάλωση ισχύος , προτιμότερο είναι να αυξήσουμε την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας .

Η επιλογή ωστόσο της επιφάνειας πρέπει να είναι τέτοι ώστε να μην προκαλεί αυξημένες αντιστάσεις στη ροή.

Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των πτερυγίων ψύξης που είναι μακρόστενα συνήθως σώματα, σταθερής ή μεταβαλλόμενης εγκάρσιας διατομής, που τοποθετούμε πάνω στην επιφάνεια και έτσι ώστε η κύρια διάσταση τους να είναι κάθετη σε αυτή.

Τα πτερύγια λόγω της μεγάλης τους επιφάνειας ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας.

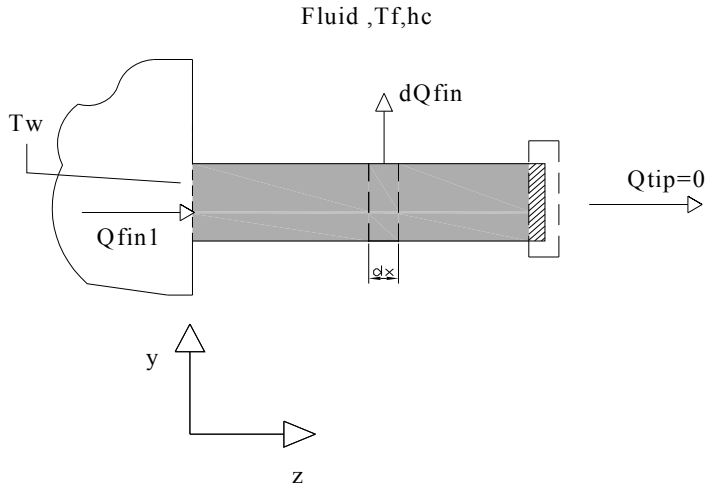


Σχ.Α.4.2 Διάφορες Γεωμετρίες πτερυγίων

Για να μελετήσουμε καλύτερα την λειτουργία των πτερυγίων ας υποθέσουμε ότι τοποθετούμε ένα πτερύγιο σταθερής ορθογωνικής διατομής εμβαδού **A_{cf}** με ύψος **H_{fin}** περίμετρο **P** και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας **k_{fin}** .

Τότε η θερμότητα από την επίπεδη επιφάνεια δεν μεταφέρεται απευθείας στο ρευστό, αλλά εισρέει στη βάση του πτερυγίου.

Για μεγαλύτερη ευκολία δεχόμαστε ότι λόγω της γεωμετρίας υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας λόγω αγωγής,μόνο κατά μήκος της κύριας διάστασής του **z** (μονοδιάστατη αγωγή)



Σχ.Α.4.3 Πτερύγιο ορθογωνικής διατομής

Κατά τα γνωστά από τη διατήρηση της ενέργειας προκύπτει η διαφορική εξίσωση που δίνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του πτερυγίου καθ'ύψος :

$$\frac{d^2T}{dz^2} - \frac{h_c \cdot P}{k_f \cdot A_{cf}} \cdot \left(T - T_f\right) = 0 \qquad \textbf{(A.3.2)}$$

Οριακές Συνθήκες

Η πρώτη οριακή συνθήκη είναι η κοινή θερμοκρασία του τοιχώματος και της βάσης του πτερυγίου :

$$T(0)=T_w \qquad \textbf{(A.3.3)}$$

Η δεύτερη οριακή συνθήκη που χρειαζόμαστε για να λύσουμε την εξίσωση προκύπτει απο την παραδοχή της αδιαβατικής κορυφής το πτερυγίου (**adiabatic fin tip**) δηλαδή:

$$\frac{dT}{dz}\Big|_{z=Hf} = 0 \qquad \textbf{(A.3.4)}$$

Ασφαλώς η ο.σ αυτή δεν είναι απολύτως ακριβής αλλά ωστόσο μας ικανοποιεί καθώς απλοποιεί σημαντικά τους υπολογισμούς ενώ το σφάλμα που εμφανίζεται μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Η θερμότητα που εισέρχεται από τη βάση του πτερυγίου είναι:

$$\dot{Q}_{fin1}=A_{cf}\cdot\left(-k_f\cdot\frac{dT}{dz}\Big|_{z=0}\right) \qquad \textbf{(A.3.5)}$$

Η θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό είναι:

$$\dot{Q}_{fin2}=P\cdot h_c\cdot\int_0^{Hf}\left(T-T_f\right)\cdot dz \qquad \textbf{(A.3.6)}$$

και αφού βρισκόμαστε στη μόνιμη κατάσταση :

$$\dot{Q}_{fin1}=\dot{Q}_{fin2}\longrightarrow -A_{cf}\cdot\left(k_f\cdot\frac{dT}{dz}\Big|_{z=0}\right)=P\cdot h_c\cdot\int_0^{Hf}\left(T-T_f\right)\cdot dz \qquad \textbf{(A.3.7)}$$

Βλέπουμε λοιπόν οτι για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τις παραπάνω σχέσεις χρειάζεται να λύσουμε τη διαφορική εξίσωση και να βρούμε το πεδίο της θερμοκρασίας T.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι εμφανές ότι το πτερύγιο δρα ως επιπλέον θερμική αντίσταση, δυσκολεύοντας τη μεταφορά θερμότητας απο το τοίχωμα στο ρευστό.

Αυτή η δυσκολία ελλατώνεται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του πτερυγίου.

Έτσι η κλίση της θερμοκρασίας T αμβλύνεται και στην οριακή περίπτωση όπου $k_f\rightarrow\infty$ το πτερύγιο θα εμφανίζει ομοιόμορφη θερμοκρασία $T=T_w$

Στην περίπτωση αυτή μεγιστοποιείται και η ροή θερμότητας για την συγκεκριμένη γεωμετρία πτερυγίου :

$$\dot{Q}_{fin(\max)}=P\cdot h_c\cdot\int_0^{Hf}\left(T-T_f\right)\cdot dz\longrightarrow\dot{Q}_{fin(\max)}=P\cdot h_c\cdot\left(T_w-T_f\right) \qquad \textbf{(A.3.8)}$$

<u>Βαθμός απόδοσης</u>

Ορίζουμε ως βαθμό απόδοσης του πτερυγίου , το πηλίκο της θερμότητας που απάγει προς την μέγιστη θερμότητα απαγωγής :

$$nf=\frac{\dot{Q}_{FIN}}{\dot{Q}_{FIN(\max)}}\quad\longrightarrow\quad nf=\frac{\int_0^{Hf}\left(T-T_f\right)\cdot dz}{\left(T_w-T_f\right)} \qquad \textbf{(A.3.9)}$$

Λύνοντας τη διαφορική εξίσωση της κατανομής της θεμροκρασίας βρίσκουμε οτι :

$$nf=\frac{\tanh(m\cdot H_f)}{m\cdot H_f}\quad \text{όπου}\quad m=\sqrt{\frac{P\cdot hc}{k_f\cdot A_{cf}}} \qquad \textbf{(A.3.10)}$$

Έτσι λοιπόν έχουμε το δικαίωμα να γράφουμε :

$$\dot{Q}_{FIN}=n_f\cdot A_f\cdot h_c\left(T_w-T_f\right) \qquad \textbf{(A.3.11)}$$

όπου προφανώς είναι :

$$A_f = P \cdot H_f$$

Βαθμός Αποτελεσματικότητας

Το γεγονός ότι τα πτερύγια είναι ταυτόχρονα και θερμικές αντιστάσεις σημαίνει ότι δεν είναι πάντοτε ενδεδειγμένη η χρήση τους όταν έχουμε προβλήματα απαγωγής θερμότητας.

Κριτήριο για το εάν τελικά πετυχαίνουμε βελτίωση της θερμοροής με τη χρηση πτερυγίων αποτελεί ο βαθμός αποτελεσματικότητας του πτερυγίου ε_f.

Αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της θερμορροής που πετυχαίνουμε με το πτερύγιο προς την αντίστοιχη που θα υπήρχε από επιφάνεια του τοιχώματος θερμοκρασίας **Tw** ίση με την επιφάνεια βάσης του πτερυγίου :

$$\varepsilon f = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{fin}}{h_c \cdot A_{cf} \cdot (T_w - T_f)}} \qquad \textbf{(A.3.12)}$$

Η σχέση του ε_f με το n_f ειναι :

$$\varepsilon f = \frac{A_f}{A_{cf}} \cdot n_f \qquad \textbf{(A.3.13)}$$

Η έκφραση (1) έχει το πλεονέκτημα ότι στην ειδική περίπτωση που το πτερύγιο θεωρηθεί ως ένα σώμα άπειρου μήκους γίνεται :

$$\varepsilon f = \sqrt{\frac{k_f \cdot P}{h_c \cdot A_{cf}}} \qquad \textbf{(A.3.14)}$$

Συνήθως θεωρούμε επιτυχημένη τη χρήση πτερυγίου , όταν :

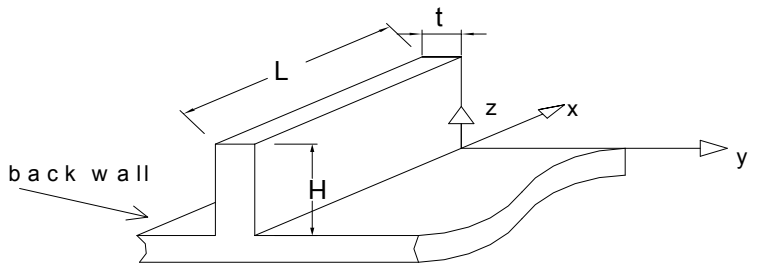
$\varepsilon_f \geq 2$ δηλαδη : $\dfrac{kf \cdot P}{h \cdot A_{cf}} \geq 4$

Από την ανάλυση της σχέσης αυτής γίνεται φανερό ότι για καλύτερη αποτελεσματικότητα απαιτούμε πτερύγια μακρόστενα απο υλικό με υψηλή αγωγιμότητα .

Επιπλέον η χρήση των πτερυγίων κρίνεται πιο επιτυχημένη σε ροές με χαμηλό συντελεστή συναγωγής όπως είναι αυτές της φυσικής κυκλοφορίας ρευστών ή της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αερίων μέσων.

Γεωμετρία και χαρακτηριστικά του συστήματος

Η γεωμετρία που θα προτιμήσουμε στο σύστημα μας είναι τα πτερύγια σταθερής ορθογωνικής διατομής (Σχ. (α))



Σχ.Α.4.4 Γεωμετρία πτερυγίου

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά των πτερυγίων που επιλέξαμε καθώς και τη σχέση τους με ορισμένα γεωμετρικά στοιχεία του συλλέκτη :

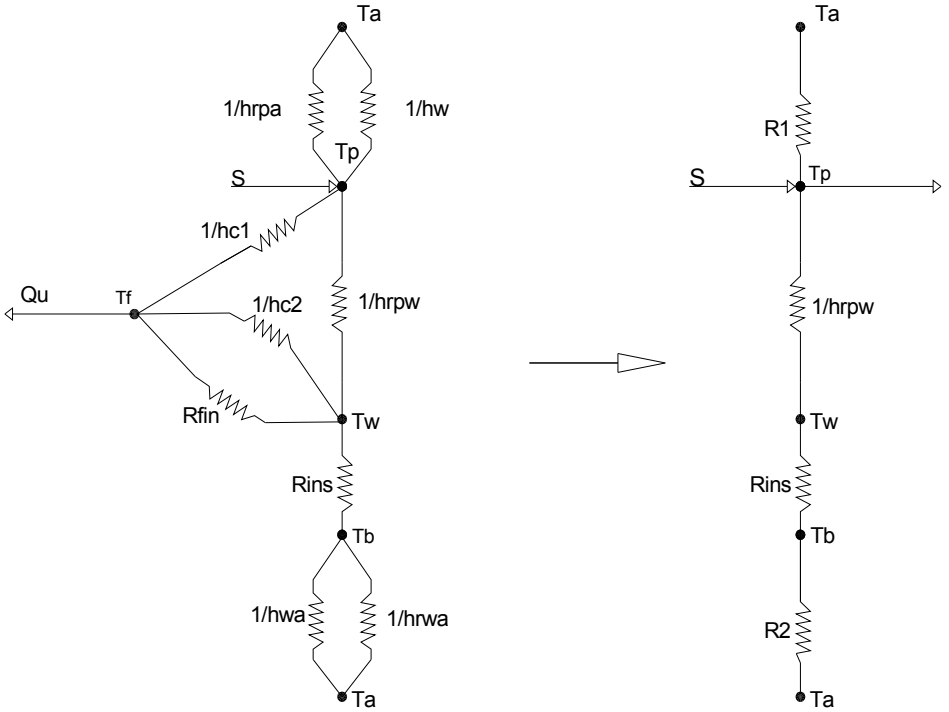
πίνακας Α.4.1 Χαρακτηριστικά πτερυγίου

$L_f=L$	ΜΗΚΟΣ
$H_f=0,5\cdot d$	ΥΨΟΣ
$t=1\ mm$	ΠΑΧΟΣ
$P \simeq 2\cdot L$	ΠΕΡΙΜΕΤΡΟΣ
$k_f=120\quad W/(m^2\times K)$	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ
$N_f=15$	ΠΛΗΘΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ
$A_f=P\cdot H_f$	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ
$A_{cf}=t\cdot H_f$	ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Σχόλιο : Όπως βλέπουμε , επιλέξαμε το ύψος των πτερύγιων να είναι το μισο της απόστασης d ενώ για τον συντελεστής $\mathbf{k_f}$ επιλεχθηκε μια τυπική τιμή που αντιστοιχεί σε κράματα αλουμινίου που ειναι και τα συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά.

Α.4.2 FIN UNGLAZED

Το θερμικό κύκλωμα έχει διορθωθεί σε σχεση με το REFUώστε να περιλάβει κι την αντίσταση των πτερυγίων που συμβολίζεται με R_{fin}



Σχ.Α.4.5 Θερμικό κύκλωμα PVT FIN UNGLAZED

A.4.2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ PVT FIN UNGL

.

PV MODULE

Ισχύει η εξίσωση που είδαμε στο REF σύστημα δηλαδή η (1)

$$I_r \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot (1-n_{el}) - U_t \cdot (T_p - T_a) - h_c \cdot (T_p - T_f) - h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) = 0 \qquad \textbf{(A.3.15)}$$

FLUID

Η εξίσωση διαφοροποιείται ελαφρώς καθώς το ρευστό παίρνει θερμότητα και από τα πτερύγια έτσι:

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout} - T_{fin}) = A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_f) + A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) + Q_{fin}$$

που γίνεται όμως σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση :

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout} - T_{fin}) = A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_f) + A_{int} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) + n_{fin} \cdot A_{fin} \cdot h_c \cdot (T_w - T_f)$$

όπου :

$A_{fin} = 2 \cdot N \cdot L \cdot H_{fin}$ είναι η συνολική επιφάνεια των πτερυγίων

Τελικά :

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fout} - T_{fin}) - A_p \cdot h_c \cdot (T_p - T_f) - (A_{int} + n_{fin} \cdot A_{fin}) \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) = 0 \qquad \textbf{(A.3.16)}$$

BACK WALL

Ομοίως ενσωματώνουμε την Q_{fin} ως ροή θερμότητας απο το τοίχωμα

$$A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) = (A_{int} + n_{fin} \cdot A_{fin}) \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) + A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a)$$

που δίνει :

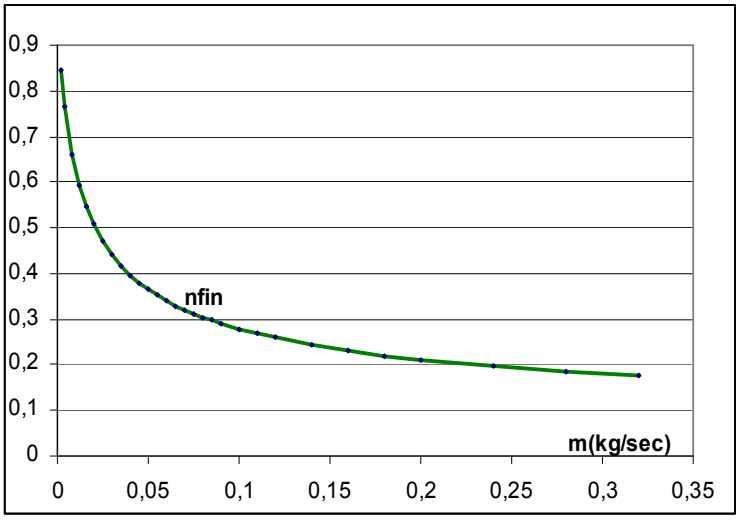
$$A_p \cdot h_{rpw} \cdot (T_p - T_w) - (A_{int} + n_{fin} \cdot A_{fin}) \cdot h_c \cdot (T_w - T_f) - A_p \cdot U_b \cdot (T_w - T_a) = 0 \qquad \textbf{(A.3.17)}$$

Α.4.2.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ (FINU)

Μεταβολή των βαθμών απόδοσης με την παροχή μάζας για d=0,05

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε πως μεταβάλλεται ο βαθμός απόδοσης του πτερυγίου συναρτήσει της **παροχής μάζας** .

Παρόλο που τα αποτελέσματα αφορούν σε βάθος καναλιού d=0,15m , δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά για άλλες τιμές του d.

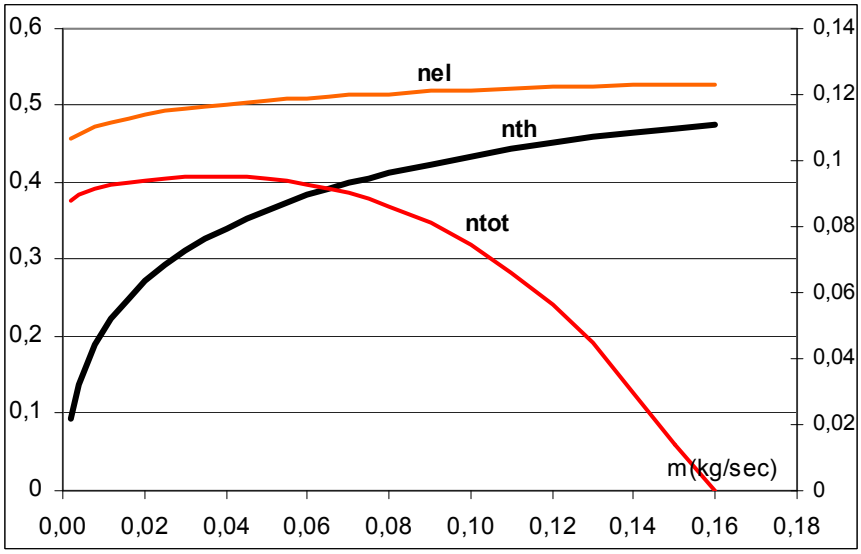


I_r = 800 W/m^2
T_a = 293 K
Vw = 1,5 m/sec
d ins = 0,05 m
kins= 0,027 W/m×K
d = 0,15 m

Σχ.Α.4.6 Μεταβολή βαθμού απόδοσης πτερυγίου

Όπως γίνεται φανερό , η αύξηση της παροχής προκαλεί μια εκθετική μείωση του βαθμου αποδοσης των πτερυγιων ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης αύξησης του συντελεστή συναγωγής της ροής .

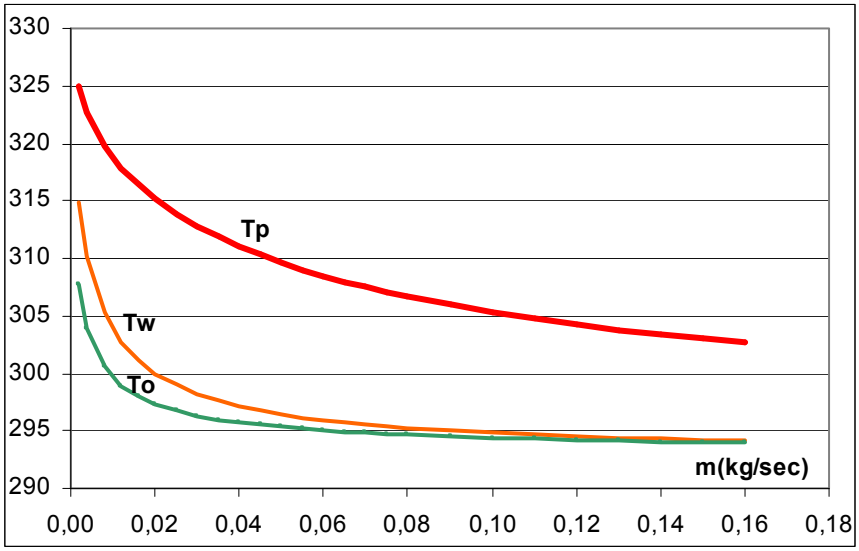
Μεταβολή των βαθμών απόδοσης με την παροχή μάζας για d=0,05



I_r = 800 W/m^2
T_a = 293 K
Vw = 1,5 m/sec
d ins = 0,05 m
kins= 0,027 W/m×K
d = 0,05 m

Σχ.Α.4.7 Μεταβολή β.α με την παροχή (FINU)

Μεταβολή των θερμοκρασιών με την παροχη μαζας για d=0,05

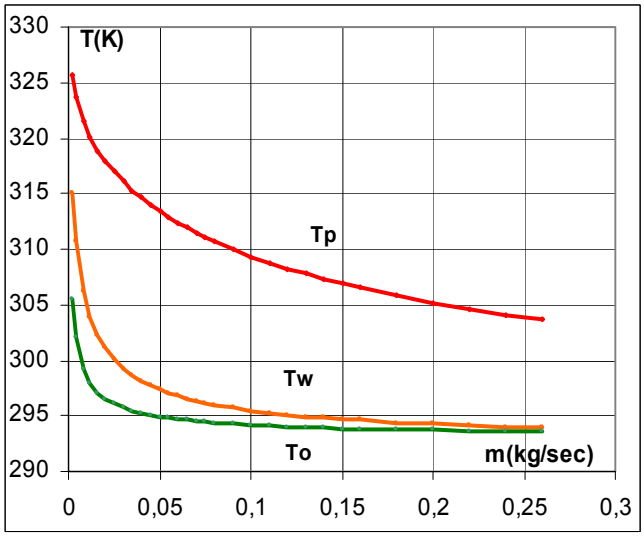


$I_r = 800$ W/m^2
$T_a = 293$ K
Vw = 1,5 m/sec
d ins = 0,05 m
kins= 0,027 W/m×K
d = 0,05 m

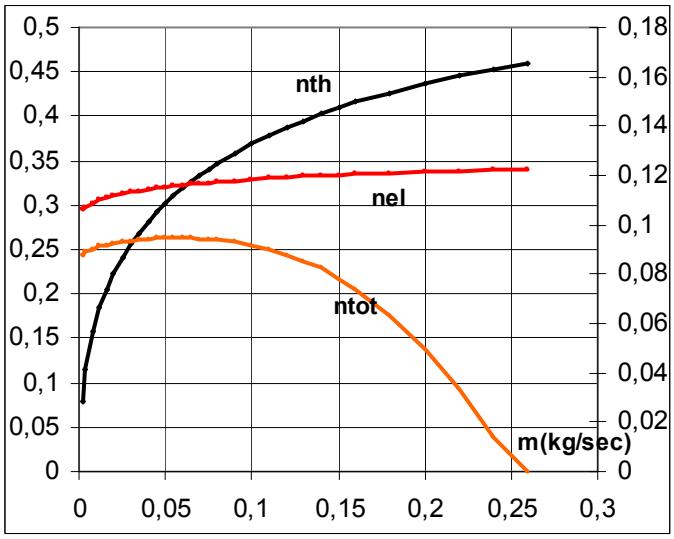
Σχ.Α.4.8 Μεταβολή θερμοκρασιών με την παροχή (FING)

Μεταβολή των β.α και των θερμοκρασιών με την παροχη για d=0,10 και d=0,15 m

$I_r = 800$ W/m^2	$T_a = 293$ K
$d_{ins} = 0,05$ m	$d = 0,10$ m

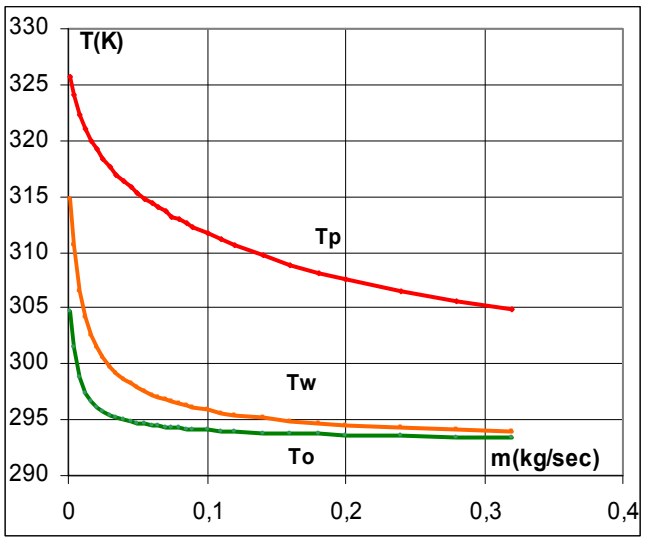


Σχ.Α.4.9 Μεταβολή θερμοκρασιών- παροχή (d=0,10 m)

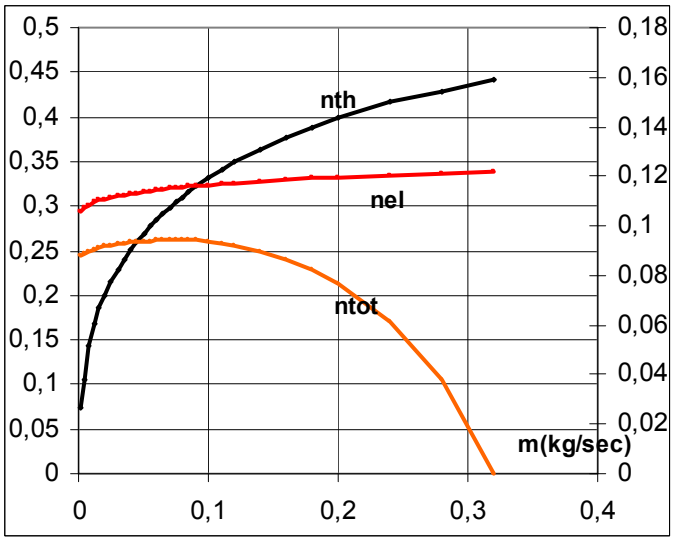


Σχ.Α.4.10 Μεταβολή β.α- παροχή (d=0,10 m)

$I_r = 800 \quad W/m^2$	$T_a = 293 \quad K$
$d_{ins} = 0{,}05 \quad m$	$d = 0{,}10 \quad m$

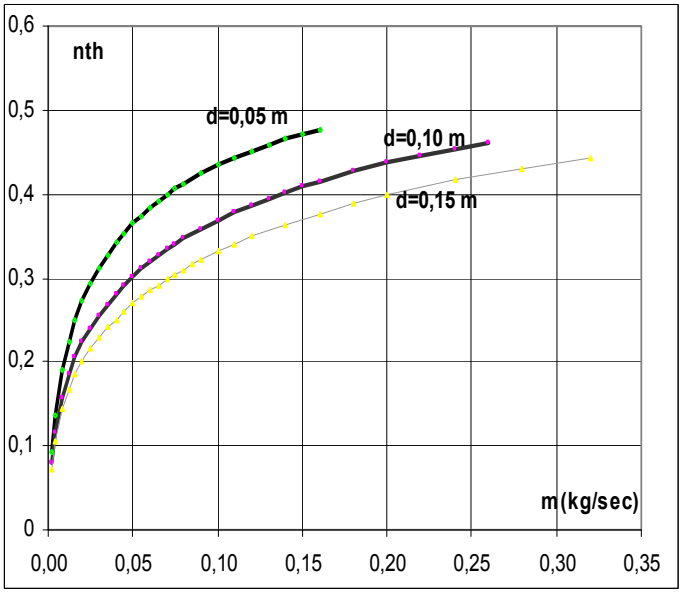


Σχ.Α.4.11Μεταβολή θερμοκρασιών- παροχή (d=0,15 m)

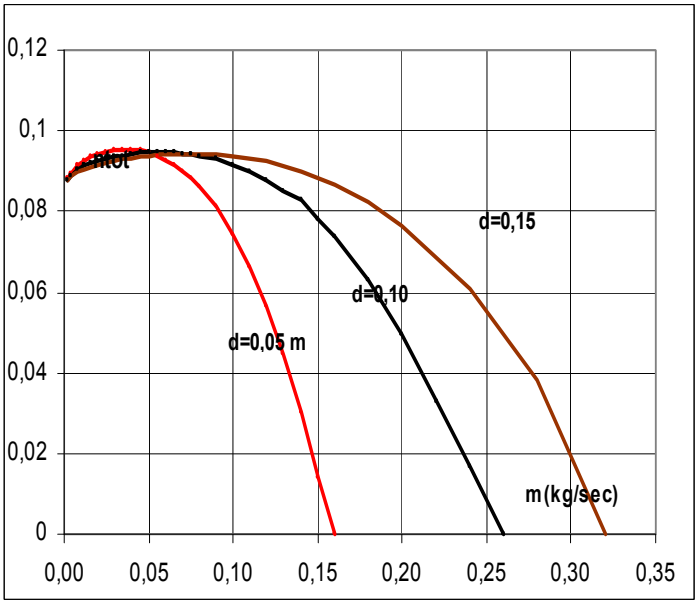


Σχ.Α.4.12 Μεταβολή β.α- παροχή (d=0,15 m)

Α.4.2.3 Σύγκριση βαθμών απόδοσης για d=0,05 , d=0,10 και d=0,15



Σχ.Α.4.13 Σύγκριση των θερμικών θαθμών απόδοσης



Σχ.Α.4.14 Σύγκριση των καθαρων ηλεκτρικών β.α

Αποτελέσματα για το σημείο βέλτιστης παροχής

TMS - UNGL

$d(m)$	$\dot{m}_o(kg/\sec)$	n_{tho}	n_{elo}	n_{tot}	$T_{pm}(m_o)$	$T_{wm}(m_o)$
0,05	**0,036**	**0,334**	**0,1164**	**0,0953**	**311,7**	**297,5**
0,10	**0,060**	**0,32**	**0,116**	**0,0947**	**312,4**	**296,78**
0,15	**0,080**	**0,31**	**0,1156**	**0,0943**	**312,87**	**296,45**

πίνακας Π.Α.4.2

Αποτελέσματα για το σημείο μέγιστης παροχής

TMS - UNGL

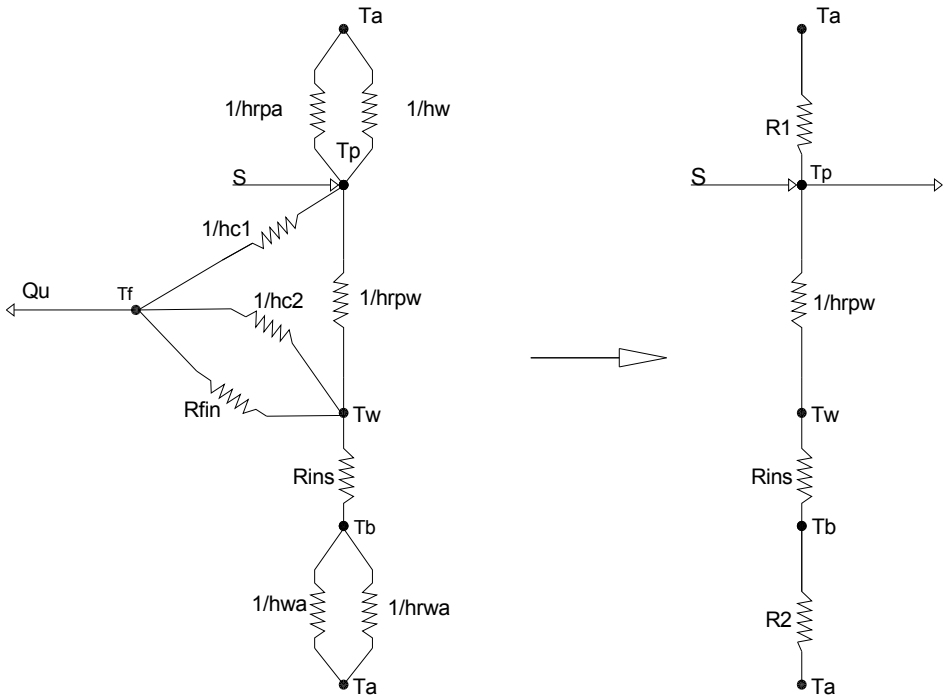
$d(m)$	$\dot{m}_{max}(kg/\sec)$	$n_{th\ max}$
0,05	**0,160**	**0,476**
0,10	**0,26**	**0,46**
0,15	**0,32**	**0,442**

πίνακας Π.Α.4.3

Α.4.3 FIN GLAZED

Για λογους πληρότητας θα εξεταστεί και η περίπτωση που στην παραπανω διάταξη (FIN) προστεθεί διαφανές κάλυμμα.

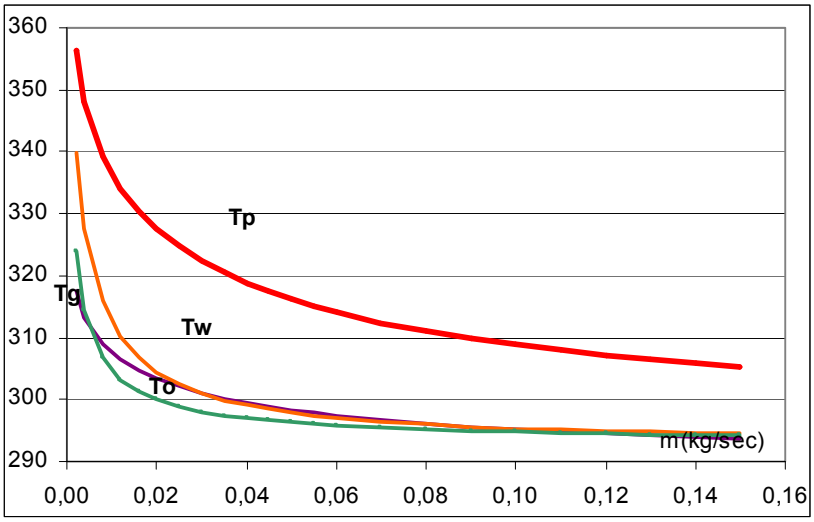
Πάλι θα θεωρήσουμε πως το βάθος του καναλιού είναι **d=0,05** m που όπως είδαμε είναι και η περισσότερο ευνοική περίπτωση τόσο για θερμική όσο και για ηλεκτρική παραγωγή .



Σχ.Α.4.15 Θερμικό κύκλωμα PVT FIN GLAZED

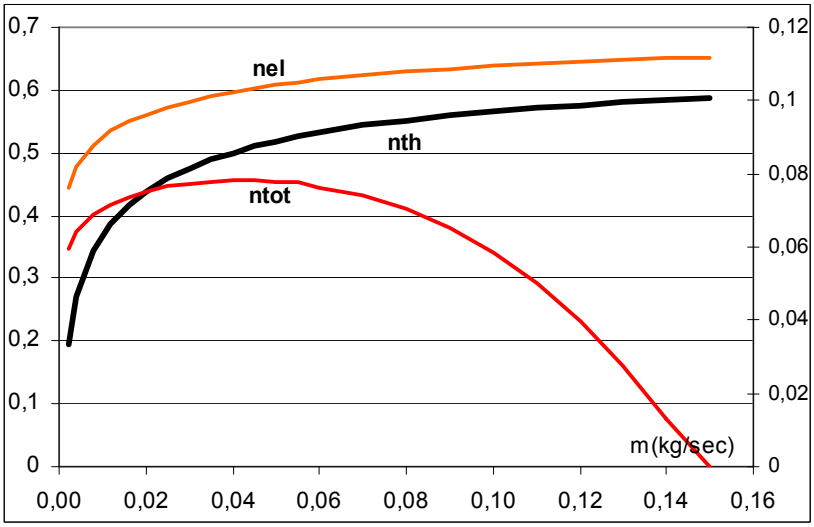
Α.4.3.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ (FING)

Μεταβολή των βαθμών απόδοσης με την παροχη μαζας για d=0,05



Σχ.Α.4.16 Μεταβολή θερμοκρασιών με την παροχή (FING)

Μεταβολή των θερμοκρασιών με την παροχη μαζας για d=0,05



Σχ.Α.4.17 Μεταβολή β.α με την παροχή (FING)

Μεταβολή των β.α με την παροχη για d=0,05

Στους πίνακες που ακολουθούν μπορουμε να δουμε τις ακριβεις αριθμητικες τιμες των κυριων μεγεθων εξοδου τοσο στο σημειο **mo** οσο και στο σημειο **mmax**

$d(m)$	$\dot{m}_o(kg/sec)$	n_{tho}	n_{elo}	n_{tot}	$T_{pm}(m_o)$	$T_{wm}(m_o)$	$T_{gm}(m_o)$
0,05	**0,045**	**0,5103**	**0,1033**	**0,0784**	**317,4**	**298,43**	**298,9**

πίνακας Π.Α.4.4

$d(m)$	$\dot{m}_{max}(kg/sec)$	$n_{th\ max}$
0,05	**0,150**	**0,5878**

πίνακας Π.Α.4.5

A.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

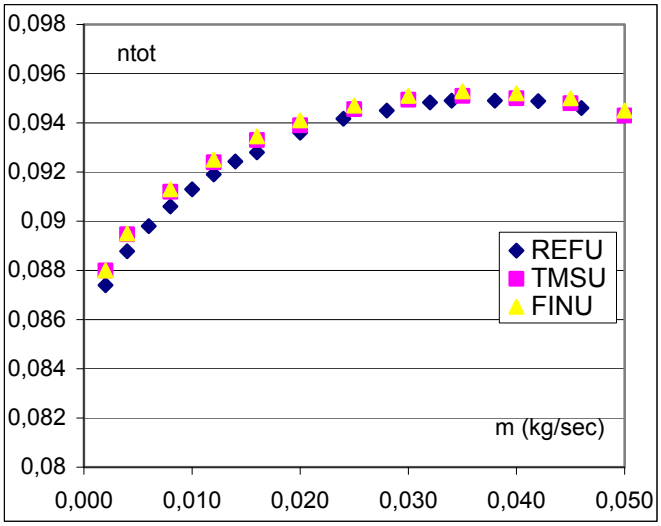
Μετά την παρουσίαση κάθε ενός απο τα 6 συνολικά συστήματα ακολουθεί μία προσπάθεια για σύνοψη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων αλλά και πινάκων .

Θα **πρέπει να τονιστεί** για μιά ακομη φορά πως τα αποτελέσματα που εξήχθησαν αφορούν πολύ συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (G=800,Ta=293,Vw=1,5 m/sec) που αντιστοιχούν συνήθως σε μεσημεριανές ώρες θερινής ημέρας.

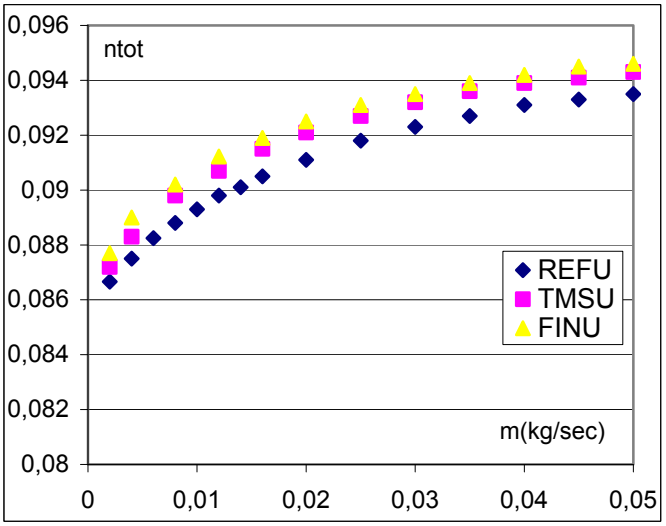
Συνεπώς για να εξαχθούν περισσότερο ασφαλή συμπεράσματα στην επόμενη παράγραφο και πριν την παρουσίαση των συμπερασμάτων θα δοκιμάσουμε το μοντέλο σε διαφορετικές συνθήκες για να κρίνουμε την αξία των βελτιωτικών μετατροπών.

Ας ξεκινήσουμε συγκρίνοντας τους ολικούς ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης της κάθε διάταξης γαι τις τρεις διαφορετικές τιμές της απόστασης d.

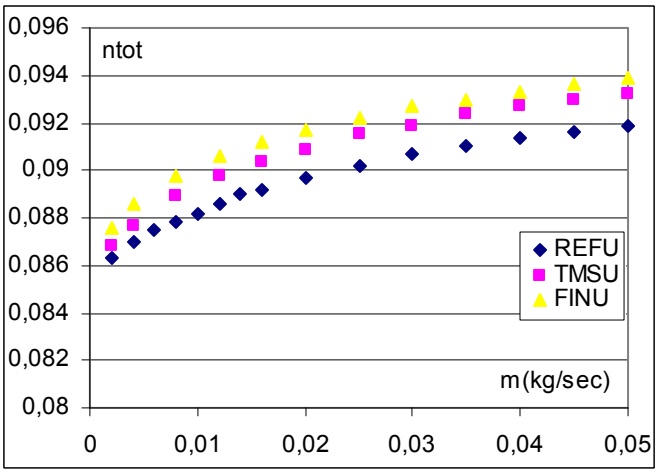
A.5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REF – TMS – FIN UNGL ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΔΟΣΗΣ(ntot)



Σχ.A.5.1 Σύγκριση ntot (d=0,05 m)



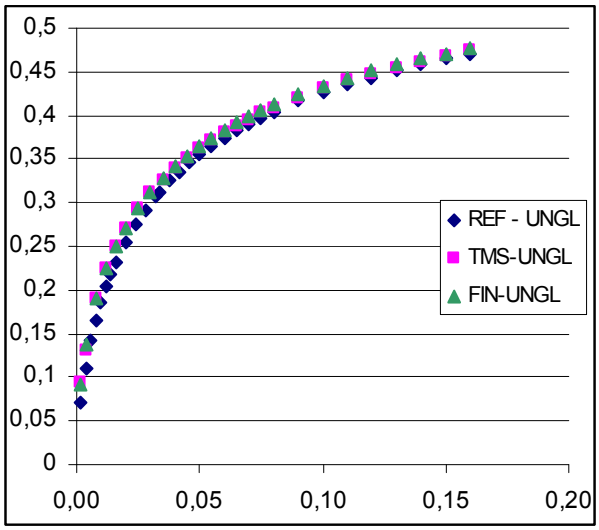
Σχ.A.5.2 Σύγκριση ntot (d=0,10m)



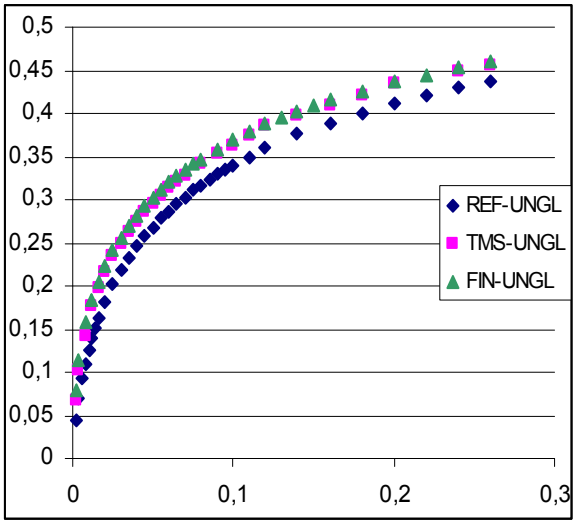
Σχ.A.5.3 Σύγκριση ntot (d=0,15 m)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ Ι: Όπως διαπιστώνουμε από τα παραπάνω διαγράμματα η επίδραση του βάθους d είναι καταλυτική για την τιμή του ολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης. Με **αύξηση** του βάθους d **μειώνεται** ο ntot συνεπώς η ηλεκτρική απόδοση του πλαισίου. Όμως η αύξηση του d έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αποδοτικότητα των βελτιώσεων TMSU και FINU , δηλαδή προκαλεί μικρότερη πτώση του ntot σε αυτές τις διατάξεις. Έπομένως οι προτεινόμενες βελτιώσεις λειτουργούν ικανοποιητικά σε **d>0,10 m** , αυξάνοντας την ηλεκτρική αποδοση, **όμως για τις συνθήκες της δοκιμής** βρέθηκε ότι η μέγιστη ηλεκτρική αποδοση επιτυγχάνεται για d=0,05 m , **ανεξάρτητα των διατάξεων βελτίωσης**.

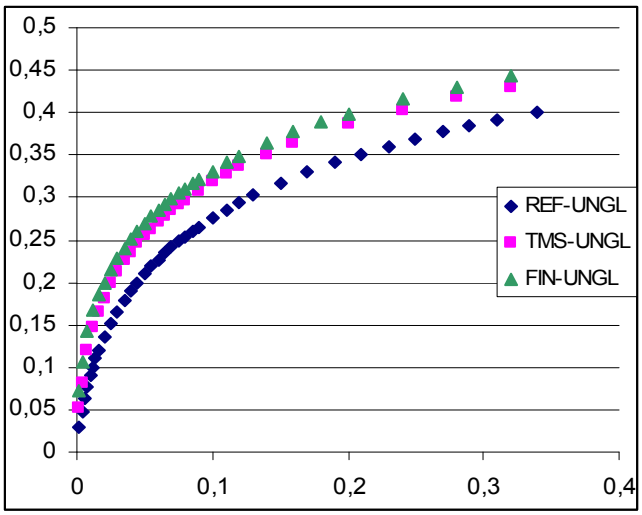
Α.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REF – TMS – FIN UNGL ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΘΕΡΜΙΚΟ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΔΟΣΗΣ



Σχ.Α.5.4 Σύγκριση nth (d=0,05 m)



Σχ.Α.5.5 Σύγκριση nth (d=0,10m)



Σχ.Α.5.6 Σύγκριση nth (d=0,15 m)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΙΙ: Απο τα παραπάνω είναι εύκολο να διαπιστώσουμε πως οι προτεινόμενες μετατροπές (TMS,FIN) έχουν **μηδαμινή** πρακτικά συνεισφορά στον θερμικό βαθμό αποδοσης (**για τις δεδομένες συνθήκες της δοκιμής**) **d=0,05 m** , μικρή για **d=0,10 m** και αξιόλογη για **d=0,15 m**

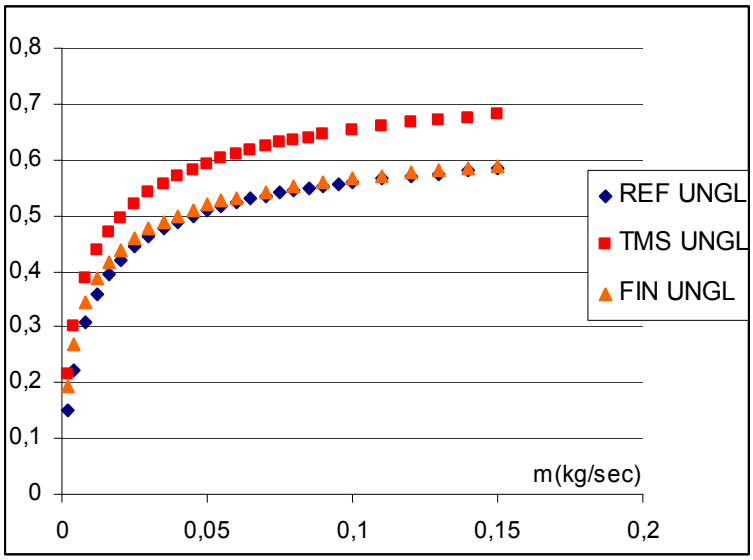
Ως συμπέρασμα λοιπον μπορει να προκυψει οτι βελτιωσεις τετοιου τυπου ειναι χρήσιμες σε εφαρμογές όπου το βάθος του καναλιού είναι τουλάχιστο **d>0,10 m** ,

αν και όπως αναφέρθηκε ήδη ως συμπέρασμα , τα **PVT/AIR** συστήματα έχουν καλύτερη απόδοση όσο μικρότερο είναι το βάθος d.

Α.5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REF – TMS – FIN GL ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ

Σε αυτή την παράγραφο θα συνοψίσουμε τα αποτελεσματα για τη συμπεριφορά των διατάξεων με την προσθήκη υαλοπίνακα.

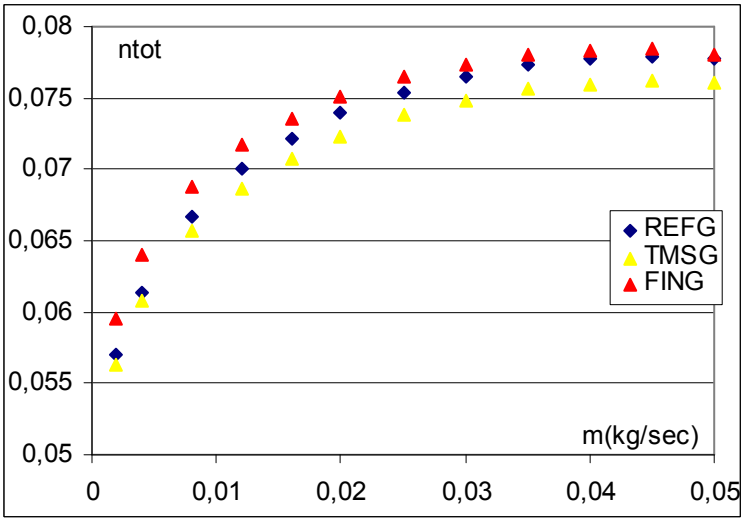
Όπως είδαμε το μοντέλο στην περίπτωση αυτή δοκιμάσθηκε για απόσταση d=0,05 m μόνο. Ωστόσο μπορούν να εξαχθούν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την ηλεκτρική και θερμική απόδοση των συλλεκτών



Σχ.Α.5.7 Συγκριση nth (GLAZED)

Στο πιό πάνω διάγραμμα βλέπουμε τους υψηλούς θερμικούς βαθμούς απόδοσης που πετυχαίνουμε με τη χρήση υαλοπίνακα.

Η διάταξη TMS φαίνεται να ωφελείται περισσότερο καθως παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη θερμική απόδοση σε σχέση με τις άλλες δύο.



Σχ.Α.5.8 Συγκριση ntot (GLAZED)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΙΙΙ: Η συμπεριφορά των διατάξεων με διαφανές κάλυμμα GLAZING δείχνει ότι σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στις UNGLAZED διατάξεις για d=0,05m, η θερμική απόδοση **βελτιώνεται σημαντικά** στη διάταξη TMSG ενώ η διάταξη FING δεν προσφέρει αξιόλογη θερμική βελτίωση. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το TMSG

λειτουργεί πολύ αποδοτικά στις υψηλές θερμοκρασίες που χαρακτηρίζουν τα GLAZED συστήματα.

Όσον αφορά την ηλεκτρική συμπεριφορά και εδώ υπάρχει διαφοροποίηση σε σχέση με τα UNGLAZED, καθώς απο το βάθος d=0,05 m κιόλας οι διατάξεις TMSG και FING δείχνουν μια ελαφριά βελτίωση του ολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με την REF (ΣΧ. Α.5.4). Τελικά θα λέγαμε πως η πιό **συμφέρουσα** διάταξη για **GLAZED** συστήματα είναι η **TMS**.

		d=0,05		d=0,10		d=0,15	
		not(max) / nth	nth(max)	not(max) / nth	nth(max)	not(max) / nth	
UNGLAZED	REFU	9,5% / 33,1%	47,71%	9,36% / 28,7%	43,7%	9,24% / 25,7%	40%
UNGLAZED	TMSU	9,52% / 32,9%	47,6%	9,44% / 32%	45,5%	9,37% / 30,6%	43,39%
UNGLAZED	FINU	9,53% / 33,4%	47,74%	9,5% / 32%	46%	9,43% / 31%	44,2%
GLAZED	REFGL	7,79% / 50,1%	58,3%	X	X	X	X
GLAZED	TMSGL	7.62% / 58,23%	68%	X	X	X	X
GLAZED	FINGL	7,84% / 51,03%	58,8%	X	X	X	X

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα ποσοστά αύξησης ή μείωσης τών μεγεθών της θερμικής ισχύος και της ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με το σύστημα **REFU** για βάθη καναλιού **d=0,05 , d=0,10 , d=0,15**

		d=0,05		d=0,10		d=0,15	
		ΔPtot% / ΔPth%	ΔPth(max)'	ΔPtot% / ΔPth%	ΔPth(max)%	ΔPtot% / ΔPth%	ΔPth(max)%
UNGLAZED	TMSU	+0,2% / - 0,6%	-0,2%	+0,8% / +11,5%	+4,1%	+1,4% / +19%	+8,5%
UNGLAZED	FINU	+0,3% / -0,3%	+0,06%	+1,5% / +15,33%	+5,2%	+2% / +20,6%	+10,5%
GLAZED	REFGL	-18 % / +51,3%	+22,2%	X	X	X	X
GLAZED	TMSGL	-19,7 % / +75,9%	+42,52%	X	X	X	X
GLAZED	FINGL	-17,4 % / +54,13%	23,2%	X	X	X	X

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ IV: Κοιτώντας προσεκτικά τα αποτελέσματα και τις προηγούμενες τρεις παρατηρησεις θα λέγαμε ότι δεν είναι ακόμα ασφαλές να καταδικάσουμε τις βελτιώσεις TMSU και FINU καταλήγωντας στο ότι μια απλή μείωση στο βάθος του διακένου d μπορει να επιφέρει παρόμοια απόδοση και στα REF συστήματα.

Φαίνεται καθαρά πως η συμπεριφορα των διατάξεων είναι ακρετά ευαίσθητη στις εξωτερικές συνθήκς και επειδή αυτέ που ειλέχθησαν δεν είναι χαρακτηριστικές συνθήκες λειτουργίας , στην αμέσως επόμενη παράγραφο, θα εξετάσουμε τη

συμπεριφορά τους σε διαφορετικές περισσότερο χειμωνιάτικες συνθήκες για να καταλήξουμε στα τελικά συμπεράσματα.

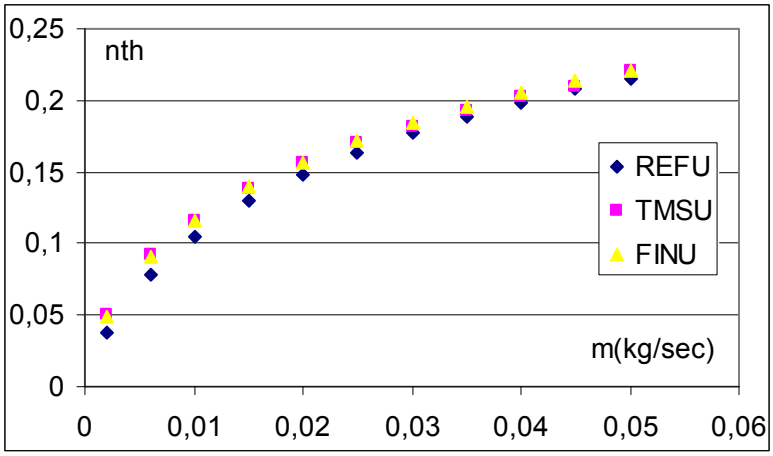
Α.5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά των GLAZED και UNGLAZED **για d=0,05m** και για τις εξης συνθήκες :

Ισχύς ακτινοβολίας :	**Gτ =300 W/m^2**
Εξωτερική θερμοκρασία :	**Ta=283 K(10oC)**
Ταχύτητα ανέμου :	**Vw=3 m/sec**

Οι συνθήκες αυτές ομοιάζουν με εκείνες που συναντάμε σε ένα τυπικό χειμωνιάτικο μεσημέρι και διαφέρουν αρκετά από τις συνθήκες υψηλής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που αρχικά είχαμε επιλέξει.

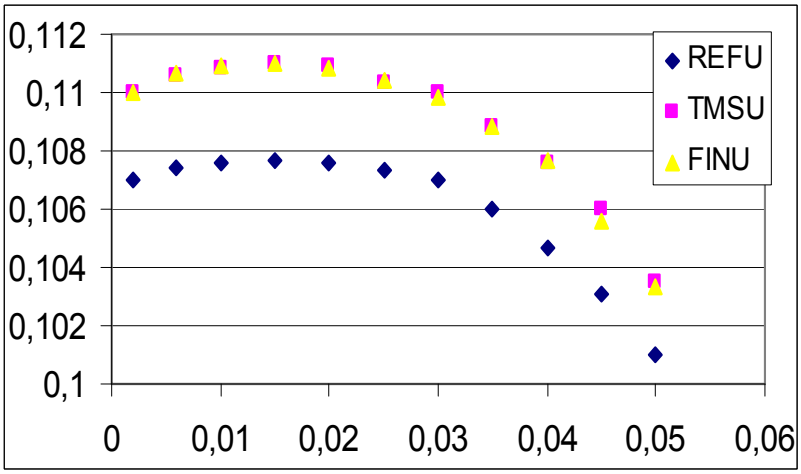
Στα παρακάτω διαγράμματα παρατίθενται οι θερμικοί και οι ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης τόσο των GLAZED όσο και των UNGLAZED συστημάτων τα οποία και σχολιάζονται.



I_r = 300 W/m^2
T_a = 283 K
Vw = 3,0 m/sec
d ins = 0,05 m
kins= 0,027 W/m×K
d = 0,05 m

Σχ.Α.5.9 Θερμικός βαθμός απόδοσης REFU,TMSU,FINU

Ασφαλώς ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλότερος απο ότι προηγουμένως γεγονός αναμενόμενο , αυτό όμως που μας ενδιαφέρει είναι ότι **ούτε υπό αυτές τις συνθήκες** φαίνεται να υπερτερούν οι TMSU και FINU από την REFU **ως προς την θερμική απόδοση.**



I_r = 300 W/m^2
T_a = 283 K
Vw = 3,0 m/sec
d ins = 0,05 m
kins= 0,027 W/m×K
d = 0,05 m

Σχ.Α.5.10 Θερμικός βαθμός απόδοσης REFU,TMSU,FINU

Η ανάγνωση του παραπάνω διαγράμματος αποτελεί και το καλύτερο επιχείρημα υπερ των TMSU και FINU .

Συγκεκριμένα φαίνεται ότι υπό τις δεδομένες συνθήκες τα TMSU και FINU υπερτερούν του REF ως προς την ηλεκτρική απόδοση και μάλιστα σε μεγάλο μέρος του φάσματος των παροχών.

Τα TMSU και FINU έχουν μέγιστη ηλεκτρική απόδοση κοντά στο 11,1% ενώ το REFU περιορίζεται σε 10,75%. Επίσης παρατηρούμε ότι η mo μετατοπίστηκε σε αρκετά χαμηλότερη τιμή (~0,15 kg/sec)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ V: Σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας η χρήση των βελτιώσεων TMSU και FINU μπορεί να επιφέρει ένα σημαντικό ηλεκτρικό κέρδος , ακόμα και με μικρή τιμή του d (d=0,05m) γεγονός που δικαιολογεί τελικά τη χρήση τους.

Α.5.5 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Παρατηρούμε ότι τα καθαρά ηλεκτρικά κέρδη (ntot) στις U μετατροπές **(TMSU και FINU)**, δεν ξεπερνούν το +**2%** σε σχέση με την **REFU ,όταν πρόκειται για καλοκαιρινές συνθήκες.**
  Αυτό σημαίνει ότι υπό αυτές τις συνθήκες **δεν μπορούμε** να στοχεύουμε σε αύξηση του ηλεκτρικού κέρδους ,αλλά μια μικρή αυξηση ίσως να προκύψει .
- Το θερμικό κέρδος στις U μετατροπές, είναι **ανέλπιστα χαμηλό** για μικρό βάθος καναλιού **d=0,05 m** και αυτό σημαίνει ότι για μικρές τιμές του d , το d ειναι που κυριως οριζει και την θερμικη συμπεριφορά του συλλέκτη.
  Ωστόσο η επιδραση του **μειωνεται** όταν η τιμή του αυξανει , οπότε και οι μετατροπές αρχίζουν να παίζουν ρόλο.
  Τελικά συμπεραίνουμε πως αν μας ενδιαφέρει το θερμικό κέρδος, οι μετατροπές αξίζουν να γίνουν σε υβριδικά συστήματα με **d >0,10m** . Όμως δεδομένου πως είδαμε ότι τα συστήματα αυτά λειτουργούν καλύτερα όσο το d είναι πιό μικρό, τελικά ίσως είναι καλύτερο να στραφούμε **σε μικρά d** και **REF** συστήματα .Άλλωστε όπως φαίνεται στον πίνακα 1 το **REFU(d=0,05m)** εχει αξισημείωτα καλή απόδοση. Η χρήση μεγαλύτερης τιμής του d μπορεί να δικαιολογηθεί σε εφαρμογές όπου θελουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη θερμοκρασία εξόδου
- Όσον αφορά τη χρήση του υαλοπίνακα, βλέπουμε ότι προκαλεί δραματική μείωση της ηλεκτρικής ισχύος (18%-20% σε σχέση με το REFU), οπότε δεν προτείνεται στην πλειοψηφεία των περιπτώσεων όπου δίνεται προτεραιότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Αν ωστόσο για κάποιο λόγο είναι επιθυμητή η παραγωγή θερμότητας έστω και εις βάρος του ηλεκτρικού κέρδους(κάλυψη θερμικών αναγκών κτιρίου), τότε από την ανάγνωση του πίνακα αλλά και από το διαγρ.2 βλέπουμε πως το **TMS** σύστημα έχει το προβάδισμα με **58% θερμική απόδοση** στο σημείο **mo** και **68 % μέγιστη θερμική ισχύ.**
- Η τελευταία δοκιμή σε χειμερινές συνθήκες έδειξε τελικά πως υπάρχουν κατά τη διάρκεια του έτους (μικτές συνθήκες) , θα υπάρξουν ηλεκτρικά ωφέλη από τη χρήση των διατάξεων TMSU κια FINU αντί της REFU γεγονός που διακιολογεί σε ένα βαθμό την ύπαρξη τους.
- Τελικά αν ήταν να επιλέξουμε , θα λέγαμε πως το σύστημα FIN φαίνεται να έχει τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα σε UNGLAZED διατάξεις (προτεραιότητα στην ηλεκτρική απόδοση) .

  Στα GLAZED το TMS φαίνεται να υπερισχύει λόγω της υψηλότερης θερμικής του απόδοσης που άλλωστε είναι και το ζητούμενο στα συστήματα αυτά.

  Πάντως μια παρατήρηση είναι ότι αν με κάποιο τρόπο υπήρχε η δυνατότητα να προστιθεται διαφανές κάλυμμα κατά το χειμώνα(υψηλές θερμικές απαιτήσεις) και να αφαιρείται το καλοκαίρι(υψηλές ηλεκτρικές απαιτήσεις) **τότε αποδοτικότερη διάταξη είναι η TMS**.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΜΕΡΟΣ Β’

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Β.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο δεύτερο κομμάτι του υπολογιστικού τμήματος θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά κάποιων από τις διατάξεις που μελετήσαμε ως προς τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και τις ώρες από τις 7:00 π.μ εώς 19:00 μμ.

Για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα των μεγεθών της θερμότητας και της ηλεκτρικής ισχύος θα χρησιμοποιήσουμε έναν συλλέκτη με μεγαλύτερες διαστάσεις(περίπου τριπλάσιας επιφάνειας) από αυτόν που είδαμε στο προηγούμενο τμήμα.

Τονίζεται πως θα χρησιμοποιήσουμε τις ίδιες ακριβώς εξισώσεις που παρατέθηκαν στο εδάφιο Α.2.1.1 , παρολο που εδώ το μήκος του συλλέκτη θα είναι λίγο πάνω από το 1m και ίσως η εξίσωση για τον αριθμό **Nu** να **μην δίνει** τόσο ακριβή αποτελέσματα μιας και λειτουργεί καλύτερα για L<1m.

Άλλο ένα σημείο που πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα είναι πως η τιμή της Vwέχει ληφθεί κάπως μεγαλύτερη δηλαδή **V_w=3m/sec** με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μειωμένοι οι βαθμοί απόδοσης και η παροχή μάζας m=0,05 kg/sec.

Οι ημέρες που έχουν επιλεγεί είναι η **22^{α} Δεκεμβρίου** και η **21^{η} Μαίου** του τυπικού έτους ενώ οι διατάξεις που επιλέξαμε είναι η FINU από τις UNGLAZED και η TMS από τις GLAZED. Οι δύο αυτές επελέχθησαν ως οι πιό αποδοτικές στο είδος τους σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης μελέτης.

Δεδομένου ότι το υπολογιστικό μοντέλο μας απαιτεί ως είσοδο σταθερή θερμοκρασία και ροη ακτινοβολίας, από των υπολογισμό δύο στιγμιαίων τιμών π.χ στις 7π.μ και στις 8π.μ θα θεωρούμε πως για αυτό το διάστημα τα μεγέθη αυτά είναι σταθερά και ίσα με τη μέση τιμή τους και πως επίσης και πάλι τα μεταβατικά φαινόμενα δεν παίζουν ιδιαέτερο ρόλο.

Σε πρώτη φάση θα υπολογίσουμε την ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου που ως γνωστό συνίσταται στην άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η διαδικασία υλοποιείται με τη βοήθεια του προγράμματος EXCEL και τα φύλλα των διαφόρων υπολογισμών είναι αποθηκευμένα στο αρχείο "Υπλογισμός Gτ.xls".

Β.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΤΥΠΙΚΟ ΕΤΟΣ (ΑΘΗΝΑ 1962-1980)

Στο εδάφιο αυτό θα εξέταστεί αρχικά ο τρόπος υπολογισμού της μέσης (1961-1980) στιγμιαίας άμεσης (**G_b**) και διάχυτης (**G_d**) ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, μέσω των διαθέσιμων αναλυτικών εξισώσεων και στη συνέχεια , με κάποιες παραδοχές που θα γίνουν θα υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές για το κεκλιμένο επίπεδο δηλαδη οι **$G_{bτ}$** και **$G_{dτ}$** .

Στον ακόλουθο πίνακα βλέπουμε τον αύξοντα αριθμό κάθε ημέρας του χρόνου όπως επίσης και την μεση ημέρα κάθε μήνα.

πίνακας Π.Β.1

ΜΗΝΑΣ	ΗΜΕΡΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΑ	ΗΜΕΡΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ
Ιανουαριος	i	17	17
Φεβρουαριος	31+i	16	47
Μαρτιος	59+i	16	75
Απριλιος	90+i	15	105
Μαϊος	120+i	15	135
Ιουνιος	151+i	11	162
Ιουλιος	181+i	17	198
Αυγουστος	212+i	16	228
Σεπτεμβριος	243+i	15	258
Οκτωβριος	273+i	15	288
Νοεμβριος	304+i	14	318
Δεκεμβριος	334+i	10	344

Β.2.1 Υπολογισμός των Gb,Gd και G

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει τα έτη 1961-1980 στην περιοχή της Αθήνας και την μετέπειτα λογιστική επεξεργασία, προέκυψαν οι τιμες **Gb** και **Gd** σε (W/m²) για καθε ωρα, t=7,8,…,18 της ημέρας και καθε ημέρα D=1,2,...,365 του έτους από τις παρακάτω σχέσεις :

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \qquad \textbf{(B.1)}$$

και

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} D - p_t\right) \qquad \textbf{(B.2)}$$

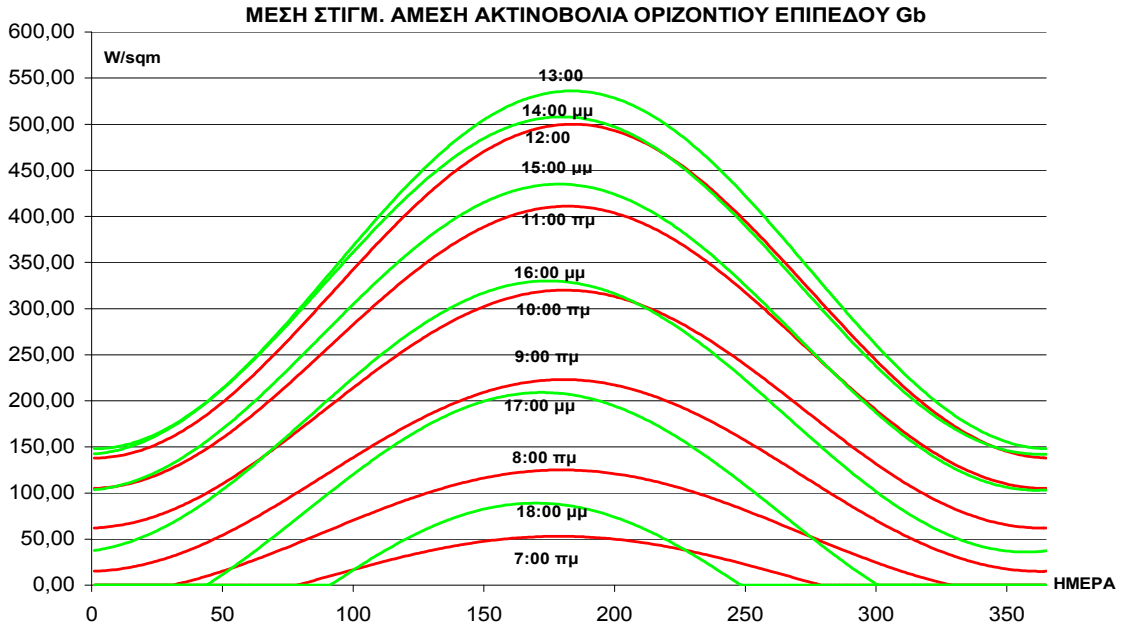
ενώ βέβαια είναι και :

$$G = G_b + G_d \qquad \textbf{(B.3)}$$

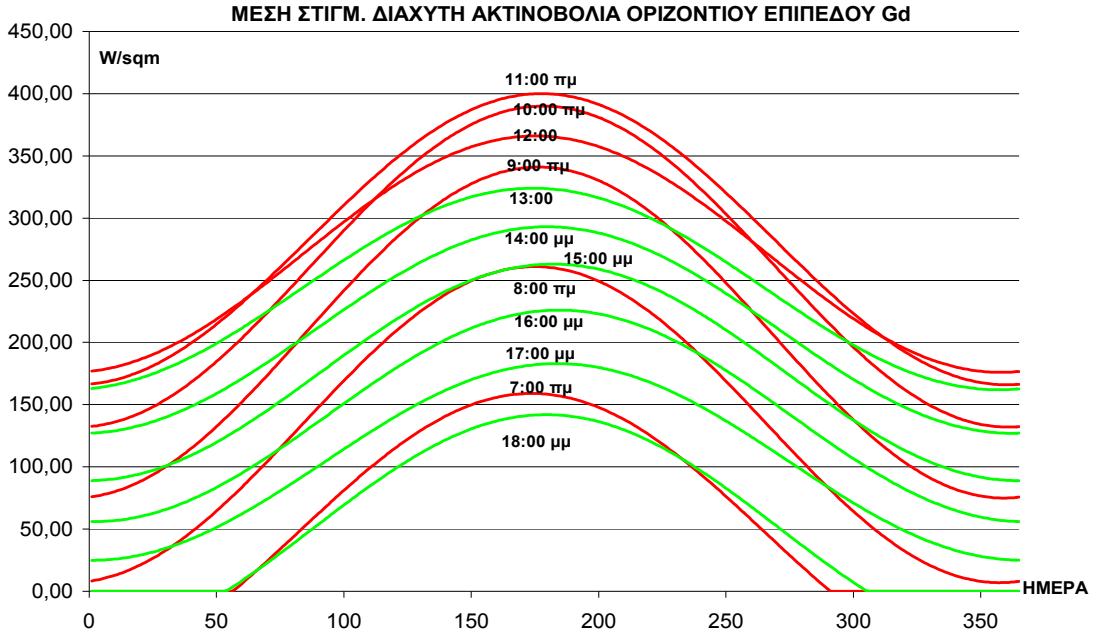
όπου οι συντελεστές **M_t,A_t,P_t,m_t,a_t,p_t** δίδονται για κάθε ώρα t στον πίνακα .Β.2, ενώ ακολουθει το διάγραμμα με τις τιμές που βρήκαμε από τις εξισώσεις για κάθε ωρα t=7,…,18 καθε ημέρας του έτους.Στα διαγράμματα αυτά οι ώρες πριν τις 12μμ σημειώνονται με κόκκινη γραμμή και μετά τις 12μμ με πράσινη.

Ωρα t (Lst)	**Mt** kW/m^2	**At** kW/m^2	**Pt** μοιρες
07.00	0,048	0,111	81,23
08.00	0,134	0,127	82,45
09.00	0,208	0,133	83,94
10.00	0,261	0,129	85,60
11.00	0,283	0,117	86,05
12.00	0,271	0,095	82,71
13.00	0,243	0,081	81,95
14.00	0,210	0,083	87,23
15.00	0,176	0,087	89,53
16.00	0,141	-0,085	-88,19
17.00	0,104	-0,079	-88,97
18.00	0,051	0,091	86,79

πίνακας Π.Β.2

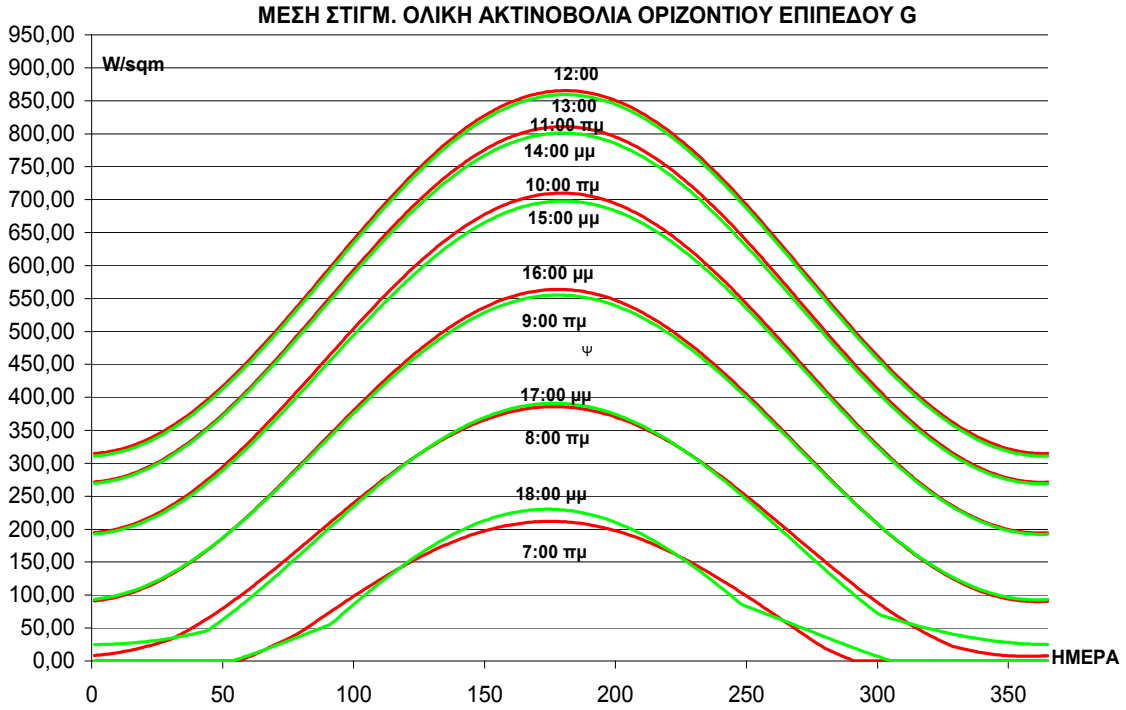


Σχ.Β.1 Στιγμιαία ακτινοβολία Gb(άμεση)



Σχ.Β.2 Στιγμιαία ακτινοβολία Gd(διάχυτη)

Αθροίζοντας τις αντίστοιχες τιμές για κάθε ημέρα και ώρα προκύπει το διάγραμμα της ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου.



Σχ.Β.3 Στιγμιαία ακτινοβολία G(ολική)

<u>Β.2.2 Υπολογισμός του G_T μέσω των συντελεστών R_b και R_d</u>

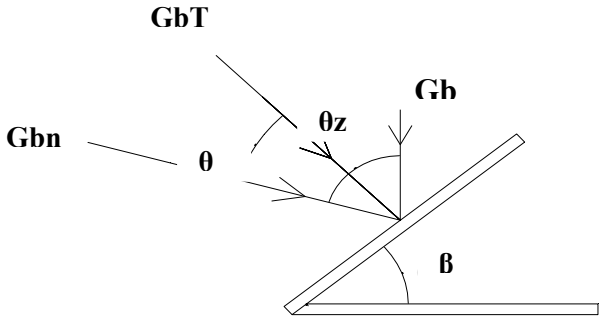
Γνωρίζοντας την τιμη της ολικης ακτινοβολιας οριζοντίου επιπέδου G και θέλοντας να προσδιορίσουμε την τιμή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_T , ορίζουμε τους λόγους R, της ολικής ακτινβολίας ως εξής **:**

$$R=\frac{G_T}{G}\ ,\ R_b=\frac{G_{bT}}{G_b}\ ,\ R=\frac{G_{dT}}{G_d} \qquad \textbf{(B.4)}$$

B.2.2.1 Υπολογισμός του Rb

$$R_b=\frac{G_{bT}}{G_b}=\frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \qquad \textbf{(B.5)}$$

Οι αντίστοιχες γωνίες φαίνονται στο σχήμα για γωνία κλίσης του συλλέκτη β.



Σχ.Β.4 Οι γωνίες β,θ,θz

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο με γωνία αζιμουθίου γ=0 , όπως συμβαίνει στην περίπτωση μας η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

$$R_b=\frac{\sin\delta\cdot\sin(\varphi-\beta)+\cos\delta\cdot\cos(\varphi-\beta)\cdot\cos\omega}{\sin\delta\cdot\sin\varphi+\cos\delta\cdot\cos\varphi\cdot\cos\omega} \qquad \textbf{(B.6)}$$

Δεδομένου τώρα πως ο συλλέκτης έχει κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος φ δηλαδή:

$$\varphi=\beta \qquad \textbf{(B.7)}$$

η σχεση γίνεται :

$$R_b=\frac{\cos\delta\cdot\cos\omega}{\sin\delta\cdot\sin\varphi+\cos\delta\cdot\cos\varphi\cdot\cos\omega} \qquad \textbf{(B.8)}$$

φ : Είναι το γεωγραφικό πλάτος

Σχέση υπολογισμού : **φ = 37,97** για την Αθήνα

δ : Είναι η ηλιακή απόκλιση,δηλαδή η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού.

Προφανώς λοιπόν είναι συνάρτηση της ημέρας του έτους D.

Σχέση υπολογισμού :

$$\delta=23{,}45\cdot\sin\left(\frac{360\cdot(284+D)}{365}\right) \qquad \textbf{(B.9)}$$

ω : Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης.

Προφανώς κατά το ηλιακό μεσημέρι είναι **ω =0**.

Προφανώς λοιπόν είναι συνάρτηση της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο , δηλαδή της τοπικής ώρας και της ήμερας του έτους.

Σχέση υπολογισμού : $\omega = \pm 15^{o} \cdot n$ όπου **n** είναι οι ώρες εώς(-) /από(+) το ηλιακό μεσημέρι

Συνεπώς για τον υπολογισμό της τιμής του **Rb** πρέπει να γνωρίζουμε τον ηλιακό χρόνο $t_{ηλ}$. Η σχέση υπολογισμου του ειναι :

$$t_{ηλ} = t_{ρολ} \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \qquad \textbf{(B.10)}$$

όπου **Lloc** είναι το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή δηλαδή **Lloc**=23,43° για την Αθήνα και **L**st είναι ο μεσημβρινός με βάση τον οποίο μετράμαι την ώρα του ρολογιού , δηλαδή **Lst=30°.**

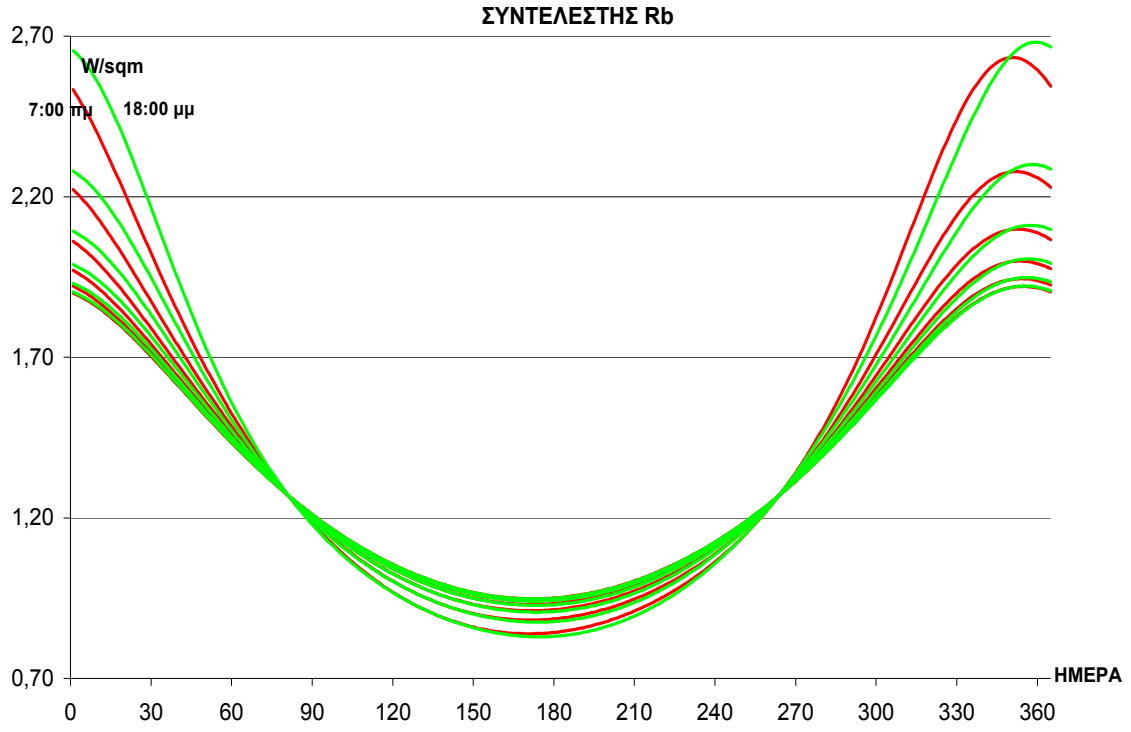
Η συνάρτηση Ε εξαρτάται από την ημερα του έτους και δίδεται από τη σχέση

$$E = 9{,}87 \cdot \sin(2B) - 7{,}53 \cdot \cos B - 1{,}5 \cdot \sin B \qquad \textbf{(B.11)}$$

$$B = 360 \cdot (D-81)/364 \qquad \textbf{(B.12)}$$

Ο υπολογισμός του **Rb** για κάθε ώρα του έτους έχει γίνει με βάση τις παραπάνω εξισώσεις για κάθε ημέρα του έτους με τη χρήση του προγράμματος Excel.

Τα αποτελέσματα με τη μορφή διαγράμματος παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχ.Β.4 Συντελεστής Rb

Β.2.2.2 Υπολογισμός του Rd

Σύμφωνα με το μοντέλο των **Liu - Jordan** θεωρούμε πως η διάχυτη ακτινοβολία έχει δυο συνιστώσες

Την διάχυτη που απο τον ουρανό: $G_d \cdot (1+\cos\beta)/2$ **(Β.13)**

Την διάχυτη απο ανάκλαση του εδάφους : $(G_b+G_d)\cdot\rho\cdot(1-\cos\beta)/2$ **(Β.14)**

Με ρ συμβολίσαμε την ανακλαστικότητα του εδάφους που για συνηθισμένο έδαφος παίρνει την τιμή ρ=0,2 ενώ για χιονισμένο την μέγιστη τιμή ρ=0,7

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει πως η **Rd** ειναι συνάρτηση της κλίσης του συλλέκτη β , του συντελεστή ρ , και της ολικής και διαχυτης ακτινοβολιας οριζοντίου επιπέδου **G** και **Gd** αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα : $$R_d=\left(\frac{1+\cos\beta}{2}+\frac{G}{G_d}\cdot\rho\cdot\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)\right)$$ **(Β.15)**

Β.2.2.3 Υπολογισμός του Gτ

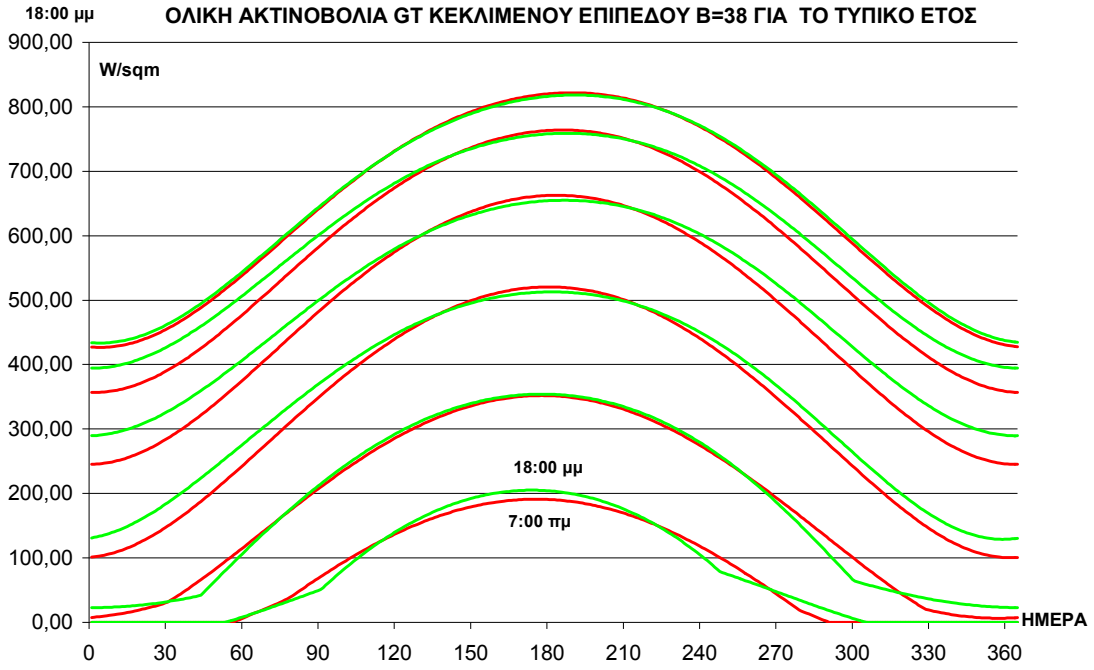
Μετά από αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στην κεκλιμένη επιφάνεια του συλλέκτη μας .

Ο υπολογισμός θα γίνει για το τυπικό έτος για το οποίο άλλωστε έχουμε δεδομένα **Gb** και **Gd** τα επί μέρους δεδομένα των υπολογισμών συγκεντρώνονται στον πίνακα Β.1.3

πίνακας Β.3 Γεωγρεφικά στοιχεία τόπου

ΤΟΠΟΣ : ΑΘΗΝΑ	
Φ=38	Γεωγραφικό πλάτος τόπου
L_{loc} = 23,43	Γεωγραφικό μήκος τόπου
γ = 0	Γωνία αζιμουθίου συλλέκτη
βc = Φ	Κλίση συλλέκτη
Gb,Gd → ΤΥΠΙΚΟ ΕΤΟΣ	
Rd -→ Μοντελο Liu – Jordan με ρ=0,2	
ΜΟΝΑΔΕΣ → W/m^2	

Στο παρακάτω διάγραμμα σχεδιασμένο πάλι με τη βοήθεια του EXCEL παρατίθενται τα αποτελέσματα.



Σχ.Β.5 Ακτινοβολία Gτ(38°)

Β.3 ΔΟΚΙΜΗ ΦΒ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΤΥΠΟΥ FINU ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΓΙΑ m=0,05 kg/sec

Με βάση τα όσα προηγήθηκαν στο πρώτο των υπολογισμών , έπεται πως , για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός αεριζόμενου ΦΒ συλλέκτη το μόνο που χρειάζεται είναι να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη και τις εξωτερικές συνθήκες ακτινοβολίας **Ir**, θερμοκρασίας αέρα **Ta**, και ταχύτητας του ανέμου **Vw**.

Έτσι λοιπόν θα ήταν χρήσιμο να προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την θερμική και την ηλεκτρική ισχύ που παράγει ένας αεριζόμενος **ΦΒ** συλλέκτης για μια ημέρα του τυπικού έτους για την οποία έχουμε δεδομένα της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του αέρα.

Η επιφάνεια του συλλέκτη που θα χρησιμοποιηθεί θα ειναι **1,5*0,8 m** και θα μπορούσε να αποτελεί έναν οικιακό **ΦΒ** συλλέκτη.

Θεωρούμε και πάλι ότι **Ap=Ac (PF=1),** δηλαδή ότι όλη η επιφάνεια είναι καλυμμένη με φωτοβολταικά στοιχεία.

Τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη που θα χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς συγκεντρώνονται στον πίνακα (π.Β..4).

Τονίζεται ότι το **βάθος του αεραγωγού d** λαμβάνεται ίσο με **d=0,05m.**

Οι κώδικες που χρησιμοποιήσαμε στην προηγούμενη ανάλυση απαιτούν την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία του αέρα, και την ταχύτητα του ανέμου να είναι σταθερές.

Αυτό ασφαλώς δεν συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ημέρας και για αυτό τον λόγο θα χωρίσουμε την ημέρα σε διαστήματα π.χ μιας ώρας κατά τα οποία θα θεωρούμε αυτές τις τιμές σταθερές.

Έτσι π.χ η ακτινοβολία και η θερμοκρασία μεταξύ **9.00-10.00 πμ** θα είναι :

$$I_r(9{:}00\text{-}10{:}00)=\frac{G_T(9{:}00)+G_T(10)}{2}\ ,\ T_a(9\text{-}10)=\frac{T_a(9{:}00)+T_a(10{:}00)}{2} \qquad \textbf{(B.16)}$$

όπου οι στιγμιαίες τιμές αφορούν αυτές που αντιστοιχούν στο τυπικό έτος.

πίνακας Β.4 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενης διάταξης με ή χωρίς πτερύγια

ΦΒ πανελ απο πολυκρυσταλλικο πυριτιο(pc-si) **FINU**		
ΜΗΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	(L)	1,5 m
ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	(b)	0,8 m
ΚΛΙΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	(β)	38°
ΥΨΟΣ ΑΕΡΑΓΩΓΟΥ	(d)	0,05 m
ΠΑΧΟΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	(δins)	0,05 m
ΣΥΝΤ. ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	(kins)	0,027(W/(mK))
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ Β.Α ΑΝΑΦΟΡΑΣ	(nref)	0,127(UNGL)
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	(Tref)	298 K
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ Β.Α	(β)	0,006 K^{-1}
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ Β.Α ΚΙΝΗΤΗΡΑ	(nmot)	0,8
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Β.Α ΚΙΝΗΤΗΡΑ	(nmot)	0,8
ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ (ΧΕΙΜΩΝΑ – ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ)		0,02-0,05 KG/SEC
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	(Vw)	3 m/sec
ΠΛΗΘΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	(N)	15
ΠΑΧΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	(tf)	1mm
ΥΨΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	(hf)	0,025 m
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΠΤΕΡ.	(kf)	120 W/(mK)

Β.3.1 Απόδοση του συλλέκτη για την 21η Μαΐου του τυπικού έτους

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι τιμές της ακτινοβολίας G_T και της θερμοκρασίας **Ta** ,της συγκεκριμένης ημέρας για το τυπικό έτος και εξάγονται οι μέσες τιμές ανά διάστημα.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι ίδιες τιμές σε διαγράμματα.

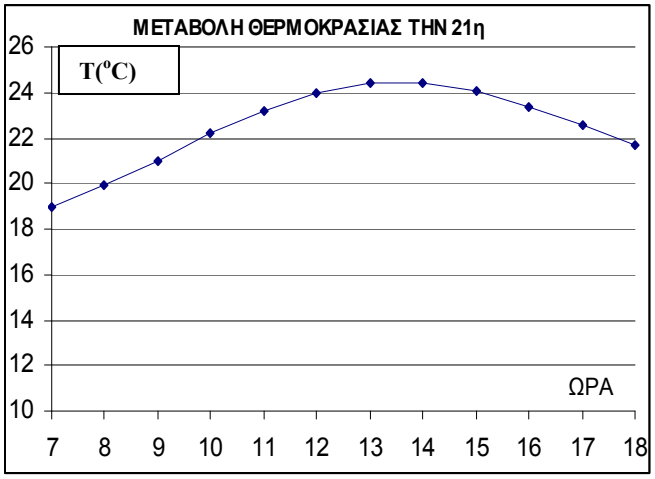
πίνακας Π.Β.5

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ 21η ΜΑΙΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΙΚΟΥ ΕΤΟΥΣ											
Στιγμιαία τιμή της Ta (°C)											
7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
19	19,9	21	22,2	23,2	24	24,4	24,4	24,1	23,4	22,6	21,7
	Μέση τιμή Ta (°C) ανά ωριαίο διάστημα										
7-8	**8-9**	**9-10**	**10-11**	**11-12**	**12-13**	**13-14**	**14-15**	**15-16**	**16-17**	**17-18**	
19,5	20,5	21,6	22,7	23,6	24,2	24,4	24,3	23,8	23	22,2	

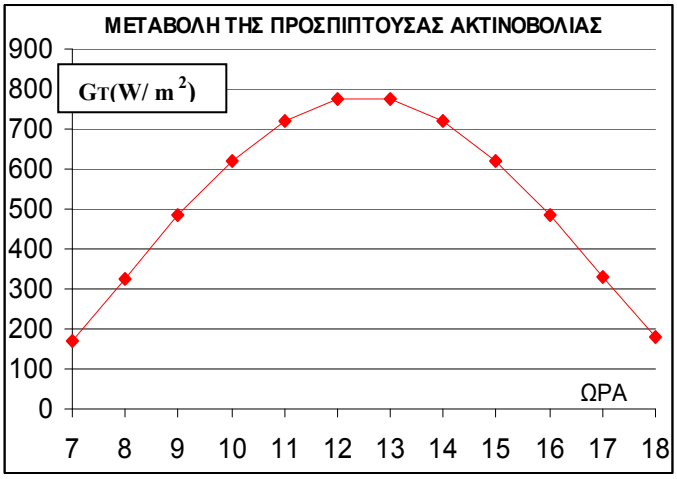
πίνακας Π.Β.6

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΗΣ 21η ΜΑΙΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΙΚΟΥ ΕΤΟΥΣ											
Στιγμιαία τιμή της Gτ(W/m^2)											
7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
169,5	324	484,9	622,1	721,41	777,3	775	722	619,3	483,8	328,8	180,5

Μέση τιμή της Gτ(W/m^2) ανά ωριαίο διάστημα										
7-8	**8-9**	**9-10**	**10-11**	**11-12**	**12-13**	**13-14**	**14-15**	**15-16**	**16-17**	**17-18**
246,75	404,47	553,52	671,77	749,34	776,16	748,5	670,63	551,54	406,28	254,6



Σχ.Β.6 Θερμοκρασία-χρόνος(21 Μαϊου)



Σχ.Β.7 Ακτινοβολία -χρόνος(21 Μαϊου)

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την προσπίπτουσα ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη δηλαδή την **Ap*Gτ**

<u>ΣΧΟΛΙΟ</u>: Επειδή τον Μάιο ο καιρός είναι ζεστός δεν υπάρχει απαίτηση θέρμανσης χώρων**.**

Έτσι εστιάζουμε στην ψύξη των συλλεκτών επιζητώντας το μέγιστο ηλεκτρικό κέρδος.

Ο θερμός αέρας που παράγεται ειναι αρκετά υψηλής θερμοκρασίας και είτε θα απορρίπτεται, είτε θα πρέπει να οδηγεται σε εναλλάκτη θερμότητας ώστε να ζεσταίνει νερό.

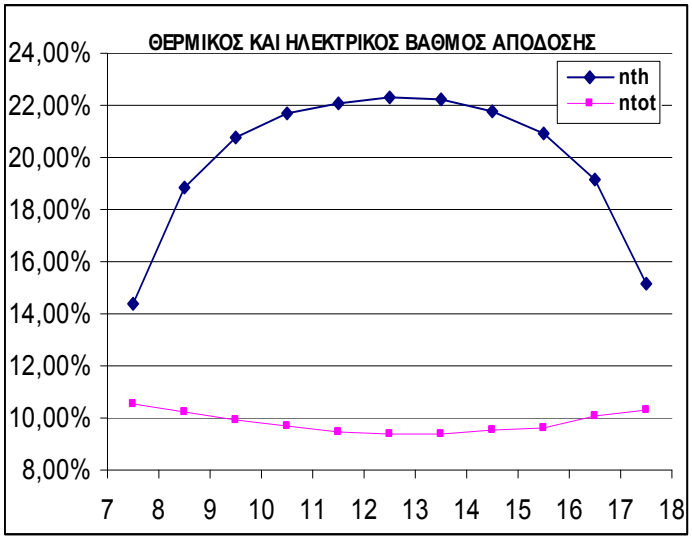
Β.3.2 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη REFU (21η Μαΐου)

Εισάγοντας ως **Ir** τις παραπάνω τιμές και ως **Ta** τις τιμές του πίνακα Π.Β.6 στο πρόγραμμα REFUNGL παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα του πίνακα Π.Β.7 για την απόδοση του συλλέκτη.

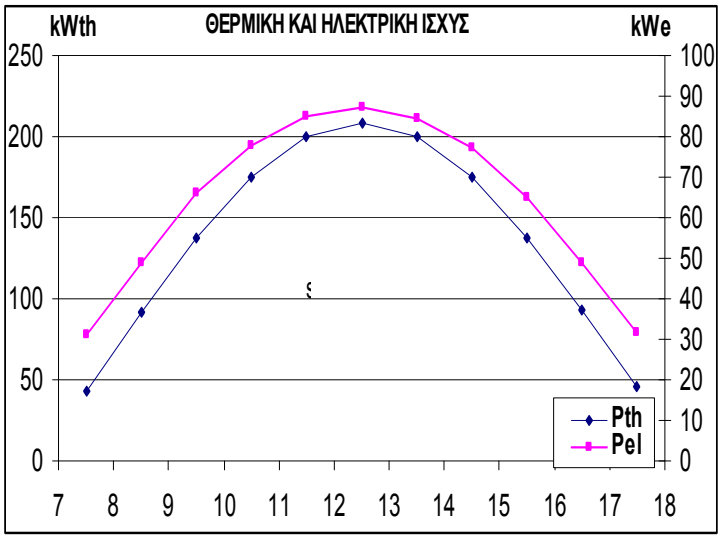
πίνακας Π.Β.7

ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ REFU ΚΑΤΑ ΤΗΝ 21Η ΜΑΪΟΥ											
	7:30	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30
nth	14,55%	18,24%	20,85%	21,81%	22,28%	22,45%	22,33%	21,90%	20,98%	19,2%	15,22%
ntot	10,21%	9,91%	9,6%	9,34%	9,16%	9,07%	9,1%	9,25%	9,49%	9,77%	10%
Itot(W)	296,4	484,8	663,6	806,16	899,16	931,75	898,2	804,75	661,84	487,53	305,5
Ith(Wth)	43,13	91,85	138,4	175,9	200,38	209,24	200,61	176,22	138,9	93,61	46,5
Iel(Wel)	30,28	48,07	63,74	75,3	82,39	84,54	81,8	74,46	62,82	47,66	30,74
To(K)	293,35	295,32	297,3	299,2	300,48	301,36	301,4	300,6	299,16	297,46	295,6

και σε μορφή διαγραμμάτων :



Σχ.Β.7 Οι nth και ntot για REFU



Σχ.Β.8 Οι Pth και Pel για REFU

Αν από τον πίνακα Π.Β.7 προσθέσουμε τις στήλες που αντιστοιχούν στην ισχυ τοτε προκύπτει η συνολική ενέργεια **Etot** που προσπίπτει , η θερμική ενέργεια **Eth** και η ηλεκτρική ενέργεια **Eel** σε κιλοβατώρες **kWh** για τη συγκεκριμένη ημέρα.

ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ REFU

πίνακας Π.Β.8

ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ REFU ΓΙΑ ΤΗΝ 21η ΜΑΙΟΥ	
Ολικη προσπιπτουσα ενεργεια	**E tot = 7,240 kWh**
Θερμικη ενεργεια	**Eth= 1,515 kWh(th)**
Ηλεκτρικη ενεργεια	**Eel= 0,681 kWh(el)**
Μεσος θερμικος βαθμος αποδοσης	$\bar{n}_{th}$ **= 19,98%**
Μεσος ηλεκτρικος βαθμος αποδοσης	$\bar{n}_{tot}$ = **9,53%**

Β.3.3 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη FINU (21η Μαιου)

Εισάγοντας τις ίδιες αρχικές τιμές στο πρόγραμμα FINUNGL παίρνουμε ως έξοδο τα αντίστοιχα μεγέθη απόδοσης για τη διάταξη αυτή .

πίνακας Π.Β.9

ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FINU ΚΑΤΑ ΤΗΝ 21Η ΜΑΪΟΥ											
	7:30	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30
nth	14,85%	19,39%	21,36%	22,34%	22,83%	23%	22,88%	22,43%	21,48%	19,64%	15,53%
ntot	10,53%	10,24%	9,93%	9,67%	9,5%	9,41%	9,44%	9,58%	9,82%	10,1%	10,38%
Itot(W)	296,4	484,8	663,6	806,16	899,16	931,75	898,2	804,75	661,84	487,53	305,5
Ith(Wth)	44	94,16	141,91	180,14	205,3	214,35	205,57	180,53	142,21	95,75	42,45
Iel(Wel)	31,22	49,7	66	78	85,41	87,7	84,81	77,15	65	49,24	31,7
To (K)	293,37	295,37	297,42	299,9	300,58	301,46	301,5	300,69	299,23	297,5	295,64

ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ FINU

πίνακας Π.Β.10

ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FINU ΓΙΑ ΤΗΝ 21η ΜΑΙΟΥ	
Ολική προσπίπτουσα ενέργεια	**E_{tot} = 7,240 kWh**
Θερμική ενέργεια	**E_{th}= 1,546 kWh(th)**
Ηλεκτρική ενέργεια	**E_{el}= 0,706 kWh(el)**
Μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης	**$\bar{n}_{th}$ = 20,5%**
Μέσος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	**$\bar{n}_{tot}$ = 9,87%**

Β.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REFU – FINU για την 21η Μαΐου

Από τους πίνακες της σύνοψης των αποτελεσμάτων για τις δύο διατάξεις βλέπουμε πως για τη συγκεκριμένη ημερομηνία η διάταξη FINU υπερέχει τις τυπικής τόσο ως προς τον θερμικό όσο και ως προς τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

Η σχετική αύξηση όμως είναι μόλις **2%** ως προς τον θερμικό βαθμό απόδοσης, και λίγο μεγαλύτερη **3,6 %** ως προς τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα θα λέγαμε πως ενδεχομένως **δεν δικαιολογούν** επαρκώς την ιδέα της βελτίωσης απο **REF** σε **FIN**.

Β.3.4 Απόδοση του συλλέκτη για την 22α Δεκεμβρίου του τυπικού έτους

Για να έχουμε μία πιό ολοκληρωμένη άποψη γνώμη για το μοντέλο υπολογισμού , θα το δοκιμάσουμε εισάγοντας δεδομένα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας για μία ημέρα του χειμώνα.

Συγκεκριμένα επελέγει η ημερομηνία του χειμερινού ηλιοστασίου (22 Δεκεμβρίου).

Στον ακόλουθο πίνακα παρτατίθενται οι τιμές της ακτινοβολίας G_T και τη θερμοκρασίας T_a ,της συγκεκριμένης ημέρας για το τυπικό έτος.

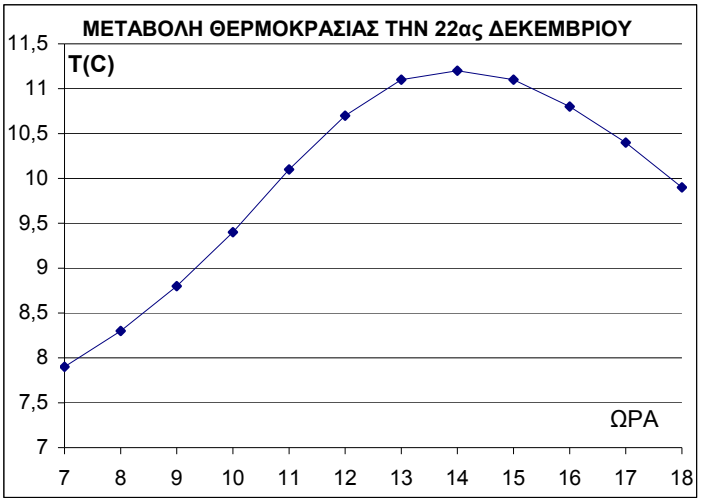
πίνακας Π.Β.11

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ 22α ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΙΚΟΥ ΕΤΟΥΣ											
Στιγμιαία τιμή της Ta (°C)											
7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
7,9	8,3	8,8	9,4	10,1	10,7	11,1	11,2	11,1	10,8	10,4	9,9
	Μέση τιμή Ta (°C) ανά ωριαίο διάστημα										
7-8	**8-9**	**9-10**	**10-11**	**11-12**	**12-13**	**13-14**	**14-15**	**15-16**	**16-17**	**17-18**	
8,1	8,6	9,1	9,8	10,4	10,9	11,2	11,2	11	10,6	10,2	

πίνακας Π.Β.12

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΗΣ 22α ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΙΚΟΥ ΕΤΟΥΣ											
Στιγμιαία τιμή της GT(W/m^2)											
7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
0	6,5	102,2	248,6	361,9	434,7	441,5	398,5	292,6	129,5	24,1	0

Μέση τιμή της GT(W/m^2) ανά ωριαίο διάστημα										
7-8	**8-9**	**9-10**	**10-11**	**11-12**	**12-13**	**13-14**	**14-15**	**15-16**	**16-17**	**17-18**
3,2	54,3	175,4	305,2	398,3	438,1	420	345,6	211	76,8	12



Σχ.Β.9 Θερμοκρασία-χρόνος(22 Δεκεμβρίου)

Σχ.Β.10 Ακτινοβολία -χρόνος(22Δεκεμβρίου)

Σχ.Β.11 Ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στον συλλέκτη(22 Δεκεμβρίου)

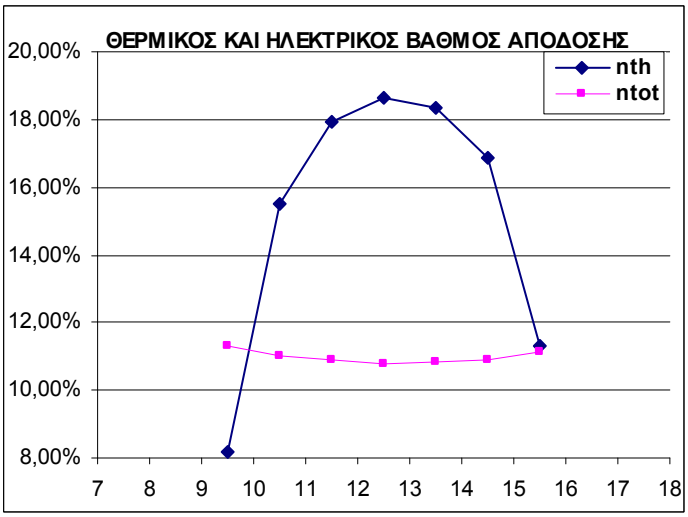
Β.3.5 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη REFU (22 Δεκεμβρίου)

πίνακας Π.Β.13

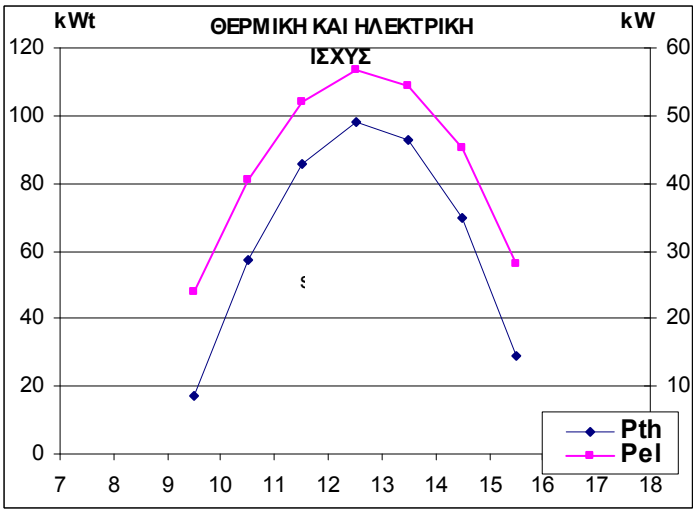
ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ REFU ΚΑΤΑ ΤΗΝ 22α ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ											
	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
nth	*****	*****	8,31%	15,7%	18,04%	18,76%	18,48%	16,8%	11,45%	*****	*****
ntot	*****	*****	10,98%	10,76%	10,57%	10,48%	10,49%	10,62%	10,82%	*****	*****
Itot(W)	*****	*****	210	366	477,6	525,6	504	408	253,2	*****	*****
Ith(Wth)	*****	*****	17,47	57,44	86,17	98,6	93,16	68,55	29	*****	*****
Iel(Wel)	*****	*****	23	39,39	50,51	55,08	52,87	43,32	27,4	*****	*****
To(K)	*****	*****	282,44	283,94	285,11	285,86	286,05	285,56	284,57	*****	*****

Οι αστερίσκοι για κάποια στήλη σημαίνουν πως ο ολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης βρέθηκε αρνητικός με άλλα λόγια η ισχύς για τη λειτουργία του ανεμιστήρα είναι μεγαλύτερη της ισχύος που παρέχουν τα ΦΒ. Έτσι είναι προτιμότερο να μην λειτουργούμε τον ανεμιστήρα εκείνες τις ώρες(μεχρι τις 9 το πρωι και μετά τις 4 το απόγευμα)

Σε μορφή διαγραμματων :



Σχ.Β.12 Οι nth και ntot για REFU



Σχ.Β.13 Οι Pth και Pel για REFU

ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

πίνακας Π.Β.14

ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ REFU ΓΙΑ ΤΗΝ 22ª ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ	
Ολική προσπίπτουσα ενέργεια	**E_{tot} =2,75 kWh**
Θερμική ενέργεια	**E_{th}= 0,45 kWh(th)**
Ηλεκτρική ενέργεια	**E_{el}= 0,291 kWh(el)**
Μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{th}$ =**15,36%**
Μέσος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{tot}$ =**10,67%**

Β.3.6 Θερμική και ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη FINU (22 Δεκεμβρίου)

πίνακας Π.Β.15

ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FINU ΚΑΤΑ ΤΗΝ 22ª ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ											
	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
n_{th}	*****	*****	8,45%	16,18%	18,46%	19,21%	18,92%	17,34%	11,6%	*****	*****
n_{tot}	*****	*****	11,3%	11,07%	10,89%	10,8%	10,81%	10,92%	11,13%	*****	*****
Itot(W)	*****	*****	210	370,8	477,6	525,6	504	415,2	253	*****	*****
Ith(W_{th})	*****	*****	17,75	60,02	88,2	100,97	95,37	72	29,53	*****	*****
Iel(W_{el})	*****	*****	23,71	41,05	52,04	56,8	54,5	45,37	28,2	*****	*****
To(K)	*****	*****	282,4	284	285,15	286	286	285,63	284,6	*****	*****

ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

πίνακας Π.Β.16

ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FINU ΓΙΑ ΤΗΝ 22ª ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ	
Ολική προσπίπτουσα ενέργεια	**E_{tot} =2,75 kWh**
Θερμική ενέργεια	**E_{th}= 0,463 kWh(th)**
Ηλεκτρική ενέργεια	**E_{el}= 0,301 kWh(el)**
Μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{th}$ =**15,73%**
Μέσος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{tot}$ =**10,91%**

Β.3.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ REFU – FINU για την 22ª Δεκεμβρίου

Υπό αυτές τις χειμερινές συνθήκες της 22ας Δεκεμβρίου δεν φαίνεται να υπάρχει και πάλι μεγάλη βελτίωση στη θερμική και ηλεκτρική απόδοση. Οι αντίστοιχες σχετικές αυξήσεις είναι 2,88% για τον θερμικό και 3,43% για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

Σε τέτοιες συνθήκες πρέπει όπως έχεουμε αναφέρει να δίνουμε βάρος στην θερμική απόδοση του συστήματος και στη θερμοκρασία εξόδου.

Όπως όμως βλέπουμε η θερμοκρασία To για την παροχη m=0,05 kg/sec είναι μόλις 1-2 βαθμούς πάνω από αυτή του περιβάλλοντος, δηλαδή πολύ χαμηλή.

Β.3.8 Απόδοση του συλλέκτη TMSG

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε συνοπτικά την απόδοση μιας διάταξης με τοποθετημένο διαφανές κάλυμμα και συγκεκριμένα της TMSG που στην προηγούμενη μελέτη είδαμε πως έχει την καλύτερη θερμική απόδοση.

Η επιλογή αυτή εξυπηρετεί πολύ αποτελεσματικά την κάλυψη θερμικών φορτίων τοον χειμών.

Συγκεκριμένα , από τις δύο εξεταζόμενες ημέρες μας απασχολεί περισσότερο η 22^{α} Δεκεμβρίου όπου τα θερμικά φορτία που απαιτείται να καλυφθούν είναι μεγαλύτερα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιολόγηση της διάταξης έχει εκτός του θερμικού βαθμού απόδοσης και η θερμοκρασία εξόδου του αέρα.

πίνακας Π.Β.17

ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ TMSG ΚΑΤΑ ΤΗΝ 21^{Η} ΜΑΪΟΥ											
	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
n_{th}	46,6%	48,2%	48,75%	48,8%	48,8%	48,8%	48,9%	48,9%	48,7%	48,3%	46,8%
n_{tot}	8,7%	8,28%	7,85%	7,5%	7,28%	7,2%	7,24%	7,43%	7,75%	8,15%	8,56%
Itot(W)	296	485,4	664,7	806,12	899,2	931,9	898,2	804,75	661,2	487,56	305,52
Ith(W_{th})	138	234	323	393,2	439,4	455	439	393,5	322,5	235,56	142,85
Iel(W_{el})	25	40,21	52,2	60,5	65,4	66,4	65	59,8	51,28	39,74	26,11

πίνακας Π.Β.18

ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ TMSG ΓΙΑ ΤΗΝ 21^{η} ΜΑΙΟΥ	
Ολική προσπίπτουσα ενέργεια	E_{tot} = 7,24 kWh
Θερμική ενέργεια	E_{th}= 3,37 kWh(th)
Ηλεκτρικη ενεργεια	E_{el}= 0,55 kWh(el)
Μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{th}$ = 48,3%
Μέσος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{tot}$ =7,82%
Μέση θερμοκρασία εξόδου του αέρα	$\bar{T}_o$ =301,5 K (28,5 oC)

Αμέσως βλέπουμε πως η θερμική απόδοση είναι υπερδιπλάσια της αντιστοιχης του REFU ενώ η αντίστοιχη μείωση στην ηλεκτρική ισχύ είναι ~21%. όπως όμως πολλές φορές έχει αναφερθεί η θερμική αυτή ισχύς δεν έχει πολύ μεγάλη αξία για εφαρμογές θέρμανσης χώρου παρά μόνο ίσως για προθέρμανση νερού με η χρήση ενελλάκτη.

Για αυτό το λόγο υπαρχει η επιπλέον γραμμή του πίνακα που αναφέρει τη μέση θερμοκρασία εξόδου του αέρα.

πίνακας Π.Β.19

ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ TMSG ΚΑΤΑ ΤΗΝ 22^{α} ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ											
	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
n_{th}	*****	*****	44,48%	47,5%	48,35%	48,6%	48,5%	48%	45,7%	*****	*****
n_{tot}	*****	*****	9,46%	9,08%	8,81%	8,7%	8,72%	8,92%	9,27%	*****	*****
Itot(W)	*****	*****	210	366,2	478	526	504	414,7	253	*****	*****
Ith(W_{th})	*****	*****	93,64	174,2	230,96	255,35	244,3	128,95	115,86	*****	*****
Iel(W_{el})	*****	*****	19,9	33,25	42,1	45,71	43,99	37	23,48	*****	*****
To(K)	*****	*****	283,96	286,26	288,1	289	289,1	288,17	286,3	*****	*****

πίνακας Π.Β.20

ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ TMSG ΓΙΑ ΤΗΝ 22ª ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ	
Ολική προσπίπτουσα ενέργεια	E_{tot}=**2,75 kWh**
Θερμική ενέργεια	E_{th} = **1,28 kWh(th)**
Ηλεκτρική ενέργεια	E_{el} = **0,25 kWh(el)**
Μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{th}$ **=15,2%**
Μέσος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	$\bar{n}_{tot}$ **= 9,81%**
Μέση θερμοκρασία εξόδου του αέρα	$\bar{T}_O$ **=287,2 K (14,2oC)**

Για τις χειμερινές συνθήκες παρατηρούμε ότι η διάταξη με υαλοπίνακα προσφέρει σχεδόν τριπλάσιο θερμικό βαθμό απόδοσης απο αυτες χωρίς , ενώ και η θερμοκρασία του παραγόμενου αέρα για m=0,05 kg/sec είναι 3-6 ^oC πάνω από την ατμοσφαιρική

Β.3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η τιμή της παροχής m πρέπει να είναι κοντά στην mo κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης . Ο ζεστός αέρας μπορεί να απορρίπτεται ή να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νερού.

- Κατά τις πολύ κρύες ημέρες το σύστημα απαγωγης θερμότητας πρέπει να εκκινεί μετά τις 10 π.μ και να κλείναι πριν τις 16 μ.μ εκτός ασφαλώς αν επικρατεί πυκνή νέφωση οπότε δεν πρέπει να λειτουργεί.

- Η υπό μελέτη UNGLAZED διατάξεις δεν μπορούν να παρέχουν ζεστό αέρα σε ικανοποιητική θερμοκρασία για την θέρμανση χώρων κατά τους χειμερινούς μήνες, αντίθετα οι GLAZED διατάξεις πετυχαίνουν προθέρμανση του αέρα κατά 3-6 oC κατά τις μεσημβρινές χειμερινές ώρες.

- Σε κάθε περίπτωση ενδείκνυται η χρήση ρυθμιστή της παροχής με βάση τις εξωτερικές συνθήκες και τις ανάγκες της ηλεκτρικής και θερμικής κατανάλωσης.

- Ως συμπέρασμα θα λέγαμε ότι η βελτίωση της απόδοσης του συλλέκτη λόγω των διατάξεων αύξησης της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας στις UNGLAZED μετατροπές φαίνεται να είναι μικρή και μπορεί να δικαιολογηθεί μόνο από το πολύ χαμηλό κόστος της μετατροπής . Στην περίπτωση αυτή ίσως η λύση της μετατροπής από REFU σε TMSU να είναι και η ενδεδειγμένη αφού η TMS είναι σαφώς φθηνότερη απο τη FIN και προσφέρει παρόμοια ποσοστά βελτίωσης στην θερμική και ηλεκτρική απόδοση.
  Σε κάθε περίπτωση πάντως έχει δειχθεί πως το βάθος του αεραγωγού d είναι ουσιώδους σημασίας και πρέπει να επιλέγεται όσο πιο μικρό γίνεται.

- Τα πράγματα στις GLAZED διατάξεις είναι αρκετά ξεκάθαρα και δείχνουν ότι η TMSG διάταξη μπορεί να προσφέρει σημαντική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης χωρίς αντίστοιχα πολύ μεγάλη μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης.

- Τέλος θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτουν από απολοποιημένα μοντέλα ροής και μεταφοράς θερμότητας και πρέπει να επαληθεύονται με βάση πειραματικά δεδομένα.

Βιβλιογραφία

- J.A Duffie & W.A Beckman "Solar Engineering of Thermal processes" Wiley N.Y U.S.A

- F. P. Incropera, D. P. De Witt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Fifth edition, John Wiley & Sons, 2002

- F.Kreith and J.F.Kreider "Principles of Solar Engineering " McGraw-Hill (1978)

- "Solar Energy - the State of the Art - ISES Position Papers" **Edited by Jeffrey M. Gordon** James & James (Science Publishers) Ltd 2001

- "Solar cells and their applications edited" edited by Larry D. Partain John Wiley & Sons, 1995

- Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος "Θερμικά – Ηλιακά συστήματα " ΑΘΗΝΑ 2004

- Μιχάλης Γρ. Βραχόπουλος "Αναλυτική προσέγγιση κεντρικών θερμάνσεων" Εκδόσεις Αθ.Σταμούλης

- Γ.Μπεργελές "Περιβαλλοντική Τεχνολογία" ΑΘΗΝΑ 2002

Internet sources

- www.wikepedia.com

- www.cres.gr

- www.rae.gr

- http://energypoint.gr

- http://www.greenpeace.org/greece

- www.solarwall.com

- www.iea-shc.org/task 35

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ FORTRAN

```
c       PV/T Air  Systems

c       REF UNGLAZED SYSTEM


      PROGRAM REFUNGL

      REAL L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,nelt,m

c     ------Geometrical data input-----

       L=1.
       b=0.4
       d= 0.05

c     ------Pv module data input ------

       ep= 0.9
       a= 0.9
       t=0.92
       nref=0.127
       Vita=0.006

c     -----Insulation data input--------

       Kins= 0.027
       dins=0.05
       ew= 0.9

c     ------Atmospheric data input------

       Ta= 283.0
       Tin= Ta
       Ir=300
       Tref=293.
       Vw=3.
c     -------Contant values -----------------

       S = 5.67*10.**(-8)
       r=0.5
       et=0.9
       g=9.81
c     -------Flow data input ------------

       m=0.05
c     -------Constant Air Properties ----
```

```
      Cp= 1005.
c     -------Initial calculations-------
      Ap=b*L
      Ptot=Ap*Ir
      Aint= (b+2*d)*L
      Ad=b*d
      Sv=2*(b+d)
      epw=1./(1./ep+1./ew-1.)
      Ts= 0.0552*Ta**1.5
      hw=2.8+3.*Vw
      Ub=Kins/dins*(1+2*d/b)

c     -------Air properties loop-------
c      Tm=Ta
      DO
      Pyk= 2.441-0.0042*Tm                    !PYKNOTHTA AERA (Kg/m^3)
      Syn= 5E-08*Tm+3.5E-06                   !DYNAMIKH SYNEKTIKOTHTA AERA
      Ka= 0.00007*Tm+0.0048                   !SYNTELESTHS 8ERMIKHS AGWGHS AERA
c     ------Calculation of hc-----------
      DH= 4*Ad/Sv
      Re= 4*m/(Sv*syn)
      Pr=0.719
      Si=14.3*log10(L/DH)-7.9
      Nu=0.0182*Re**0.8*Pr**0.4*(1+Si*DH/L)
```

```
      hc= Nu*Ka/DH

      Tp=287.9

      F2=10.

c     -----equation solving loops------

      DOWHILE(ABS(F2).GT.0.1)

      TP=TP-0.001

      hrpa=S*ep*(Tp**4-Ts**4)/(Tp-Ta)

      Ut= hw+hrpa

      nel=nref*(1-vita*(Tp-Tref))

      Qs=Ap*Ir*t*a*(1.-nel)

      Tw=200.
      F1=10.

      DOWHILE(ABS(F1).GT.0.1)

      Tw=Tw+0.001

      hrpw=S*epw*(Tp+Tw)*(Tp**2+Tw**2)

      Tf=(2*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tp+Aint*hc*Tw)/(2*m*Cp+Ap*hc+Aint*hc)

      F1 = Qs-Ap*Ut*(Tp-Ta)-Ap*hc*(Tp-Tf)-Ap*hrpw*(Tp-Tw)

      ENDDO

      F2=Ap*hrpw*(Tp-Tw)-Ap*Ub*(Tw-Ta)-Aint*hc*(Tw-Tf)

      ENDDO

      To=(2*Tf-Tin)

c     ------Calculation of flow variables----------

      V=m/(Ad*Pyk)                          !TAXYTHTA EGARSIAS ROHS (m/sec)

      IF(Re.LT.2400)THEN
      f=64./re
```

```
      ELSE
      f=0.316*Re**(-0.25)                          !SYNTELESTHS TRIVHS
      ENDIF

      Hp=V**2/(2.*g)*(f*(L/DH)+7.2)                !OLIKO YPSOS APWLEIWN ROHS (m)

      DP=Pyk*g*Hp                                  !PTWSH PIESHS (Pa)

      P=m*DP/(Pyk*0.8)                             !ISXYS ANEMISTHRA (W)

c     -----calculation of Therm&ELec power----

      Pel=Ap*t*a*Ir*nel                            !OLIKH HLEKTRIKH ISXYS

      Pelt=Pel-P

      Qu=m*Cp*(To-Tin)

      nth=Qu/Ptot

      nelt= Pelt/Ptot


      IF(ABS(Tf-Tm).GT.0.1)THEN
      Tm=Tf

      ELSE
      EXIT
      ENDIF
      ENDDO

      PRINT *, nth,nelt ,To

      END
```

```
      PROGRAM refgl


     Real L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,m

c     ------  geometrical data input-----

      L=1.0
      b=0.4
      d= 0.10
      Ang=38.
      diak=0.03
      g=9.81
c      ------Pv module data input -------

       ep= 0.9
       a= 0.9
       t=0.87
       nref=0.117
       Vita=0.006

c      -----insulation data input----

      Kins= 0.027
      dins=0.05
      ew= 0.9

c      ------ atmospheric data input----

      Ta= 293.
      Tin= Ta
      Ir= 800.
      Tref= 298.
      Vw=  1.5

c     ------- Flow data input ---------

      m=0.05

c     ------- A I R -------
C      IDIOTHTES AERA

        Pr=0.719                                    !ARI8MOS PRANDTL AERA
        Cp=1005


      Tm=Ta
```

```
      DO

       Pyk= 2.441-0.0042*Tm                          !PYKNOTHTA AERA (Kg/m^3)

       Syn= 5E-08*Tm+3.5E-06                         !DYNAMIKH SYNEKTIKOTHTA AERA

       Ka= 0.00007*Tm+0.0048


c     -------Diafora-----------------

      S = 5.67*10.**(-8)
      eg=0.9
      hc1=1.5
      g=9.81


c     -------ARXIKOI YPOLOGISMOI-------
      Ap=b*l

      Aint= (b+2*d)*L

      Ad=b*d

      Sv=2*(b+d)

       epw=1./(1./ep+1./ew-1.)

       epg=1./(1./ep+1./eg-1.)


       Ts= 0.0552*Ta**1.5

       hw=2.8+3.*Vw

       Ub=Kins/dins

       DH= 4*Ad/Sv

       Re=  4*m/(Sv*Syn)
                                                     !ARITHMOS RE
c      ------YPOLOGISMOS hc-----------

       Si=14.3*log10(L/DH)-7.9

       Nu=0.0182*Re**0.8*Pr**0.4*(1+Si*DH/L)          !ARITHMOS NU
```

```
   hc= Nu*Ka/DH

  Tp=330.
  F2=10.

DOWHILE(ABS(F2).GT.0.1)
  TP=TP-0.001

  TG=200.
  F=10.

DOWHILE(ABS(F).GT.0.05)

TG=TG+0.001

hrpg=S*epg*(Tp+Tg)*(Tp**2+Tg**2)

hrga= S*eg*(Tg**4-Ts**4)/(Tg-Ta)

hga= hw+ hrga

Ut= hrpg+hc1

 F=Ut*(Tp-Tg)- hga*(Tg-Ta)

  ENDDO

   Tw=200.

  F1=10.

 CALL ANu(Fnu,Ang,Tp,Tg,diak,cp,g,Ka)

  hc1=Fnu*Ka/diak

 DOWHILE(ABS(F1).GT.0.05)

 Tw=Tw+0.01

nel=nref*(1-vita*(Tp-Tref))

Qs=Ap*(t*a)*(1.-nel)*Ir

hrpw=S*epw*(Tp+Tw)*(Tp**2+Tw**2)

Tf=(2*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tp+Aint*hc*Tw)/
```

```
1(2*m*Cp+Ap*hc+Aint*hc)

 F1=Qs-Ap*Ut*(Tp-Tg)-Ap*hc*(Tp-Tf)-Ap*hrpw*(Tp-Tw)

  ENDDO

  F2=Ap*hrpw*(Tp-Tw)-Ap*Ub*(Tw-Ta)-Aint*hc*(Tw-Tf)
  print *, f2
  ENDDO

  IF(ABS(Tf-Tm).GT.0.1)THEN

  Tm=Tf

  Else
  EXIT
  ENDIF
  ENDDO

 To=(2*Tf-Tin)

 Qu=m*Cp*(To-Tin)

 nth=Qu/(Ap*Ir)

  PRINT *, nth,hc1


  END

c    -------calculation of hc'-------------

 Subroutine ANu(Fnu,Ang,Tp,Tg,diak,cp,g,Ka)
     Real L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,m
    Tm=(Tp+Tg)/2.

    pi=4*atan(1.)

    phi=Ang*pi/180.

    Pyk= 1.96-0.0027*Tm

    Syn= 4.33E-08*Tm+5.6E-06

    Ka= 0.000063*Tm+0.007

    Ra=(2*g*pyk**2*Cp)/(Ka*Syn*(Tg+Tp))*(Tp-Tg)*diak**3
```

```
A=1.-1708./(Ra*cos(phi))

If(A.lt.0) A=0

B=(Ra*cos(phi)/5830.)**0.333-1

If(B.LT.0) B=0

C= 1-sin(1.8*phi)**1.6*1708/(Ra*cos(phi))

Fnu= 1.+1.446*A*C+B

return
end
```

```
      PROGRAM TMSUNGL


      Real L,m,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,nelt


c     ------  geometrical data input-----

      L=1.0
      b=0.4
      d= 0.05
      g=9.81
c    ------Pv module data input -------

      ep= 0.9
      a= 0.9
      t=0.92
      nref=0.127
      Vita=0.006

c    -----insulation data input----

      Kins= 0.027
      dins=0.05
      ew= 0.9

c    ------ atmospheric data input----

      Ta= 283.
      Tin= Ta
      Ir= 300.
      Tref= 298.
      Vw=  3.0

c    ------- Flow data input ---------

      m=0.050

c     ------- A I R -------
      Cp= 1005.

      Pr=0.719
      Pyk= 2.441-0.0042*tin                    !PYKNOTHTA AERA (Kg/m^3)

      Syn= 5E-08*tin+3.5E-06                   !DYNAMIKH SYNEKTIKOTHTA AERA
```

```
      Ka= 0.00007*tin+0.0048                    !SYNTELESTHS 8ERMIKHS AGWGHS AERA


c     ------- Diafora -----------------

      S = 5.67*10.**(-8)
      r=0.5
      et=0.9

c     -------Initial calculations -------

      Ap=b*l

      Aint= (b+2*d)*L

      Ad=b*d

      Sv=2*(2*b+d)

      epw=1./(1./ep+1./ew-1.)
      ept=1./(1./ep+1./et-1.)
      etw=1./(1./et+1./ew-1.)

      Ts= 0.0552*Ta**1.5

      hw=2.8+3.*Vw

      Ub=Kins/dins*(1+2*d/b)


c     ------Calculation of hc -----------


       DH= 4*Ad/Sv

       Re= 4*m/(Sv*Syn)


       Si=14.3*log10(L/dh)-7.9

       Nu=0.0182*Re**0.8*Pr**0.4*(1+Si*DH/L)

       hc= Nu*Ka/DH


c     -----equation solving loops----------
```

```
      Tp=287.
      f2=10.
    DOWHILE(ABS(F2).GT..1)

      Tt=200.
       F=10.
    DOWHILE(ABS(F).GT.0.1)

    Ut= hw+S*ep*(Tp**4.-Ts**4)/(Tp-Ta)

    nel=nref*(1-vita*(Tp-Tref))

    Qs=Ap*(t*a)*(1.-nel)*Ir

    hrpt=S*ept*(Tt+Tp)*(Tt**2+Tp**2)

    Tf1=(2*r*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tp+Ap*hc*Tt)/(2*r*m*Cp+2*Ap*hc)

    F=Qs-Ap*hc*(Tp-Tf1)-Ut*Ap*(Tp-Ta)-Ap*hrpt*(Tp-Tt)

    Tt=Tt+0.004

     ENDDO

    Tw=200.
    F1=10.

    DOWHILE(ABS(F1).GT.0.1)
    hrtw=S*etw*(Tt+Tw)*(Tt**2+Tw**2)

    hrpt=S*ept*(Tt+Tp)*(Tt**2+Tp**2)

   Tf2= (2*(1.-r)*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tt+Aint*hc*Tw)/(2*(1.-r)*m*Cp+
1Ap*hc+Aint*hc)

  F1=Ap*hc*(Tt-Tf1)+Ap*hc*(Tt-Tf2)+Ap*hrtw*(Tt-Tw)-hrpt*Ap*(Tp-Tt)

  Tw=Tw+0.001
   ENDDO


   F2=hrtw*Ap*(Tt-Tw)-hc*Aint*(Tw-Tf2)-Ub*Ap*(Tw-Ta)

    Tp=TP-0.0001

   ENDDO
```

```
      To1=(2*Tf1-Tin)

      To2=(2*Tf2-Tin)

      To= (to1+to2)/2.

      Tf=(tf1+tf2)/2.

C       YPOLOGISMOS ROIKWN MEGE8WN

       V=m/(Ad*Pyk)                              !TAXYTHTA EGARSIAS ROHS (m/sec)

       IF(Re.LT.2400)THEN
       fd=64./re
       ELSE
       fd=0.316*Re**(-0.25)                       !SYNTELESTHS TRIVHS
       ENDIF

       Hp=V**2/(2.*g)*(fd*(L/DH)+7.2)             !OLIKO YPSOS APWLEIWN ROHS (m)

       DP=Pyk*g*Hp                               !PTWSH PIESHS (Pa)

       P=m*DP/(Pyk*0.8)                          !ISXYS ANEMISTHRA (W)

       Pel=Ap*t*a*Ir*nel                         !OLIKH HLEKTRIKH ISXYS

       Pelt=Pel-P

       Ptot=Ap*Ir

      Qu=r*m*Cp*(To1+to2-2*Tin)

      nelt=Pelt/Ptot

      nth=Qu/(Ap*Ir)

      PRINT *, nth ,nelt,To

      END
```

```
      PROGRAM TMSGL


      REAL L,m,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,nelt


c     ------Geometrical data input-----

      L=1.5
      b=0.8
      d= 0.05
      Ang=38.
      diak=0.03
      g=9.81
c     ------Pv module data input -------

      ep= 0.9
      a= 0.9
      t=0.87
      nref=0.117
      Vita=0.006
      Tref= 298.


c     -----insulation data input----

      Kins= 0.027
      dins=0.05
      ew= 0.9

c     ------atmospheric data input----

      Ta= 284.
      Tin= Ta
      Ir=211.
      Vw= 3.

c     ------- Flow data input ---------

      m=0.05


      Tm=Ta

      DO

c      ------- A I R -------
```

```
      Cp= 1005.

      Pr=0.719
      Pyk= 2.441-0.0042*ta                          !PYKNOTHTA AERA (Kg/m^3)

      Syn= 5E-08*ta+3.5E-06                         !DYNAMIKH SYNEKTIKOTHTA AERA

      Ka= 0.00007*Ta+0.0048                         !SYNTELESTHS 8ERMIKHS AGWGHS
AERA

c     -------diafora -----------------

      S= 5.67*10.**(-8)
      r=0.5
      et=0.9
      eg=0.9
      hc1=0.5


c     -------Initial calculations-------
      Ap=b*l

      Aint= (b+2*d)*L

      Ad=b*d

      Sv=2*(2*b+d)

      ept=1./(1./ep+1./et-1.)
      etw= 1./(1./ew+1./et-1.)
      epg=1./(1./ep+1./eg-1.)

      hc= Nu*Ka/DH

      Ts= 0.0552*Ta**1.5

      hw=2.8+3.*Vw

      Ub=Kins/dins


c     ------Calculation of hc-----------


      DH= 4*Ad/Sv

      Re= 4*m/(Sv*Syn)
```

```
 Si=14.3*log10(L/dh)-7.9

 Nu=0.0182*Re**0.8*Pr**0.4*(1+Si*DH/L)

 hc= Nu*Ka/DH

 Tp=294.
 F3=10.
 DOWHILE(ABS(F3).GT..1)

 TG=200.
 F=10.

DOWHILE(ABS(F).GT.0.05)

 hrpg=S*epg*(Tp+Tg)*(Tp**2+Tg**2)

 hga= hw+S*eg*(Tg**4.-Ts**4)/(Tg-Ta)

 Ut= hrpg+hc1

 F=Ut*(Tp-Tg)- hga*(Tg-Ta)

 TG=TG+0.001

 ENDDO

 Call ANu(Fnu,Ang,Tp,Tg,diak,cp,g,Ka)

 hc1=Fnu*Ka/diak


  Tt=200.

  F1=10.

  DOWHILE(ABS(F1).GT..05)

Ut= hrpg+hc1

nel=nref*(1-vita*(Tp-Tref))

Qs=Ap*(t*a)**(1.-nel)*Ir

hrpt=S*ept*(Tt+Tp)*(Tt**2+Tp**2)
```

```
c     ------E3ISWSEIS   FF1,FF2 CHECKED----------

       Tf1=(2.*r*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tp+Ap*hc*Tt)/(2.*r*Cp*m+2.*Ap*hc)

      F1=Qs-Ap*hc*(Tp-Tf1)-Ut*Ap*(Tp-Tg)-hrpt*Ap*(Tp-Tt)


       Tt=Tt+0.001

      ENDDO


        Tw=200.
        F2=10.

      DOWHILE(ABS(F2).GT.0.1)

      hrpt=S*ept*(Tt+Tp)*(Tt**2+Tp**2)

      hrtw=S*etw*(Tt+Tw)*(Tt**2+Tw**2)


     Tf2=(2.*(1.-r)*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tt+Aint*hc*Tw)/
    1(2.*(1.-r)*Cp*m+Ap*hc+Aint*hc)


      F2=Ap*hc*(Tt-Tf1)+Ap*hc*(Tt-Tf2)+Ap*hrtw*(Tt-Tw)-hrpt*Ap*(Tp-Tt)

      TW=TW+0.01

      ENDDO

      F3=hrtw*Ap*(Tt-Tw)-hc*Aint*(Tw-Tf2)-Ub*Ap*(Tw-Ta)

      tP=TP-0.0001

      ENDDO


      Tf=(Tf1+Tf2)/2.

        If(ABS(Tf-Tm).GT.0.1)then

        Tm=Tf

        Else
        EXIT
```

```
  ENDIF
  ENDDO

 To1=(2*Tf1-Tin)

 To2=(2*Tf2-Tin)

 To=(to1+to2)/2.


 V=m/(Ad*Pyk)                                  !TAXYTHTA EGARSIAS ROHS (m/sec)

 If(Re.LT.2400)Then
 f=64./re
 else
 f=0.316*Re**(-0.25)                           !SYNTELESTHS TRIVHS
 endif

 Hp=V**2/(2.*9.81)*(f*(L/DH)+7.2)              !OLIKO YPSOS APWLEIWN ROHS (m)

 DP=Pyk*9.81*Hp                                !PTWSH PIESHS (Pa)

P=m*DP/(Pyk*0.8)                               !ISXYS ANEMISTHRA (W)

Pel=Ap*t*a*Ir*nel                              !OLIKH HLEKTRIKH ISXYS

Pelt=Pel-P

Ptot=Ap*Ir

Qu=r*m*Cp*(To1+to2-2*Tin)

nth=Qu/(Ap*Ir)

nelt=pelt/ptot

PRINT *,  nth,nelt,Qu,Pelt,Ptot,To

END

Subroutine ANu(Fnu,Ang,Tp,Tg,diak,cp,g,Ka)

Real L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,m
Tm=(Tp+Tg)/2.

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

```
phi=Ang*pi/180.

Pyk= 1.96-0.0027*Tm

Syn= 4.33E-08*Tm+5.6E-06

Ka= 0.000063*Tm+0.007

Ra=(2*g*pyk**2*Cp)/(Ka*Syn*(Tg+Tp))*(Tp-Tg)*diak**3

A=1.-1708./(Ra*cos(phi))

If(A.lt.0) A=0

B=(Ra*cos(phi)/5830.)**0.333-1

If(B.LT.0) B=0

C= 1-sin(1.8*phi)**1.6*1708/(Ra*cos(phi))

Fnu= 1.+1.446*A*C+B

RETURN
END
```

```
c       PV/T Air  Systems

c       Fin Unglazed


      Program Finungl

      Real L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,Kf,nth,m,mf,nf,nelt


c     ------  geometrical data input-----

      L=1.0
      b=0.4
      d= 0.05
      g=9.81
c       ------Pv module data input -------

       ep= 0.9
       a= 0.9
       t=0.92
       nref=0.127
       Vita=0.006

c       -----insulation data input----

      Kins= 0.027
      dins=0.05
      ew= 0.9

c       ------ atmospheric data input----

      Ta= 283.
      Tin= Ta
      Ir= 300.
      Tref= 298.
      Vw=  3.


      m=0.050
c     ------- Flow data input ---------

      Cp= 1005.

      Tm=293

      Pr=0.719
```

```
      Pyk= 2.441-0.0042*Tm                    !PYKNOTHTA AERA (Kg/m^3)

      Syn= 5E-08*Tm+3.5E-06                   !DYNAMIKH SYNEKTIKOTHTA AERA

      Ka= 0.00007*Tm+0.0048                    !SYNTELESTHS 8ERMIKHS AGWGHS
AERA


c     ------Fin data input -----------
      N=15
      Hf=0.5*d
      tf=0.001
      Af=2*L*Hf
      Acf=Hf*tf
      Kf=120.


c     -------diafora -----------------

      S = 5.67*10.**(-8)


c     -------Initial calculations-------
      Ap=b*L

      Aint= (b+2*d)*L

      Ad=b*d

      Sv=2*(b+d+N*Hf)

      epw=1./(1./ep+1./ew-1.)

      Ts= 0.0552*Ta**1.5

      hw=2.8+3.*Vw

      Ub=Kins/dins*(1+2*d/b)

c      ------Calculation of hc-----------


      DH= 4*Ad/Sv

      Re=  4*m/(Sv*syn)
```

```
      Si=14.3*log10(L/dh)-7.9

      Nu=0.0182*Re**0.8*Pr**0.4*(1+Si*DH/L)

      hc= Nu*Ka/DH

      PRINT *,  Ad,Sv,Dh,Re,Si,Nu,Hc

c     ------- FIN calculations----------

         mf=sqrt(2*hc*L/(Kf*Acf))

         nf=tanh(mf*Hf)/(mf*hf)

         Tp=288.
         F2=10.

       DOWHILE(ABS(F2).GT.0.1)

       TP=TP-0.001

      hrpa=S*ep*(Tp**4-Ts**4)/(Tp-Ta)

      Ut= hw+hrpa

      nel=nref*(1-vita*(Tp-Tref))

      Qs=Ap*Ir*t*a*(1.-nel)

      Tw=200.
      F1=10.

      DOWHILE(ABS(F1).GT.0.1)

      Tw=Tw+0.001

      hrpw=S*epw*(Tp+Tw)*(Tp**2+Tw**2)

     Tf=(2*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tp+(Aint+nf*N*Af)*hc*Tw)/
    1(2*m*Cp+Ap*hc+(Aint+nf*N*Af)*hc)

     F1 = Qs-Ap*Ut*(Tp-Ta)-Ap*hc*(Tp-Tf)-Ap*hrpw*(Tp-Tw)


      ENDDO
```

```
 F2=Ap*hrpw*(Tp-Tw)-Ap*Ub*(Tw-Ta)-(Aint+nf*N*Af)*hc*(Tw-Tf)

 ENDDO


To=(2*Tf-Tin)

C       YPOLOGISMOS ROIKWN MEGE8WN

V=m/(Ad*Pyk)                          !TAXYTHTA EGARSIAS ROHS (m/sec)

If(Re.LT.2400)Then
f=64./re
else
f=0.316*Re**(-0.25)                    !SYNTELESTHS TRIVHS
 endif

Hp=V**2/(2.*g)*(f*(L/DH)+7.2)                !OLIKO YPSOS APWLEIWN ROHS (m)

DP=Pyk*g*Hp                           !PTWSH PIESHS (Pa)

P=m*DP/(Pyk*0.8)                       !ISXYS ANEMISTHRA (W)

Pel=Ap*t*a*Ir*nel                     !OLIKH HLEKTRIKH ISXYS

Pelt=Pel-P

Qu=m*Cp*(To-Tin)

nth=Qu/Ptot
Ptot=Ap*Ir
nelt= Pelt/Ptot
Qu=m*Cp*(To-Tin)

nth=Qu/(Ap*Ir)

Print *, nth,nelt,To

END
```

```
c       PV/T Air  Systems

c       FIN / GL



        Program FINGL

        Real L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,Kf,nth,m,mf,nf,nelt


c       ------  geometrical data input-----

        L=1.0
        b=0.4
        d= 0.05
        Ang=38.
        diak=0.03
        g=9.81
c        ------Pv module data input -------

         ep= 0.9
         a= 0.9
         t=0.87
         nref=0.117
         Vita=0.006

c        -----insulation data input----

        Kins= 0.027
        dins=0.05
        ew= 0.9

c        ------ atmospheric data input----

        Ta= 293.
        Tin= Ta
        Ir= 800.
        Tref= 298.
        Vw=  1.5

c       ------- Flow data input ---------

        m=0.15

c       ------- A I R -------
         Cp= 1005.
```

```
      Tm=293

      Pr=0.719

      Pyk= 2.441-0.0042*Tm                          !PYKNOTHTA AERA (Kg/m^3)

      Syn= 5E-08*Tm+3.5E-06                         !DYNAMIKH SYNEKTIKOTHTA AERA

      Ka= 0.00007*Tm+0.0048                         !SYNTELESTHS 8ERMIKHS AGWGHS
AERA

c     ------PTERYGIO -----------
      N=15
      Hf=0.5*d
      tf=0.001
      Af=2*L*Hf
      Acf=Hf*tf
      Kf=120.

c     -------diafora -----------------

      S = 5.67*10.**(-8)
      eg=0.9
      hc1=0.5


c     ------- YPOLOGSMOI PTERYGIOU----------



c     -------ARXIKOI YPOLOGISMOI-------
      Ap=b*l

      Aint= (b+2*d)*L

      Ad=b*d

      Sv=2*(b+d+2.*N*Hf)

      epw=1./(1./ep+1./ew-1.)

      epg=1./(1./ep+1./eg-1.)


      Ts= 0.0552*Ta**1.5

      hw=2.8+3.*Vw
```

```
      Ub=Kins/dins

c     ------YPOLOGISMOS hc-----------


      DH= 4*Ad/Sv

      Re=  4*m/(Sv*syn)

      Si=14.3*log10(L/dh)-7.9

      Nu=0.0182*Re**0.8*Pr**0.4*(1+Si*DH/L)

      hc= Nu*Ka/DH

      mf=sqrt(2*hc*L/(Kf*Acf))

        nf=tanh(mf*Hf)/(mf*hf)
      Tp=305.5

      F2=10.

     DOWHILE(ABS(F2).GT.0.1)
      TP=TP-0.0001

      TG=200.
      F=10.
     DOWHILE(ABS(F).GT.0.05)

     TG=TG+0.001

     hrpg=S*epg*(Tp+Tg)*(Tp**2+Tg**2)

     hrga= S*eg*(Tg**4-Ts**4)/(Tg-Ta)

     hga= hw+ hrga

     Ut= hrpg+hc1

      F=Ut*(Tp-Tg)- hga*(Tg-Ta)

      ENDDO

      call ANu(Fnu,Ang,Tp,Tg,diak,cp,g,Ka)

      hc1=Fnu*Ka/diak
```

```
      Tw=200.

      F1=10.

      DOWHILE(ABS(F1).GT.0.05)

     Tw=Tw+0.01

    nel=nref*(1-vita*(Tp-Tref))

    Qs=Ap*(t*a)*(1.-nel)*Ir

    hrpw=S*epw*(Tp+Tw)*(Tp**2+Tw**2)

    Tf=(2*m*Cp*Tin+Ap*hc*Tp+(Aint+nf*N*Af)*hc*Tw)/
   1(2*m*Cp+Ap*hc+(Aint+nf*N*Af)*hc)

    F1=Qs-Ap*Ut*(Tp-Tg)-Ap*hc*(Tp-Tf)-Ap*hrpw*(Tp-Tw)

     ENDDO

     F2=Ap*hrpw*(Tp-Tw)-Ap*Ub*(Tw-Ta)-(Aint+nf*N*Af)*hc*(Tw-Tf)

     ENDDO

    To=(2*Tf-Tin)

C       YPOLOGISMOS ROIKWN MEGE8WN

     V=m/(Ad*Pyk)                                !TAXYTHTA EGARSIAS ROHS (m/sec)

     If(Re.LT.2400)Then
     f=64./re
     else
     f=0.316*Re**(-0.25)                         !SYNTELESTHS TRIVHS
      endif

     Hp=V**2/(2.*g)*(f*(L/DH)+7.2)               !OLIKO YPSOS APWLEIWN ROHS (m)

     DP=Pyk*g*Hp                                 !PTWSH PIESHS (Pa)

     P=m*DP/(Pyk*0.8)                            !ISXYS ANEMISTHRA (W)

     Pel=Ap*t*a*Ir*nel                           !OLIKH HLEKTRIKH ISXYS

     Pelt=Pel-P

     Ptot=Ap*Ir
```

```
 nelt= Pelt/Ptot

Qu=m*Cp*(To-Tin)

nth=Qu/(Ap*Ir)

 print *,tP,tW,tG,To,nth,nel,nelt,nf


 END
 Subroutine ANu(Fnu,Ang,Tp,Tg,diak,cp,g,Ka)
    Real L,nref,Kins,Ir,Nu,nel,Ka,nth,m
   Tm=(Tp+Tg)/2.

   pi=4*atan(1.)

   phi=Ang*pi/180.

   Pyk= 1.96-0.0027*Tm

   Syn= 4.33E-08*Tm+5.6E-06

   Ka= 0.000063*Tm+0.007

   Ra=(2*g*pyk**2*Cp)/(Ka*Syn*(Tg+Tp))*(Tp-Tg)*diak**3

   A=1.-1708./(Ra*cos(phi))

   If(A.lt.0) A=0

   B=(Ra*cos(phi)/5830.)**0.333-1

   If(B.LT.0) B=0

   C= 1-sin(1.8*phi)**1.6*1708/(Ra*cos(phi))

   Fnu= 1.+1.446*A*C+B

   return
   end
```