

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ κος ΚΙΜΩΝ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ  
ΤΗΣ ΝΑΞΟΥ

DESALINATION METHODS AND APPLICATION IN THE NAXOS  
ISLAND

ΚΑΤΕΙΝΑ ΜΑΡΙΑ  
Α.Μ. :02105679  
ΑΘΗΝΑ  
ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |     |
|--|-----|
| <b><u>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</u></b> ..... | 1-3 |
| <b><u>ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ</u></b> .....   | 4   |
| <b><u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u></b> .....             | 5   |
| <b><u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u></b> .....             | 6   |
| <b><u>ABSTRACT</u></b> .....             | 6   |

## ΚΕΦΑΛΑΙΑ

### **1. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ**

|  |     |
|--|-----|
| 1.1 Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....                 | 7   |
| 1.2 Ο ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ.....              | 7   |
| 1.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ..... | 8   |
| 1.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....     | 8   |
| 1.5 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....       | 8   |
| 1.6 ΟΞΙΝΗ ΒΡΟΧΗ.....                       | 8-9 |
| 1.7 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ.....                        | 9   |

### **2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

|  |       |
|--|-------|
| 2.1 Η ΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....                               | 10    |
| 2.2 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... | 10    |
| 2.3 Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....                       | 10-11 |
| 2.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....                               | 11-12 |
| 2.5 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....               | 12    |
| 2.6 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....                              | 12    |
| 2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....                                  | 12    |

#### 2.8 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

|  |       |
|--|-------|
| 2.8.1 Η ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗ..... | 13-14 |
| 2.8.2 Η ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ.....           | 14    |
| 2.8.3 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΜΕ ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ..... | 15-16 |
| 2.8.4 Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ.....               | 16-17 |

..

#### 2.9 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 2.9.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ..... | 17-19 |
| 2.9.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ.....    | 19-20 |
| 2.9.3 ΨΥΞΗ.....              | 20    |
| 2.9.3.1 ΑΜΕΣΗ ΚΑΤΑΨΥΞΗ.....  | 21    |
| 2.9.3.2 ΕΜΕΣΗ ΚΑΤΑΨΥΞΗ.....  | 21    |
| 2.9.4 ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΙΟΝΤΩΝ.....  | 22    |
| 2.9.5 ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ..... | 22    |

|   |       |
|---|-------|
| 2.9.10 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... | 22-24 |
|---|-------|

### **3. Ο ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ**

|   |       |
|---|-------|
| 3.1 Ο ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ.....             | 25-26 |
| 3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΕΡΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ..... | 26-27 |
| 3.3 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ.....         | 27-29 |

## **4.ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

|  |       |
|--|-------|
| 4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ-ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ.....                          | 30    |
| 4.1.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....   | 30    |
| 4.1.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ.....                                   | 31    |
| 4.1.2.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....  | 31-32 |
| 4.1.2.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ.....                              | 32-33 |
| 4.1.2.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ..... | 34    |
| 4.1.2.4 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....                                     | 34    |
| 4.1.2.5 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....                      | 34    |
| 4.1.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ.....                                   | 35    |
| 4.1.3.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....  | 35-36 |
| 4.1.3.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....                                     | 36    |
| 4.1.4 ΑΠΟΛΑΒΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ.....   | 36    |
| 4.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ                                 |       |
| 4.2.1 ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ.....  | 36-40 |
| 4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ.....                         | 40-41 |
| 4.2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ.....                        | 41-43 |
| 4.2.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....                      | 43    |
| 4.2.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΘΕΩΡΟΥΝ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....        | 44-46 |

## **5. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

|  |       |
|--|-------|
| 5.1 ΗΛΙΑΚΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ.....                | 47    |
| 5.1.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ..... | 47-48 |
| 5.1.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....                   | 48    |
| 5.2 ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ.....                                       | 49-50 |
| 5.3 ΗΛΙΑΚΟΙ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΕΣ.....  | 51    |
| 5.3.1 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΕΣ ΜΕ ΛΕΚΑΝΗ   |       |
| 5.3.1.1 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΗΣ ΚΛΙΣΗΣ.....                              | 51    |
| 5.3.1.2 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΨΥΧΟΜΕΝΟ ΚΑΛΥΜΜΑ.....                                  | 51    |
| 5.3.1.3 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ.....             | 51    |
| 5.3.1.4 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ.....                            | 51    |
| 5.3.2 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ ΦΥΤΙΛΙΟΥ.....   | 52-56 |
| 5.3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ.....                         | 53    |
| 5.3.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ (ΕΝΕΡΓΟΥ ΤΥΠΟΥ)..... | 53    |
| 5.3.5 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΡΑΣΗΣ.....   | 54    |
| 5.3.6 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΛΕΚΑΝΗ.....  | 55    |
| 5.3.7 ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΠΟΛΥΦΥΤΙΛΟΣ   |       |

**6. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

6.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ.....57

6.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ.....58-59

6.3 ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....60-65

6.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ.....66-69

6.5 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ.....70

6.6 ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ.....70-71

6.7 ΗΛΙΟΚΙΝΟΥΜΕΝΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ.....71

    6.7.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....71

    6.7.2 ΗΛΙΑΚΕΣ ΛΙΜΝΕΣ.....71-72

    6.7.3 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....72-73

    6.7.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....73-79

6.8 ΑΠΟΣΤΑΞΗ

    6.8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....80-81

    6.8.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....82-86

6.9 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ.....87

    6.9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....87-90

6.10 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΙΑ ΜΑΚΡΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ LTV.....90

6.11 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΙΑ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ.....90-94

**7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ.....95-106**

**8. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΝΑΞΟ**

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....107

8.2 ΚΛΙΜΑ.....107-112

**9. ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

9.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΥΔΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ...113-115

9.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....116-117

9.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....117-133

9.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ.....134-136

9.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....137-154

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....155-192**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.....194-202**

**10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....203**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....204**

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....205**



## ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$q_u$  = ωφέλιμη ενέργεια που παρέχεται από τον συλλέκτη [ W ]

$A_c$  = συνολική επιφάνεια του συλλέκτη [m<sup>2</sup>]

$G_T$  = ολική στιγμιαία τιμή της ακτινοβολίας [W/m<sup>2</sup>]

$\tau\alpha$  = γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας

$U_L$  = συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών [W/m<sup>2</sup>°C]

$T_p$  = μέση θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης [°C]

$T_a$  = θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C]

$T_o$  = θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη [°C]

$T_i$  = θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη [°C]

$\dot{m}$  = ροή μάζας [kg/s]

$c_p$  = ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση [J/kgK]

$F_R$  = παράγων θερμικής απολαβής του συλλέκτη

$I_t$  = ωριαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]

$\beta$  = η γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου ως προς το οριζόντιο (degrees)

$\rho$  = ανακλαστικότητα του εδάφους (0.2 για συνηθισμένο ως 0.7 για χιονισμένο)

$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b}$  = λόγος άμεσης ακτινοβολία,  $I_{bT}$  = ωριαία άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]

$I_b$  = ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]

$I_d$  = ωριαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]

$G_b$  = στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [W/m<sup>2</sup>]

$G_d$  = στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [W/m<sup>2</sup>]

$G_T$  : Η στιγμιαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [kW/m<sup>2</sup>]

$A_c$  : Η επιφάνεια του συλλέκτη [m<sup>2</sup>]

$F_R U_L$  [W/m<sup>2</sup>K] και  $F_R (\tau\alpha)$  χαρακτηριστικά του συλλέκτη

$T_a$  : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$T_i$  : είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη

$T_i$  : η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοποιητή

$\dot{Q}_h$  : ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

$Q_{\max}$  : ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

$\rho_o, C_{po}, T_o$  : μεγέθη του αλμυρού νερού στην δεξαμενή τροφοδοσίας

$V_i$  : ροή όγκου [m<sup>3</sup>/s]

NTU: αριθμός μεταφερόμενων μονάδων

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το νερό είναι από τα σημαντικότερα αγαθά της ανθρώπινης ύπαρξης, βασικός παράγοντας και στοιχείο της ανθρώπινης εξέλιξης και γενικά της ζωής πάνω στην Γη. Η θέση όμως αυτού του πολύτιμου αγαθού, ολοένα και διακυβεύεται. Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της Γης σε συνδυασμό με την αυξανόμενη μόλυνση των υδάτινων πόρων του πλανήτη μας, αποτελούν τις κυριότερες αιτίες έλλειψης πόσιμου νερού σήμερα. Λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μεγάλων ξηρών περιοχών του πλανήτη, όπου επικρατεί παρατεταμένη ξηρασία, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία παραμένει σε υψηλά επίπεδα, οδηγούμαστε αναπόφευκτα στον οξύ προβληματισμό για το μέλλον αυτού του τόπου και στην αναγκαιότητα εύρεσης άμεσου και αποτελεσματικής λύσης στο πρόβλημα του νερού.

Μία αποτελεσματική λύση είναι η αφαλάτωση του θαλάσσιου ή υφάλμυρου νερού, το οποίο ουσιαστικά βρίσκεται σε ανεξάντλητες ποσότητες παντού. Δεδομένου ότι και ο ήλιος είναι ουσιαστικά μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, προτείνεται ως λύση η αφαλάτωση με την χρήση ηλιακών συλλεκτών.

Ένας ακόμη ενθαρρυντικός παράγοντας που ενισχύει αυτή την λύση είναι ότι οι ώρες της ημέρας και οι εποχές του χρόνου όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη ζήτηση σε πόσιμο νερό, συμπίπτουν με τις ώρες και τις εποχές όπου τα επίπεδα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκονται στο μέγιστο για μια χώρα του βορείου ημισφαιρίου, όπως η Ελλάδα που αφορά την έρευνα που πραγματοποιείται σε αυτή την εργασία.

Κύριο μέλημα της παρούσης εργασίας είναι η βιβλιογραφική διερεύνηση των φυσικών φαινομένων που διέπουν την μέθοδο της ηλιακής απόσταξης. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε ένα απλό σύστημα ηλιακής απόσταξης.

ΜΑΡΙΑ ΚΑΤΕΙΝΑ  
ΑΘΗΝΑ 2008

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Το πρόβλημα έλλειψης πόσιμου νερού στον πλανήτη μας, λόγω της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης του, εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού και της υπερκατανάλωσης του στις προηγμένες χώρες, της μόλυνσης του από τα βιομηχανικά λύματα και απόβλητα και της παρατεταμένης ξηρασίας σε κάποιες περιοχές, οδηγεί με ραγδαίους ρυθμούς στο μείζον πρόβλημα της λειψυδρίας.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει τις τεχνικές παραγωγής πόσιμου νερού, μέσω της διαδικασίας της αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, το οποίο διατίθεται σε θεωρητικά ανεξάντλητες ποσότητες για τις ανάγκες του πλανήτη.

Η εργασία επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στη μέθοδο αφαλάτωσης του νερού χρησιμοποιώντας τον ήλιο ως πηγή ενέργειας. Πρόκειται για την μέθοδο της ηλιακής απόσταξης, η οποία πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ηλιακού αποστακτήρα.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον, γιατί χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας τον ήλιο. Είναι προφανές ότι η ηλιακή ενέργεια είναι μια απίτις πιο αξιόπιστες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, ειδικά όσον αφορά στην χώρα μας. Διατίθεται σε άφθονες ποσότητες, δωρεάν και είναι φιλική προς το περιβάλλον.

Επίπλέον, οι ηλιακοί αποστακτήρες παρουσιάζουν ιδιαίτερα ευνοϊκά χαρακτηριστικά για την τοποθέτησή τους σε περιοχές άγονες, ορεινές και απόμακρες. Για το λόγο αυτό μελετάται η ηλιακή απόσταξη ως ιδανική λύση για μια νησιωτική περιοχή όπως η νήσος Νάξος, για την οποία γίνεται θεωρητική εφαρμογή της μεθόδου στην παρούσα εργασία

## **ABSTRACT**

The problem of lack of drinking water in our planet, due to its constantly increasing demand, as a cause of the rapid population growth and of its overconsumption in the developed countries, its contamination due to the industrial effluents and waste and the prolonged draught in some areas, leads to the major problem of water shortage.

The object of this thesis is to present the technical methods of producing drinking water, through the process of desalination of sea water or brackish water, which eventually is allocated in inexhaustible quantities for the needs of the planet.

This thesis mainly focuses in the method of water desalination by using the sun as a source of energy. It's about the method of solar distillation, which takes place with the help of the solar distillator.

This method has distinctive scientific interest, because it uses the sun as the energy source. Obviously, solar energy is one of the most reliable forms of renewable energy, especially as far as it concerns our country. It is allocated in generous quantities, for free and it is friendly to the environment.

Moreover, solar distillators show special favourable characteristics for their use in distant, mountainous, isolated regions. For this reason, solar distillation is considered as the ideal solution for an island region, like the island of Naxos, for which a theoretical application of the method is taking place in the present thesis.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ-1:ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

## 1.1 Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Το νερό χρησιμοποιείται ευρύτατα και για πολύ διαφορετικούς σκοπούς σε ποσότητες, που εξαρτώνται από μια σειρά παράγοντες, που έχουν σχέση με το γεωγραφικό χώρο που ζουν και το πολιτιστικό, το κοινωνικό και το οικονομικό επίπεδο των ομάδων που το χρησιμοποιούν. Έτσι, διακρίνουμε τις πιο κάτω χρήσεις :

1. Την οικιακή (πόσιμο, νερό καθαρισμού)
2. Την κοινοτική (πότισμα, πυρόσβεση, πλύση, υδάτινοι δρόμοι μεταφοράς)
3. Την βιομηχανική (ψύξη, παραγωγή)
4. Την γεωργική (άρδευση)

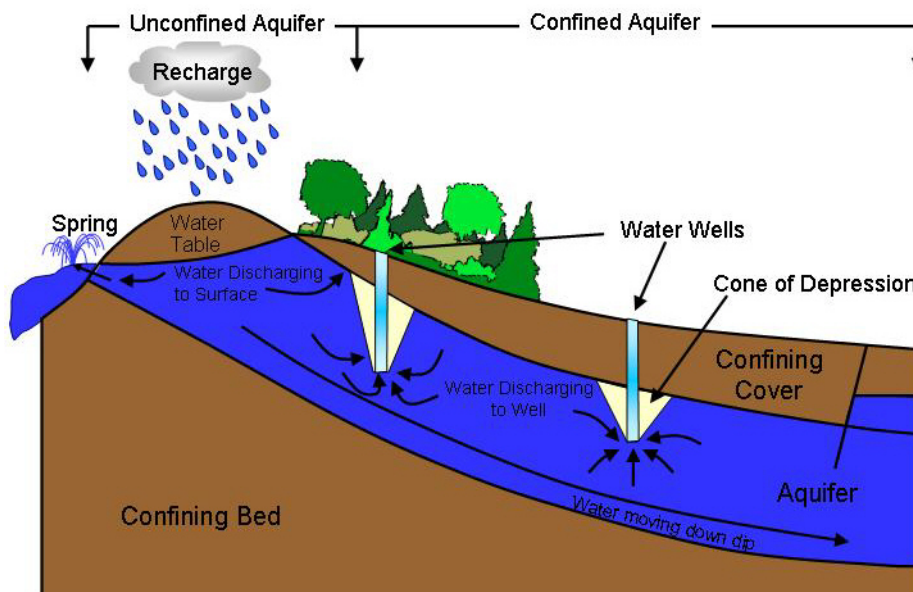
Η ποιότητα του χρησιμοποιούμενου νερού ποικίλλει κατά περίπτωση.

## 1.2 Ο ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Η παγκόσμια διαδικασία, που τροφοδοτεί και απομακρύνει το νερό από την επιφάνεια της γης ονομάζεται υδρολογικός κύκλος (**Σχήμα 1**). Το νερό μεταφέρεται στη γήινη ατμόσφαιρα με δύο τρόπους:

1. Εξάτμιση και
2. Διαπνοή

Η εξάτμιση πραγματοποιείται από όλες τις υδάτινες επιφάνειες και επιταχύνεται με την θερμοκρασία και με τα ρεύματα του αέρα. Καθώς ο υγρός αέρας ανυψώνεται, ψύχεται. Τελικά συγκεντρώνεται αρκετή υγρασία που καθώς ψύχεται αρκετά σχηματίζει μικρούς κρυστάλλους ή σταγονίδια επάνω σε μικροσκοπικά στερεά σωματίδια. Όταν το μέγεθός τους γίνει σημαντικό οι σταγόνες και το χιόνι γίνονται αρκετά βαριά και κατακρημνίζονται. Καθώς πέφτουν στην επιφάνεια της γης, οι σταγόνες είτε τρέχουν πάνω στο έδαφος και συγκεντρώνονται σε ρεύματα και ποτάμια, είτε διεισδύουν στο έδαφος και σχηματίζουν τα υπόγεια ύδατα .



Σχήμα 1.1. Ο ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

### 1.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Αμέσως μετά την κατακρήμνιση, ένα μέρος του νερού εξατμίζεται, ένα μέρος διηθείται στο έδαφος, ένα μέρος διαβρέχει την επιφάνεια και ένα μέρος εγκλωβίζεται σε επιφανειακούς θύλακες. Το υπόλοιπο ρέει προς τα πλησιέστερα ποτάμια ή λίμνες .

### 1.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Το στρώμα του εδάφους, που βρίσκεται πλησιέστερα στην επιφάνεια, χαρακτηρίζεται ως μη κορεσμένη ζώνη, και το νερό που βρίσκεται σ' αυτό αποτελεί το επιφανειακό νερό. Μέσα στο έδαφος και κάτω από την μη κορεσμένη ζώνη το νερό σχηματίζει τον υδάτινο ορίζοντα, καθώς περνώντας κάτω από την ριζική ζώνη πληρώνει όλα τα κενά του υπεδάφους. Το νερό που ρέει υπόγεια ανάμεσα σε συμπαγή πετρώματα σχηματίζει τους αρτεσιανούς υδάτινους όγκους, που βρίσκονται υπό πίεση.

### 1.5 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Πηγές ρύπανσης των υπογείων υδάτων από χημικά είναι κυρίως η βιομηχανία και οι αγροτικές δραστηριότητες. Οι χημικές ουσίες καταλήγουν στα υπόγεια νερά μέσω πέντε διαδρομών.

Διαστάλαξη από τα μη επενδυμένα τοιχώματα των φρεάτων χώνευσης.

Ακατάλληλη κάλυψη εδαφικών επιφανειών.

Ακατάλληλη επιφανειακή και υπεδάφεια απόθεση.

Διαρροές σε σωληνώσεις, συσκευές διαδικασιών και δοχεία αποθήκευσης.

Απώλειες υλικών εξ αιτίας ατυχημάτων.

Το νερό μεταφέρει τους ρυπαντές, που είναι διαλυμένοι σ' αυτό προς, δια μέσου και έξω από τη μη κορεσμένη ζώνη, καθώς μπορεί να απομακρυνθεί από το έδαφος με εξάτμιση, διαπνοή, επιφανειακή διήθηση και διύλιση.

Από την μη κορεσμένη ζώνη το νερό και οι ρυπαντές περνούν στην κορεσμένη ζώνη, όπου ο ρυθμός ροής του νερού υπαγορεύεται από δύο θεμελιώδεις παράγοντες, το πορώδες και την διαπερατότητα του υπεδάφους.

Η μοίρα των χημικών ουσιών στα υπόγεια νερά καθορίζεται από φυσικοχημικές και βιολογικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος, όπως ρόφηση και εκρόφηση, επιφανειακή ατμοποίηση, βιοαποικοδόμηση και χημική αποικοδόμηση [3]. Περιπτώσεις εκτεταμένης ρύπανσης απαιτούν σχεδιασμό άμεσης αντιμετώπισης, που στηρίζεται στις ακόλουθες εναλλακτικές δράσεις:

- Έμμεσος καθαρισμός
- Επιτόπια κατεργασία
- Ανάσχεση ρύπανσης
- Άντληση και επιφανειακή κατεργασία

Σε περιπτώσεις, που τα υπόγεια νερά απαιτούν εξειδικευμένη ή οικονομικά ασύμφορη κατεργασία είναι μάλλον λογικό να εγκαταλειφθεί ο χώρος άντλησης. Η επιφανειακή κατεργασία περιλαμβάνει βιολογικές, χημικές, φυσικές (μεταξύ των οποίων και εξάτμιση) και θερμικές διεργασίες .

### 1.6 ΟΞΙΝΗ ΒΡΟΧΗ

Η μη μολυσμένη βροχή είναι κανονικά όξινη λόγω της διάλυσης του ατμοσφαιρικού διοξειδίου το άνθρακα. Το pH ισορροπίας του καθαρού νερού της βροχής είναι 5.6.

Το ενδιαφέρον γύρω από την όξινη βροχή σχετίζεται προς τις δυναμικές επιδράσεις της οξύτητας στην υδρόβια ζωή, στην καταστροφή της συγκομιδής και των δασών, και την καταστροφή των δομικών υλικών. Χαμηλές τιμές pH επηρεάζουν απ' ευθείας τα ψάρια μεταβάλλοντας τον αναπαραγωγικό κύκλο ή ελευθερώνοντας αδιάλυτο αλουμίνιο, που είναι τοξικό.

Είναι πιθανόν όξινα όμβρια νερά να εισέρχονται στα υπόγεια αποθέματα και να αυξάνουν την

διαλυτότητα τοξικών μετάλλων. Όξινα νερά μπορούν επίσης να διαλύουν μέταλλα, όπως μόλυβδο και χαλκό από θερμές και ψυχρές σωληνώσεις νερού. Είναι γνωστό ότι τα υπόγεια νερά συγκεντρώνονται πολύ αργά με διείσδυση των επιφανειακών υδάτων δια μέσου του χώματος και των πετρωμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα. Εάν τα υδάτινα νερά έχουν οξυνισθεί τότε εκείνες οι αστικές περιοχές, που υδροδοτούνται από υπόγεια νερά οφείλουν να κατεργασθούν το νερό με χημικές μεθόδους, ώστε να αποκτήσει αποδεκτές προδιαγραφές. Εξ' άλλου σε πολλές αγροτικές περιοχές το νερό, που αντλείται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα εμφανίζει αρκετές φορές και ρύπανση από μέταλλα διαλυτά σε οξέα, όπως μόλυβδο, χαλκό και ψευδάργυρο, που είναι ενδεχόμενο να έχουν παραληφθεί είτε από σωληνώσεις είτε από πετρώματα.

## 1.7 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Ατυχώς τα υγρά και στερεά απόβλητα των ανθρώπινων κοινοτήτων κατέχουν σε σημαντικό βαθμό την ικανότητα να μολύνουν το περιβάλλον. Στους πρωτόγονους πολιτισμούς η θεραπεία των προβλημάτων μόλυνσης ήταν η μετακίνηση της κοινότητας σε άλλη κατάλληλη για διαβίωση περιοχή. Στις σύγχρονες κοινωνίες αυτό είναι αδιανόητο και επομένως θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα τόσο για την προστασία του οικιστικού περιβάλλοντος, όσο και για την αναπλήρωσή του νερού, που καταναλίσκεται.

Το τελευταίο σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί πλήρως με χρήση των φυσικών διαθεσίμων και ως εκ τούτου αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την μερική ανακύκλωση του χρησιμοποιημένου νερού, μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ωστόσο η επεξεργασία BPT (best practicable technology) ή BAT (best available technology economically achievable) των υγρών αποβλήτων είναι έτσι κι' αλλιώς επιβεβλημένη πριν καταλήξουν σε κάποιον αποδέκτη. Περισσότερες από 21 κατηγορίες βιομηχανιών και 65 οικογένειες ρυπαντών, που περιλαμβάνουν τουλάχιστον 129 ειδικές ουσίες τίθενται κάτω από το καθεστώς αυτό, που προβλέπει όρια, κατευθυντήριες οδηγίες, και προδιαγραφές αποδόσεων και προκατεργασίας. Υπό αυτές τις συνθήκες το νερό που επιστρέφει στους αποδέκτες έχει βασικά τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό που τροφοδοτείται στην βιομηχανική μονάδα, ενώ πολλές φορές είναι καλλίτερο. Σ' αυτές τις περιπτώσεις κάποιες ποσότητες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν κατ' ευθείαν στη μονάδα (π.χ. νερό πλύσης). Η απαίτηση ανακύκλωσης όμως γενικά επιβάλλει πρόσθετες διαδικασίες, που αυξάνουν δραματικά το κόστος επεξεργασίας, εκτός και αν οι μέθοδοι προβλέπουν τη λειτουργία φυσικών συστημάτων μεγάλου συνήθως χρόνου παραμονής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ –2: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

### **ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

#### **2.1 Η ΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Μια πιθανή λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας, είναι η παραγωγή νερού με αφαλάτωση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού. Με τον όρο αφαλάτωση νοείται η διαδικασία απομάκρυνσης αλάτων από το νερό. Η αφαλάτωση βρήκε για πρώτη φορά εφαρμογή στον Μεσαίωνα για την παραγωγή γλυκού νερού σε ποντοπόρα πλοία. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούσαν ηλιακή ενέργεια ως πηγή θερμότητας. Ωστόσο, μέχρι τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα και παρά τη διαρκή βελτίωση της τεχνολογίας, η πρόοδος για την εφαρμογή της αφαλάτωσης σε βιομηχανική κλίμακα υπήρξε πολύ βραδεία. Το ενδιαφέρον για την αφαλάτωση αναζωπυρώθηκε τη δεκαετία του 30 στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. λόγω της μεγάλης ξηρασίας που έπληξε την ευρύτερη περιοχή. Μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η ραγδαία αύξηση της ζήτησης καλής ποιότητας νερού στα μεγάλα αστικά κέντρα και η βιομηχανική ανάπτυξη, ώθησαν προς την ανεύρεση νέων υδάτινων αποθεμάτων. Η ανάγκη όμως για ταυτόχρονη ανάπτυξη απόμακρων ή ημιέρημων περιοχών είχε ως αποτέλεσμα την προώθηση της αφαλάτωσης για την ύδρευση περιοχών που διέθεταν μόνο αλμυρά ή υφάλμυρα νερά.

Το 1995 η συνολική δυναμικότητα των μονάδων αφαλάτωσης, ήταν ίση προς 20m<sup>3</sup>/day, ενώ ο αριθμός των εγκαταστάσεων με δυναμικότητα άνω των 100m<sup>3</sup>/day ήταν μεγαλύτερος από 11,000. Το πυκνότερο δίκτυο μονάδων εντοπίζεται στις περιοχές του Περσικού Κόλπου, τη Σαουδική Αραβία και τα Αραβικά Εμιράτα.

#### **2.2 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η παρούσα ενεργειακή κατάσταση του πλανήτη έχει ως εξής: τα 2/3 της συνολικής παραγόμενης ενέργειας καταναλώνονται από το 1/5 του πληθυσμού του πλανήτη (ανεπτυγμένες χώρες), καθώς ο υπόλοιπος πληθυσμός, που αφορά κυρίως τις υπό ανάπτυξη χώρες αυξάνεται ραγδαία, προαναγγέλλοντας μεγάλη ενεργειακή ζήτηση. Καθώς οι ενεργειακές πηγές που χρησιμοποιούνται δεν είναι αστείρευτες, ίσως η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή δώσει μια λύση στην επερχόμενη ενεργειακή κρίση. Επιπλέον, οι παρούσες ενεργειακές πηγές (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο, βιομάζα, υδροηλεκτρική και πυρηνική ενέργεια) και τα απόβλητα από τη χρήση τους αποτελούν τον κύριο παράγοντα ρύπανσης του περιβάλλοντος, επιβαρύνοντάς το κατά 90%, ενώ η πιο «καθαρή ενεργειακή πηγή» από άποψη εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, που κυρίως επιβαρύνει την ατμόσφαιρα, είναι η ηλιακή (ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά στοιχεία). Παρόλο που το ποσό της ενέργειας που δέχεται η γη από τον ήλιο είναι τεράστιο, δεν είναι εξ'ολοκλήρου αξιοποιήσιμο για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί, παρόλο που η ηλιακή ενέργεια έχει ομαλή κατανομή στην επιφάνεια της γης, έχει μικρή πυκνότητα ανά μονάδα επιφανείας, και είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί τόσο μεγάλη έκταση επιφάνειας ώστε να αξιοποιείται για την παραγωγή ενός ικανού ποσού ενέργειας. Ένα δεύτερο πρόβλημα στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι και η μεταβολή της έντασής της ανάλογα με την ώρα της ημέρας και τις διάφορες κλιματολογικές συνθήκες.

#### **2.3 Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Η Γη εκτείνεται σε επιφάνεια 510\*10<sup>12</sup> m<sup>2</sup>, εκ των οποίων τα 360\*10<sup>12</sup> m<sup>2</sup> αποτελούν τις υδάτινες επιφάνειες. Ο ολικός όγκος των αποθεμάτων νερού της Γης είναι 1.41\*10<sup>18</sup> m<sup>3</sup>, εκ των οποίων το 97% αποτελεί τις θάλασσες και τους ωκεανούς, ενώ το υπόλοιπο 3% είναι τα αποθέματα του υφάλμυρου ή γλυκού νερού. Από στατιστικές μελέτες, έχει προκύψει ότι μόνο το 0.75% αυτού υπάρχει σε υγρή μορφή και μόνο το 0.01% βρίσκεται στα ποτάμια και στις λίμνες, άμεσα προσιτό και στην διάθεσή μας.

Η εκρηκτική αύξηση του πληθυσμού των μεγάλων αστικών κέντρων σε συνδυασμό με το γενικό «πνεύμα υπερκατανάλωσης» που επικρατεί στη σύγχρονη εποχή και τις παρατεταμένες



περιόδους ξηρασίας λόγω των κλιματικών αλλαγών καθώς και τη μόλυνση των υδάτινων πόρων από τα βιομηχανικά λύματα και απόβλητα, έχει σαν αποτέλεσμα την μη επάρκεια του πόσιμου νερού που απομένει. Το πρόβλημα είναι περισσότερο αισθητό στις αναπτυσσόμενες χώρες καθώς και σε απόμακρες ορεινές και νησιωτικές περιοχές ανά τον κόσμο και πιο συγκεκριμένα στην χώρα μας.

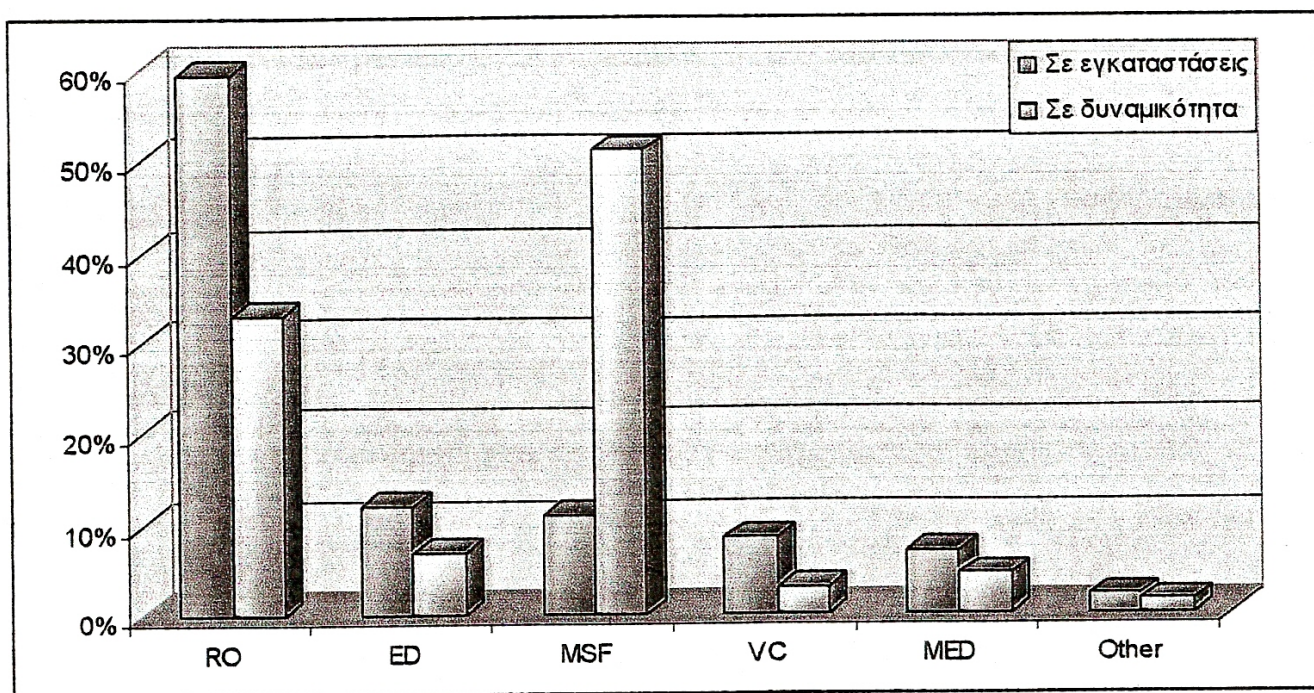
Από τα παραπάνω στοιχεία γίνεται φανερή η ανάγκη ανάπτυξης διαφόρων τεχνικών και διεργασιών επεξεργασίας του αλμυρού και υφάλμυρου νερού, που διατίθενται σε αφθονία για την μετατροπή του σε πόσιμο νερό και την κάλυψη των αναγκών, που προκύπτουν ανά περιοχή.

## 2.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Οι διεργασίες αφαλάτωσης γενικά διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Σε διεργασίες που περιλαμβάνουν αλλαγή φάσης (θερμικές διεργασίες). Οι ευρύτερα διαδεδομένες διεργασίες της κατηγορίας αυτής είναι η πολυβάθμια εκτόνωση, η πολυβάθμια απόσταξη, η μηχανική συμπίεση ατμών και η ηλιακή απόσταξη. Όλες οι παραπάνω χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού.
- Σε διεργασίες οι οποίες διεξάγονται σε μία και μόνο φάση. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η αντίστροφη ώσμωση και η ηλεκτροδιάλυση, οι οποίες χρησιμοποιούν μεμβράνες για την απομάκρυνση των αλάτων. Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται για αφαλάτωση μόνο υφάλμυρου νερού (1000 ως 11,000 ppm TDS) ενώ η αντίστροφη ώσμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αφαλάτωση τόσο υφάλμυρου όσο και θαλασσινού νερού (περίπου 35,000 ppm TDS).

Η κατανομή των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη διεργασία, δίνεται στο **Σχήμα 2.1**.



**Σχήμα 2.1-Κατανομή εγκαταστάσεων αφαλάτωσης**

Δύο κρίσιμες παράμετροι για τις διεργασίες της αφαλάτωσης είναι η ποιότητα του παραγόμενου νερού και η ενεργειακή κατανάλωση. Η ποιότητα του παραγόμενου νερού εξαρτάται από την ίδια την

διεργασία. Οι θερμικές διεργασίες που περιλαμβάνουν απόσταξη, παράγουν νερό με συγκέντρωση γύρω στα 20 ppm TDS. Αντίθετα οι διεργασίες μεμβρανών, σχεδιάζονται ούτως ώστε να



παράγουν νερό με συγκέντρωση 100-500ppm(συγκέντρωση διαλελυμένων αλάτων για πόσιμο νερό 500-1500 TDS). Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης.

## 2.5 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η αφαλάτωση είναι μια φυσική διεργασία διαχωρισμού των αλάτων από το νερό ή από υδατικά διαλύματα, ή αντίστροφα διαχωρισμού του νερού από το διάλυμα αλάτων.

Πρώτη ύλη για την τροφοδότηση μιας μονάδας αφαλάτωσης είναι το θαλασσίο (αλμυρό) νερό ή το υφάλμυρο νερό, η περιεκτικότητα των οποίων σε άλατα ξεπερνά το επιτρεπτό όριο για την κατανάλωση του από τον ανθρώπινο οργανισμό.

Ως πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται οι συμβατικές πηγές (πετρέλαιο, είδη ορυκτού άνθρακα, φυσικό αέριο) καθώς και η πυρηνική ενέργεια.Υπάρχουν και εναλλακτικές πηγές ενέργειας, οι οποίες κοστίζουν φθηνότερα και είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον.Δευτερογενώς μπορεί τέτοια να είναι η απορριπτόμενη ενέργεια από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η εκτός αιχμής ηλεκτρική ενέργεια ή ο απατμός διαφόρων βιομηχανιών(κυρίως από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος).Πρωτογενώς μπορεί να είναι η γεωθερμική ενέργεια και η ηλιακή ενέργεια.Οι δύο τελευταίες ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της φιλικότητας προς το περιβάλλον και γι'αυτό το λόγο παρουσιάζουν και επιστημονικό ενδιαφέρον.Λόγω όμως της επικρατέστερης στη χώρα μας ηλιακής ενέργειας, στην παρούσα εργασία αυτή θα αναπτυχθεί διεξοδικά.

## 2.6 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η ιστορία της αφαλάτωσης ξεκινά από πολύ παλιά.Οι πρώτες προσπάθειες για αφαλάτωση νερού είχαν γίνει από τους αρχαίους χρόνους έως και τον Μεσαίωνα, ενώ το 1675 κατατέθηκε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια συσκευή απόσταξης θαλασσινού νερού για παραγωγή πόσιμου νερού.Από τότε και ως τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η πρόοδος ήταν σχετικά αργή.Το ενδιαφέρον ξαφνικά έγινε έντονο μετά το τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου, όπου τα επόμενα χρόνια σημειώθηκε ραγδαία αύξηση και βελτίωση των τεχνικών και εφαρμογών αφαλάτωσης.Σήμερα λειτουργούν σε όλο τον κόσμο, περίπου 11070 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική παροχή, περίπου 20.300.000m<sup>3</sup>/day.[K. Wangnick, 1996]

## 2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Πολλές μέθοδοι αφαλάτωσης έχουν αναπτυχθεί ως τώρα, αρκετές από τις οποίες έχουν βρει μεγάλη εφαρμογή.Αυτές διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, στις θερμικές και στις μη θερμικές.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνολογίες αφαλάτωσης βασισμένες στη μέθοδο της εξάτμισης ή όπως εσφαλμένα έχει καθιερωθεί απόσταξης, με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει διεργασίες διύθισης μέσω μεμβρανών και απόσταξης, οδηγούμενες από ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι **μη θερμικές** μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

1. Η ηλεκτροδιάλυση (ED)
2. Η αντίστροφη ώσμωση (RO)
- 3 . Οι υβριδικές μέθοδοι
4. Η ψύξη

Οι **θερμικές** μέθοδοι είναι:

1. Η πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση Multi-stage flash distillation-MSF)
2. Η πολυβάθμια εξάτμιση (Multi effect distillation-MED)
3. Η μηχανική ή θερμική εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (Vapor compression, mechanical MVC,thermal-TVC)
4. Η ηλιακή απόσταξη

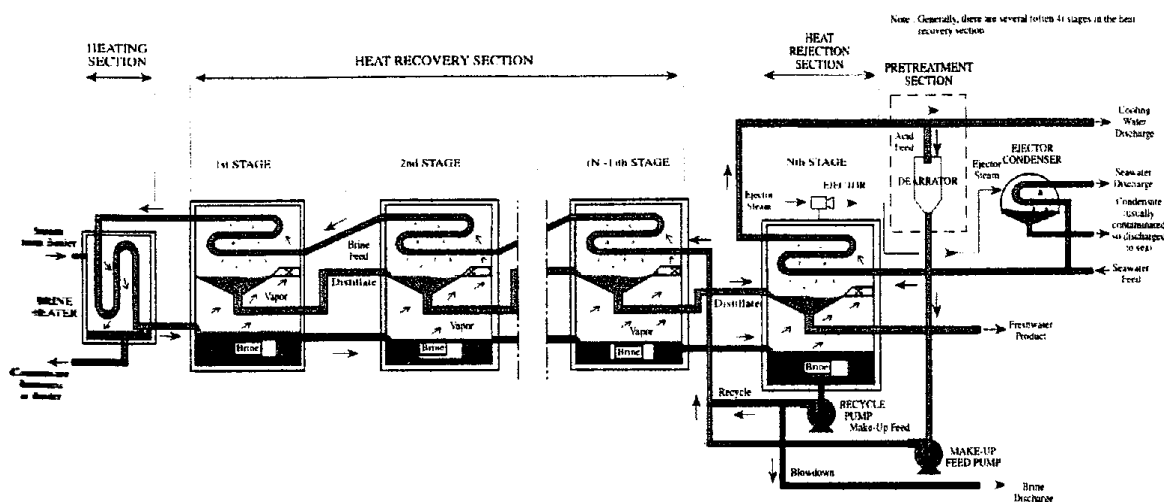
## 2.8 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

### 2.8.1 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗ (MULTISTAGE FLASH-MSF)

Η πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αφαλάτωσης (71% παγκοσμίως). Χρησιμοποιείται για μεγάλες παροχές (24000-31000m<sup>3</sup>/day) και εφαρμόζεται σε θαλάσσιο νερό. Έχει απαιτήσεις κατεργασίας παραγόμενου νερού και παρουσιάζει ευκολία στον σχηματισμό επικαθίσεων. Στην μέθοδο αυτή το προθερμασμένο αλμυρό νερό εισάγεται στον θάλαμο εξάτμισης, όπου επικρατεί χαμηλή πίεση με αποτέλεσμα τον απότομο βρασμό του. Ο παραγόμενος ατμός συμπυκνώνεται στην εξωτερική επιφάνεια σωληνών, μέσω των οποίων ρέει το αλμυρό νερό. Η διαδικασία γίνεται σε πολλές διαδοχικές βαθμίδες.

Στη διεργασία αυτή όπως και σε όλες τις θερμικές διεργασίες, το νερό της τροφοδοσίας θερμαίνεται παράγοντας ατμό, ο οποίος συμπυκνύμενος σχηματίζει καθαρό νερό. Το θαλασσινό νερό μετά την προεπεξεργασία, τροφοδοτείται μέσα από μια σειρά εναλλακτών που αυξάνουν την θερμοκρασία του σε θερμοκρασία ελάχιστα χαμηλότερη από το σημείο ζέσεως. Στη συνέχεια η τροφοδοσία εισέρχεται στο πρώτο στάδιο ανάκτησης, το οποίο λειτουργεί σε πίεση χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού παραάγωντας ατμό. Ο παραγόμενος ατμός περνά από τους εναλλάκτες, όπου συμπυκνώνεται αποδίδοντας θερμότητα που χρησιμοποιείται για την εξάτμιση της τροφοδοσίας. Η διαδικασία της εκτόνωσης και συμπύκνωσης επαναλαμβάνεται σε όλα τα στάδια της διεργασίας για τα ρεύματα της άλμης και του αποστάγματος, τα οποία λειτουργούν σε όλο και χαμηλότερες πιέσεις. Σε μεγάλες μονάδες μια ποσότητα άλμης αναμειγνύεται με το ρεύμα της τροφοδοσίας, ελαττώνοντας τις απώλειες θερμότητας και αυξάνοντας την απόδοση της διεργασίας. Σε μικρές μονάδες αντίθετα, η διεργασία απλοποιείται σημαντικά με την μη ανάκτηση θερμότητας, γεγονός όμως που μειώνει την ενεργειακή απόδοση.

Έχει απαιτήσεις κατεργασίας παραγόμενου νερού, ενώ δεν οδηγεί σε σημαντικές επικαθίσεις αλάτων. Στην μέθοδο αυτή το προθερμασμένο αλμυρό νερό, ρέει σε μορφή λεπτού στρώματος στην εξωτερική ή στην εσωτερική επιφάνεια οριζόντιων ή κατακόρυφων σωληνών, όπου θερμαίνεται και εξατμίζεται από την θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού που ρέει στην άλλη πλευρά των σωληνών. Η διαδικασία γίνεται σε πολλές διαδοχικές βαθμίδες



Σχήμα 2.2: : Πολυβάθμια Εκτόνωση

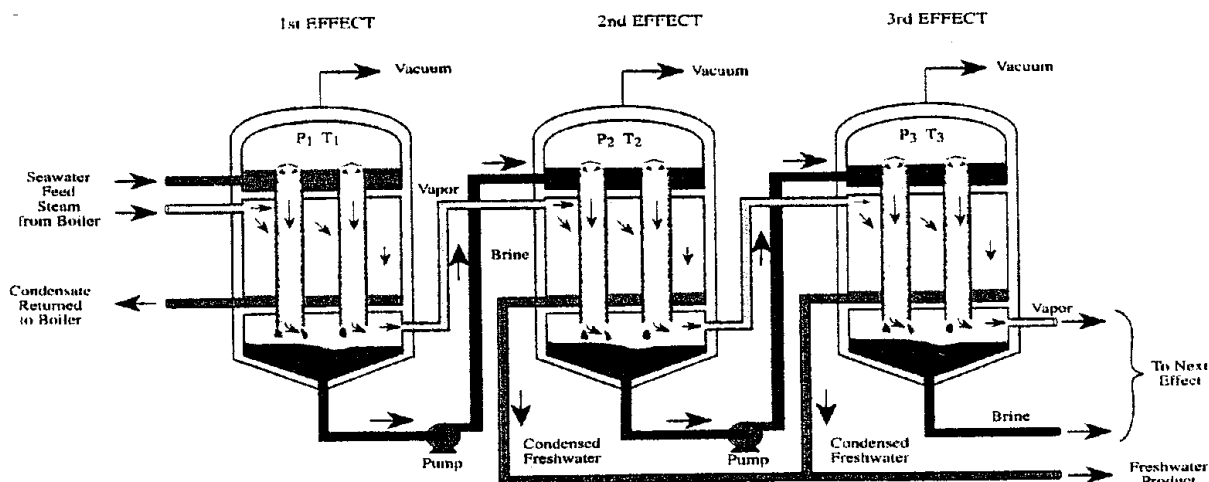
Το πάγιο αλλά και το ενεργειακό κόστος της διεργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Οι μεγαλύτερες απαιτήσεις είναι σε θερμική ενέργεια, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται βοηθητικά για την λειτουργία αντλιών. Για παράδειγμα σε μια εγκατάσταση που λειτουργεί με βαθμό απόδοσης<sub>13</sub>

(ποσότητα παραγόμενου νερού/ποσότητα καταναλισκόμενου ατμού) ίσο προς 0.8, η θερμική ενεργειακή απαίτηση είναι στα 260kJ/kg, ενώ οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 4 και 6 kWh/m<sup>3</sup>[2].

Η διεργασία βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή πόσιμου νερού κυρίως στις χώρες της Μέσης Ανατολής σε μονάδες μεγάλης κλίμακας με δυναμικότητα άνω των 5000m<sup>3</sup>/day. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση αφαλάτωσης που λειτουργεί με την συγκεκριμένη μέθοδο, έχει δυναμικότητα 60,000m<sup>3</sup>/day[2].

### 2.8.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΑΠΟΣΤΑΞΗ (MULTI EFFECT DISTILLATION -MED)

Στο πρώτο στάδιο της εξάτμισης με επανασυμπύεση ατμών, το εισερχόμενο θαλασσινό νερό θερμαίνεται μέχρι το σημείο βρασμού. Μια ποσότητα εξατμίζεται και ο παραγόμενος ατμός χρησιμοποιείται για την θέρμανση του υγρού που περνά στο δεύτερο στάδιο. Η τροφοδοσία του δεύτερου επιπέδου, το οποίο λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση, εξατμίζεται παράγοντας νέα ποσότητα ατμού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε όλα τα στάδια της διεργασίας. Η βασική διαφορά της MED από την MSF, είναι ότι στην πρώτη η μεγαλύτερη ποσότητα αποστάγματος παράγεται από εξάτμιση, ενώ στη δεύτερη το προϊόν παράγεται κυρίως με εκτόνωση.



Σχήμα 2.3 .Πολυβάθμια απόσταξη

Το κόστος της μονάδας εξαρτάται από τον επιθυμητό λόγο απόδοσης, με το πάγιο και το ενεργειακό κόστος να είναι εξίσου σημαντικά. Και πάλι η μέγιστη ενεργειακή απαίτηση είναι σε θερμική ενέργεια, ενώ η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή.

Η διεργασία βρίσκει κυρίως εφαρμογή στην βιομηχανία και για την παραγωγή αλατιού με απόσταξη του θαλασσινού νερού. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε μερικές μονάδες αφαλάτωσης, αλλά στην συνέχεια αντικαταστάθηκε από την MSF η οποία έχει χαμηλότερο κόστος, λιγότερα λειτουργικά προβλήματα και καλύτερη απόδοση. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να βρίσκει και πάλι εφαρμογή, ενώ έχουν γίνει και αρκετές βελτιώσεις στον σχεδιασμό της διεργασίας.

### 2.8.3 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΜΕ ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ (VAPOUR COMPRESSION-VC)

Η μηχανική ή θερμική εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών, χρησιμοποιείται για μεσαίες και σχετικά μικρές παροχές. Εφαρμόζεται σε θαλάσσιο νερό και έχει απαιτήσεις κατεργασίας παραγόμενου νερού και υψηλές και διαρκείς απαιτήσεις συντήρησης. Στην μέθοδο αυτή το προθερμασμένο αλμυρό νερό, ρέει σε μορφή λεπτού στρώματος στην εξωτερική ή την εσωτερική επιφάνεια σωλήνων, όπου εξατμίζεται από την θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού που ρέει στην άλλη πλευρά των σωλήνων. Ο παραγόμενος ατμός συμπιέζεται είτε με συμπιεστή (μηχανική συμπίεση) είτε με εκτοξευτήρα ατμού (θερμική συμπίεση) και οδηγείται στους σωλήνες, όπου στην άλλη πλευρά τους ρέει το αλμυρό νερό και συμπυκνώνεται.

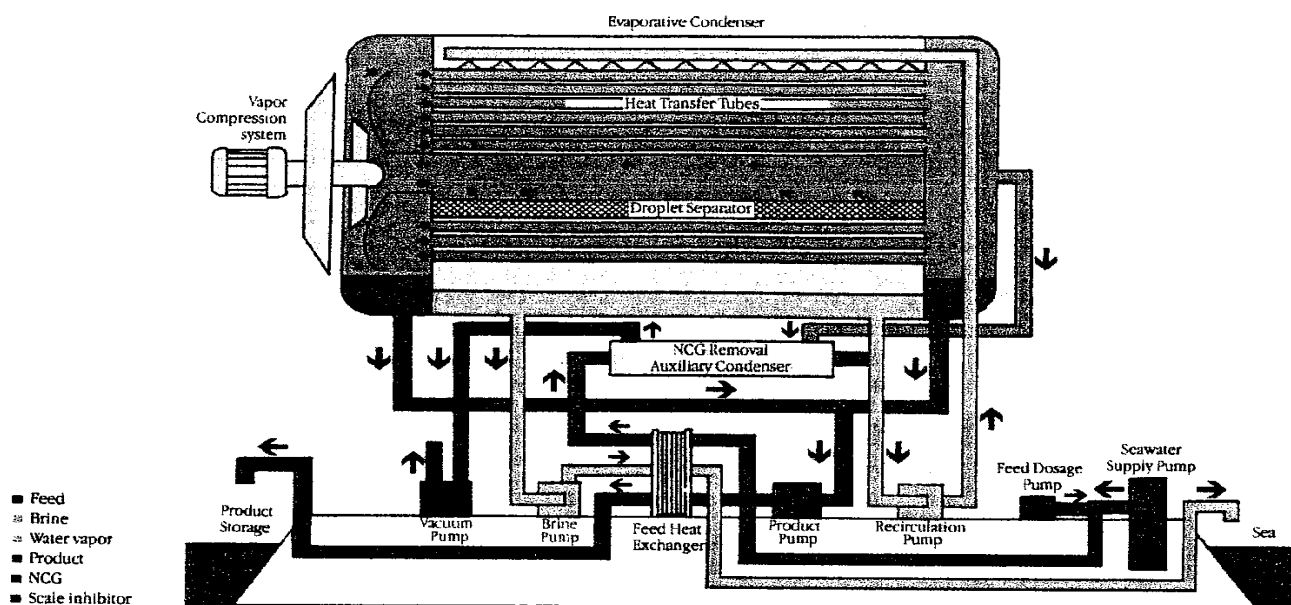
Είναι φανερό ότι οι μέθοδοι αυτές απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις τόσο για τη λειτουργία όσο και για την συντήρηση των συσκευών, ενώ έχουν συνεχή λειτουργικά κόστη. Το γεγονός όμως ότι χρησιμοποιούνται για μεσαίες έως πολύ μεγάλες παραγωγές νερού, τις έχουν αναδείξει κατάλληλες για εφαρμογές σε ανεπτυγμένες χώρες με μεγάλο πληθυσμό.

Αντίθετα στις ορεινές και απόμακρες περιοχές, στα νησιά ή σε χώρες του τρίτου κόσμου, η λειτουργία τέτοιων μεγάλων εγκαταστάσεων κρίνεται ασύμφορη. Εκεί ακριβώς η τεχνολογία των συστημάτων ηλιακής αφαλάτωσης με άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας, μπορεί και έχει βρει σημαντικές εφαρμογές. Στο γεγονός αυτό συμβάλλει στο ότι η ηλιακή ενέργεια αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με ότι αυτό σημαίνει και οι περίοδοι αυξημένης ζήτησης σε νερό συμπίπτουν με αυτές όπου έχει αυξημένη ηλιοφάνεια.

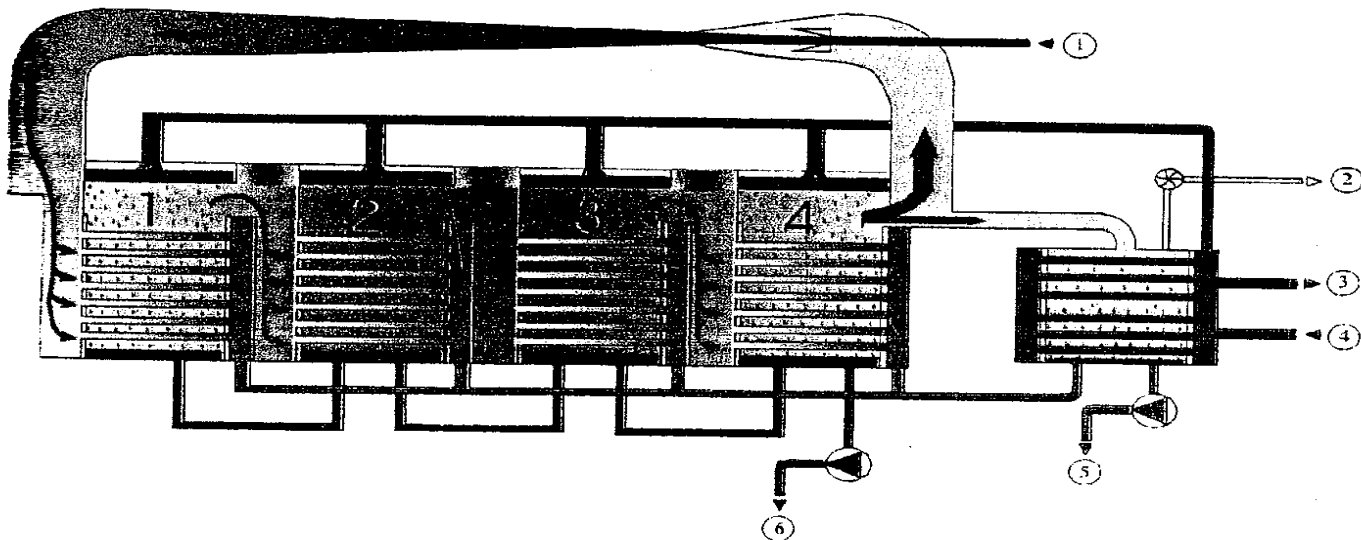
Στη διεργασία αυτή η τροφοδοσία αρχικά προθερμαίνεται από τα ρεύματα της άλμης και του προϊόντος και στη συνέχεια ακολουθεί η κυρίως θέρμανση με την απόρριψη θερμότητας από τον συμπιεστή. Ανάλογα με τον τύπο του συμπιεστή διακρίνονται δύο τύποι της διεργασίας:

- Η μηχανική συμπίεση **Σχήμα 2.4**
- Και η θερμική συμπίεση **Σχήμα 2.5**

Στη πράξη η θερμική συμπίεση μπορεί να εφαρμόζεται σε αρκετά μεγάλες μονάδες, ενώ το μέγεθος της μονάδας που μπορεί να εξυπηρετηθεί με μηχανική συμπίεση είναι μικρό λόγω χαμηλής δυναμικότητας του συμπιεστή. Και οι δύο τύποι διεργασίας βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή.



**Σχήμα 2.4: Μηχανική συμπίεση ατμών**



**Σχήμα 2 . 5: Θερμική συμπίεση ατμών (4 στάδια)**

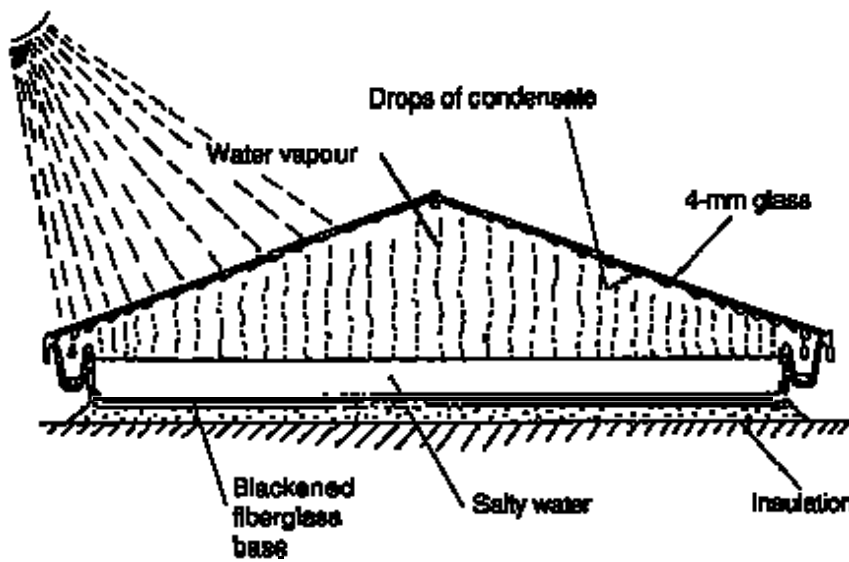
Το κόστος παραγωγής νερού καθορίζεται από το πάγιο και το ενεργειακό κόστος. Η κύρια ενεργειακή κατανάλωση εντοπίζεται στον συμπιεστή ατμού, του οποίου το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μπορεί να ανέλθει στο 50% του συνολικού ετήσιου κόστους της εγκατάστασης. Τα τελευταία χρόνια, η ενεργειακή κατανάλωση της διεργασίας έχει ελαττωθεί σημαντικά (από  $20 \text{ kWh/m}^3$ , κυμαίνεται πλέον μεταξύ 8 και  $12 \text{ kWh/m}^3$  [2]) ενώ υπάρχουν δυνατότητες και για μεγαλύτερες ενεργειακές αποδόσεις.

#### **2 .8.4 ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ (SOLAR DISTILLATION)**

Η ηλιακή απόσταξη, λαμβάνει χώρα εντός της συσκευής που καλείται ηλιακος αποστακτήρας. Ουσιαστικά, πρόκειται για την εξάτμιση του αλμυρού νερού που περιέχεται εντός αεροστεγούς χώρου, λόγω της θέρμανσης του νερού από τον ήλιο. Ακολουθεί συμπύκνωση των παραγόμενων ατμών στην εσωτερική πλευρά του διαφανούς καλύμματος του αεροστεγούς χώρου. Χαρακτηρίζεται από αρκετά χαμηλή παραγωγή νερού, υψηλό αρχικό κόστος, μηδαμινό κόστος λειτουργίας, απαίτηση μεγάλων εκτάσεων για εγκατάσταση και εξάρτηση από καιρικές συνθήκες.

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ηλιακών αποστακτών όμως, όπως ευκολία στην κατασκευή, χρήση διαθέσιμων υλικών για την κατασκευή τους, απλοϊκή λειτουργία τους, ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης και μη αναγκαιότητα ηλεκτρικής ενέργειας, τους καθιστούν ιδανική λύση για απομακρυσμένες περιοχές και για την τροφοδότηση μικρών κοινοτήτων.

Η ηλιακή απόσταξη είναι η απλούστερη διεργασία αφαλάτωσης και στηρίζεται στην αρχή λειτουργίας του θερμοκηπίου. Γυαλί και άλλα διαφανή υλικά έχουν την ιδιότητα να μεταδίδουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία χωρίς όμως να μεταδίδουν την υπέρυθη ακτινοβολία. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος περνά από το γυαλί στο αποστακτήριο όπου παγιδεύεται και εξατμίζει το νερό, το οποίο στην συνέχεια συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του γυαλιού και συλλέγεται ως απόσταγμα. Η κατασκευή της μονάδας είναι απλή, όπως επίσης απλή είναι και η λειτουργία της. Λόγω της χαμηλής απόδοσης όμως απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες.



Σχήμα 2.6: Ηλιακή απόσταξη

Το κόστος παραγωγής νερού, εξαρτάται από το κόστος κατασκευής και την απαιτούμενη επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό η διεργασία βρίσκει εφαρμογή σε μικρές μονάδες απομακρυσμένων περιοχών, όπου το κόστος γης είναι χαμηλό. Οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια είναι γενικά ελαχίστες.

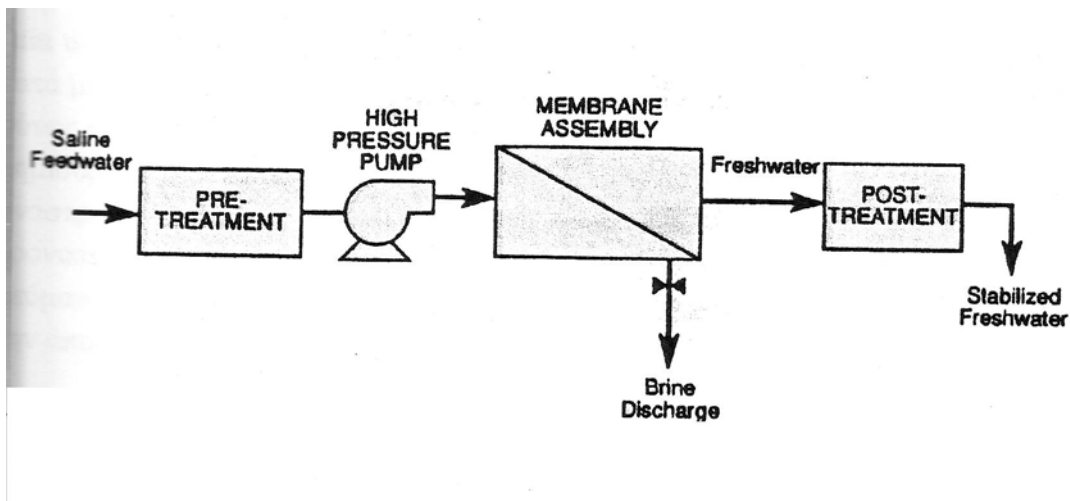
## 2.9 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

### 2.9.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ (REVERSE OSMOSIS-RO)

Η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO) εφαρμόστηκε από το 1962 για το υφάλμυρο νερό. Σε βιομηχανική κλίμακα εφαρμόστηκε από το 1970, μετά την βελτίωση των ημιπερατών μεμβρανών, για το θαλασσινό νερό. Η αντίστροφη ώσμωση λειτουργεί με κατανάλωση μηχανικής ενέργειας με μορφή πίεσης για τον διαχωρισμό

του νερού από τα περιεχόμενα άλατα, που ανέρχεται όπως και η ED σε  $12 \text{ kWh/m}^3$  και συνολικής ενέργειας λειτουργίας  $144 \text{ kJ/kg}$  (όπως και η ED) [8]. Σήμερα το 32,6 % των εγκαταστάσεων με δυναμικότητα 100 έως  $4000 \text{ m}^3/\text{d}$  και το 19,5% με δυναμικότητα μεγαλύτερη των  $4000 \text{ m}^3/\text{d}$  λειτουργεί με αντίστροφη ώσμωση.

Στην αντίστροφη ώσμωση η τροφοδοσία συμπιέζεται από αντλία υψηλής πίεσης και στην συνέχεια εξαναγκάζεται να περάσει μέσα από μία ημιπερατή μεμβράνη. Η απαιτούμενη πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού για να λάβει χώρα διαχωρισμός. Τυπικές πιέσεις για το θαλασσινό νερό κυμαίνονται από 50 ως 80 atm. Το νερό περνάει μέσα από τις μεμβράνες, διαδικασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση της μεγαλύτερης ποσότητας των διαλυμένων στερεών ενώ η απορριπτόμενη άλμη διαχωρίζεται από τις μεμβράνες ως ένα συμπυκνωμένο ρεύμα το οποίο βρίσκεται ακόμα σε υψηλή πίεση. Σε μεγάλες μονάδες υπάρχει σύστημα ανάκτησης ενέργειας από την άλμη.

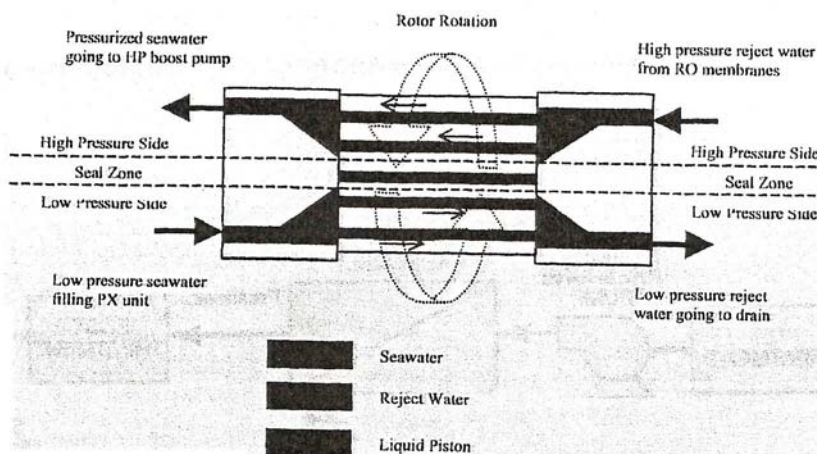


**Σχήμα 2.7: Αντίστροφη Ώσμωση (απλουστευμένο διάγραμμα)**

Επειδή η διεργασία λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δεν εμφανίζονται προβλήματα διάβρωσης και αποθέσεως. Απαραίτητη είναι όμως η προσεκτική προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας για την αποφυγή καταστροφής των μεμβρανών. Κατάλληλη επιλογή της μεθόδου προεπεξεργασίας και σωστή συντήρηση των μεμβρανών είναι γενικά απαραίτητη για την απρόσκοπτη λειτουργία της μονάδας.

Μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης έχει γενικά χαμηλό κόστος επένδυσης. Ωστόσο το κόστος συντήρησης είναι αρκετά αυξημένο λόγω της ανάγκης για αντικατάσταση των μεμβρανών. Η κύρια ενεργειακή κατανάλωση είναι στην αντλία υψηλής πίεσης και για συστήματα με ανάκτηση ενέργειας είναι περίπου ίση προς  $5 \text{ kWh/m}^3$ . Σε μικρές μονάδες ωστόσο που δεν υπάρχει σύστημα ανάκτησης ενέργειας από την άλμη η ενεργειακή κατανάλωση μπορεί να φτάσει μέχρι και τις  $15 \text{ kWh/m}^3$ . Τέλος η απαιτούμενη ενέργεια για υφάλμυρο νερό είναι πολύ χαμηλότερη και κυμαίνεται μεταξύ 1 και  $3 \text{ kWh/m}^3$ .

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την εξοικονόμηση ενέργειας. Ένα καινούριο σύστημα ανάκτησης ενέργειας με εναλλάκτη πίεσης, το οποίο αυτή τη στιγμή λειτουργεί σε πιλοτική κλίμακα στο Port Hueneme, έχει καταφέρει να μειώσει την απαιτούμενη ενέργεια για αφαλάτωση θαλασσινού νερού σε  $2 \text{ kWh/m}^3$  [3]. Η μονάδα λειτουργεί με λόγο ανάκτησης 36% και σε πίεση 700psi. Το διάγραμμα ροής του συστήματος ανάκτησης ενέργειας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.8**, ενώ ο **Πίνακας 2-2** δίνει τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων της πιλοτικής μονάδας



**Σχήμα 2.8: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης (Port Hueneme)**

**Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά ρευμάτων μονάδας αντίστροφης ώσμωσης (Port Hueneme)**

| ΡΕΥΜΑ                        | ΡΟΗ(GPM) | ΠΙΕΣΗ(psi) | TDS    |
|------------------------------|----------|------------|--------|
| Τροφοδοσία θαλασσινού νερού  | 24.5     | 15         | 32,020 |
| Είσοδος εναλλάκτη/τροφοδοσία | 15.0     | 15         | 32,020 |
| Έξοδος αντλίας υψηλής πίεσης | 9.5      | 690        | 32,020 |
| Έξοδος εναλλάκτη/τροφοδοσία  | 15.0     | 670        | 33,182 |
| Είσοδος RO                   | 24.5     | 690        | 32,724 |
| ΠΡΟΙΟΝ RO                    | 9.0      | 5          | 309    |
| Είσοδος εναλλάκτη/άλμη       | 15.5     | 680        | 46,271 |
| Έξοδος εναλλάκτη/άλμη        | 15.5     | 9          | 45,734 |

Μέσω του εναλλάκτη πίεσης είναι δυνατή η άμεση μεταφορά ενέργειας από το ρεύμα της άλμης σε αυτό της τροφοδοσίας, η οποία φτάνει το 95%. Το ρεύμα της άλμης και της τροφοδοσίας συνδέονται άμεσα, ωστόσο δεν αναμειγνύονται λόγω της κίνησης ενός πιστονιού, το οποίο μετακινείται μπρος-πίσω σε κάθε σωλήνα, εμποδίζοντας την ανάμιξη των δύο ρευμάτων. Επειδή ο εναλλάκτης πίεσης και η συνδεδεμένη με αυτόν αντλία χρησιμοποιούν το 100% περίπου της ροής της άλμης, το απαιτούμενο μέγεθος της αντλίας υψηλής πίεσης είναι μικρότερο απ' ό,τι στα τυπικά συστήματα.

Το σύστημα που αυτή τη στιγμή λειτουργεί σε πιλοτική κλίμακα θεωρείται ότι είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και σε συνηθισμένες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης, μειώνοντας σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος της οποίας φτάνει το 75% περίπου του λειτουργικού κόστους των σημερινών εγκαταστάσεων.

### 2.9.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ (ELECTRODIALYSIS-ED)

Πρωτοεμφανίστηκε σε βιομηχανική κλίμακα γύρω στα 1960. Μετά το 1973 εφαρμόστηκε εμπορικά, αφού προηγουμένως βελτιώθηκαν οι μεμβράνες ανταλλαγής ιόντων και η λειτουργία της διαδικασίας (αναστρεφόμενη ηλεκτροδιάλυση-Reversal Electrodialysis, ED)

Η μέθοδος συνίσταται στην απομάκρυνση των αλάτων από το νερό μέσα από κατάλληλες μεμβράνες με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης. Τα ανιόντα οδεύουν προς την άνοδο δια μέσου της πλησιέστερης μεμβράνης ανιόντων, ενώ τα κατιόντα οδεύουν προς την κάθοδο δια μέσου της πλησιέστερης μεμβράνης κατιόντων. Στους αποκλεισμένους μεταξύ ανιονικών και κατιονικών μεμβρανών χώρους δημιουργούνται πυκνά ή αραιά ιοντικά διαλύματα, που απομακρύνονται, καθ' όσον τα μεν ανιόντα δεν μπορούν να οδεύσουν μέσω των κατιοντικών μεμβρανών, τα δε κατιόντα δεν μπορούν να οδεύσουν μέσω των ανιονικών μεμβρανών.

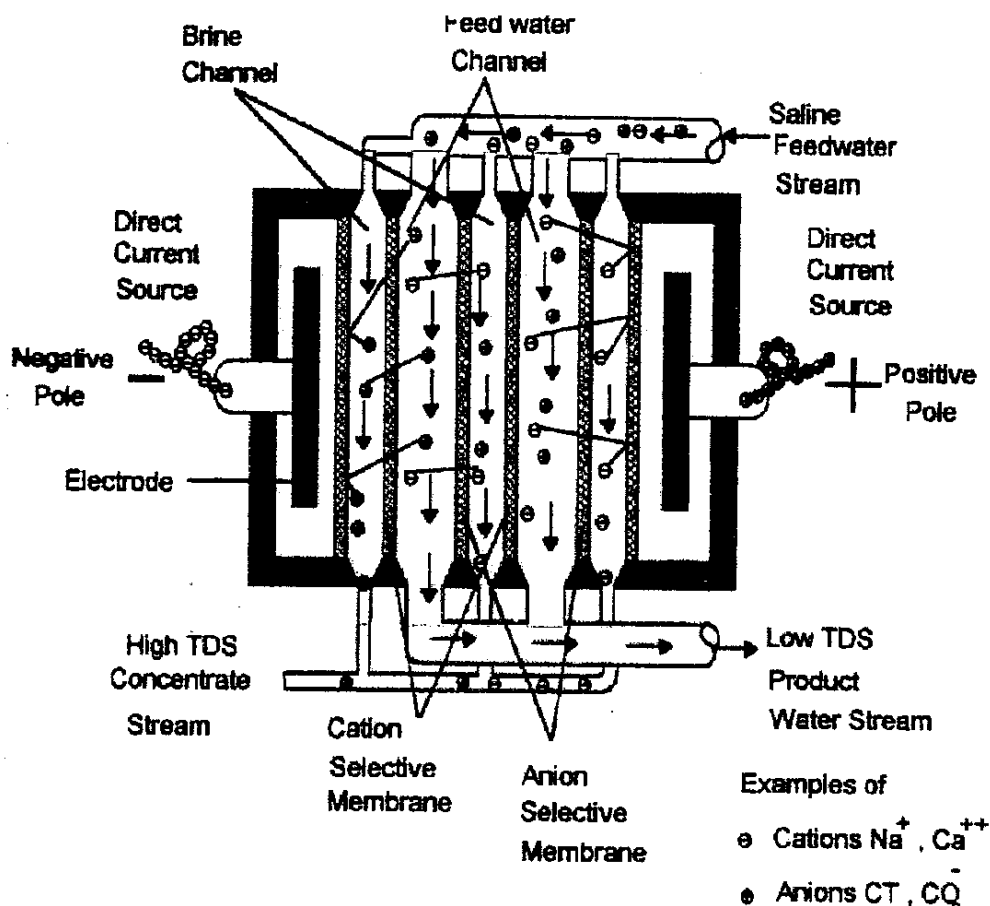
Η αναστρεφόμενη ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιεί συνεχή τάση, της οποίας η πολικότητα αντιστρέφεται τρεις ή τέσσερις φορές ανά ώρα, πράγμα που επιτρέπει την απομάκρυνση από την επιφάνεια των μεμβρανών αποθέσεις αλάτων και οργανικών υλικών.

Η μηχανική ενέργεια για την λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας ανέρχεται σε 12 kWh/m<sup>3</sup>, ενώ η συνολικά απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας συναγωνίζεται εκείνη της εξάτμισης (ME 144 kJ/kg) [8]. Αντιπροσωπεύει σήμερα το 2,3% της παραγωγής<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού για εγκαταστάσεις που έχουν δυναμικότητα μεγαλύτερη από 4000 m<sup>3</sup>/d και το 5,7% για εκείνες με δυναμικότητα από 100 έως 4000 m<sup>3</sup>/d .

Στην ηλεκτροδιάλυση η τροφοδοσία διέρχεται ανάμεσα από ένα ζεύγος μεμβρανών (μια ανιοντική και μια κατιοντική μεμβράνη) ενώ ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος αυτών. Ανάμεσα σε κάθε



ζεύγος μεμβρανών αφήνεται ένα κενό διάστημα ώστε να επιτρέπεται η ροή της τροφοδοσίας κατά μήκος της μεμβράνης και να δημιουργείται τυρβώδης ροή. Μια βελτιωμένη έκδοση της διεργασίας είναι η ανάστροφη ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal) κατά την οποία σε ορισμένα χρονικά διαστήματα αναστρέφεται η πολικότητα του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η χρήση χημικών πρόσθετων για την αποφυγή της πόλωσης.



Σχήμα 2.9: Ηλεκτροδιάλυση

Γενικά η ED είναι μια οικονομικά ανταγωνιστική διεργασία για την αφαλάτωση νερού μικρής αλμυρότητας. Η ανάστροφη ηλεκτροδιάλυση έχει υψηλότερο κόστος εγκατάστασης από τη συμβατική, αλλά το κόστος προεπεξεργασίας της τροφοδοσίας για την πρώτη είναι σχεδόν αμελητέο. Για συγκέντρωση του προϊόντος 500ppm TDS, η ολική ενεργειακή κατανάλωση (θερμοκρασία περιβάλλοντος) κυμαίνεται μεταξύ 1.5 και 4 kWh/m<sup>3</sup> για συγκέντρωση τροφοδοσίας ίση προς 1500 και 3500ppm TDS αντίστοιχα. Η ενέργεια που καταναλώνεται για άντληση είναι ελάχιστη.

### 2.9.3 ΨΥΞΗ

Η μέθοδος ψύξης (Freezing Process) είναι μια απλή σχετικά μέθοδος αφαλάτωσης. Βασίζεται στην απομάκρυνση των αλάτων από το νερό που στερεοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες (μειωμένη διαλυτότητα αλάτων στον πάγο).

Η μέθοδος δεν έχει επιτυχία λόγω της αδυναμίας σχηματισμού μεγάλων κρυστάλλων πάγου. Οι λεπτοί κρύσταλλοι πάγου συγκρατούν στην επιφάνειά τους άλατα και η απομάκρυνσή τους απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού.

Από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν η ενεργειακά βέλτιστη είναι η RO και η ME. Μία σύγκριση του κόστους των εγκαταστάσεων μιας μονάδας αφαλάτωσης και του κόστους κατεργασίας αποδεικνύει, ότι η φθηνότερη είναι η μέθοδος ME.

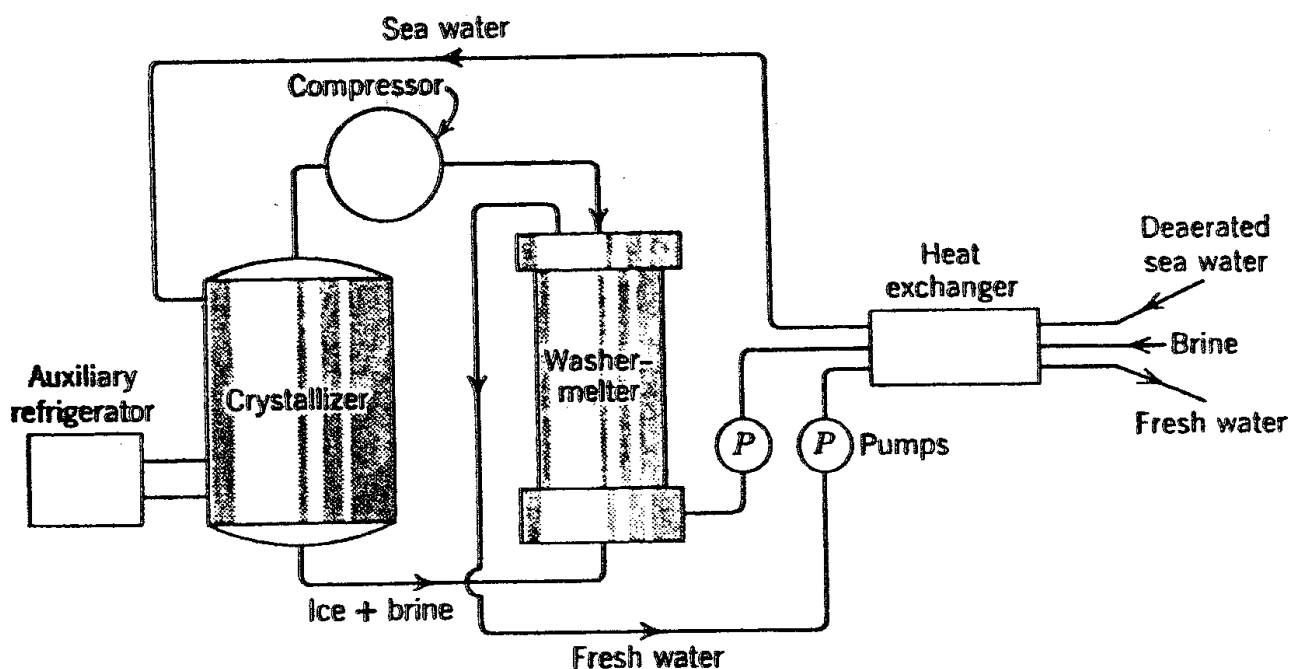
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι κρύσταλλοι του πάγου, που σχηματίζονται όταν παγώνει το θαλασσινό νερό είναι σχεδόν πλήρως απαλλαγμένοι από ίχνη άλατος. Σε αντίθεση με τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης, όπου η αφαλάτωση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, εδώ οι θερμοκρασίες πρέπει να είναι πολύ χαμηλές έτσι ώστε να σχηματιστεί πάγος. Πρέπει λοιπόν το σύστημα να προστατευθεί θερμικά, ώστε να μην ανέβει η θερμοκρασία του, ενώ σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους που πρέπει να καθαρίσουν μόνο ατμό και υγρό, εδώ ο καθαρισμός γίνεται σε πάγο, κάτι που είναι πολύ πιο δύσκολο. Από την άλλη η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας απαγορεύει τη δημιουργία επικαθίσεων και προστατεύει από την διάβρωση.

Η μέθοδος αποτελείται από δύο υποκατηγορίες:

- Άμεσης κατάψυξης
- Έμμεσης κατάψυξης

### 2.9.3.1 ΑΜΕΣΗ ΚΑΤΑΨΥΞΗ

Η αρχή λειτουργίας αυτής της διαδικασίας φαίνεται στο **Σχήμα 2.10**. Θαλασσινό νερό προψύχεται με αναταλλαγή θερμότητας και εισέρχεται μέσα σε πύργο παγοποίησης (crystallizer), όπου επικρατεί πολύ χαμηλή πίεση της τάξης των 0.005atm. Γρήγορη εξάτμιση συμβαίνει. Επειδή χρειάζεται θερμότητα για να συντηρηθεί η διαδικασία και επειδή ο πύργος είναι θερμικά μονωμένος, το θαλασσινό νερό τελικά παγώνει. Δηλαδή διαχωρίζεται σε ατμό και πάγο.



Σχήμα 2.10. Άμεση κατάψυξη

### 2.9.3.2 ΕΜΕΣΗ ΚΑΤΑΨΥΞΗ

Η πιο βασική διαφορά σε σχέση με την άμεσο είναι ότι εδώ το ψυκτικό μέσο δεν είναι νερό, αλλά κάποιο άλλο μέσο το οποίο έχει πολύ πιο υψηλή πίεση ατμού από ότι το νερό. Φυσικά το ψυκτικό μέσο πρέπει να είναι αδιάλυτο στο νερό, έτσι ώστε να είναι εύκολος ο διαχωρισμός τους. Ένα τέτοιο υγρό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο είναι το βουτάνιο.

## 2.9.4 ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΙΟΝΤΩΝ

Νερό οδηγείται από μια στήλη, η οποία περιέχει την ενεργή μορφή ενόστερεού κατιόντος, το οποίο είναι μια οργανική ρητίνη που περιέχει υδρογονοκατιόντα  $H^+$ . Στη συνέχεια το όξινο πλέον νερό περνάει σε μια άλλη στήλη, όπου γίνεται η ανταλλαγή των ανιόντων με ιόντα υδροξυλίου  $OH^-$ . Αυτά τα κατιόντα είναι δυνατόν να ανταλλαχθούν με τα θετικά και αρνητικά ιόντα του αλμυρού νερού. Εάν η ρητίνη και το νερό απλά αναμιγνύονταν σε μια δεξαμενή και δεν είχαμε την διέλευση του νερού μέσα από την στήλη, τότε η ανταλλαγή δεν θα ήταν πλήρης.

Με το πέρας της εργασίας μετά από μερικές ώρες είναι αναγκαίο να επαναφέρουμε τις ρητίνες στην αρχική τους μορφή. Αυτό γίνεται με την διέλευση διαλυμάτων οξέων μέτριας συγκέντρωσης. Τέλος οι ρητίνες ξεπλένονται και είναι έτοιμες για χρήση.

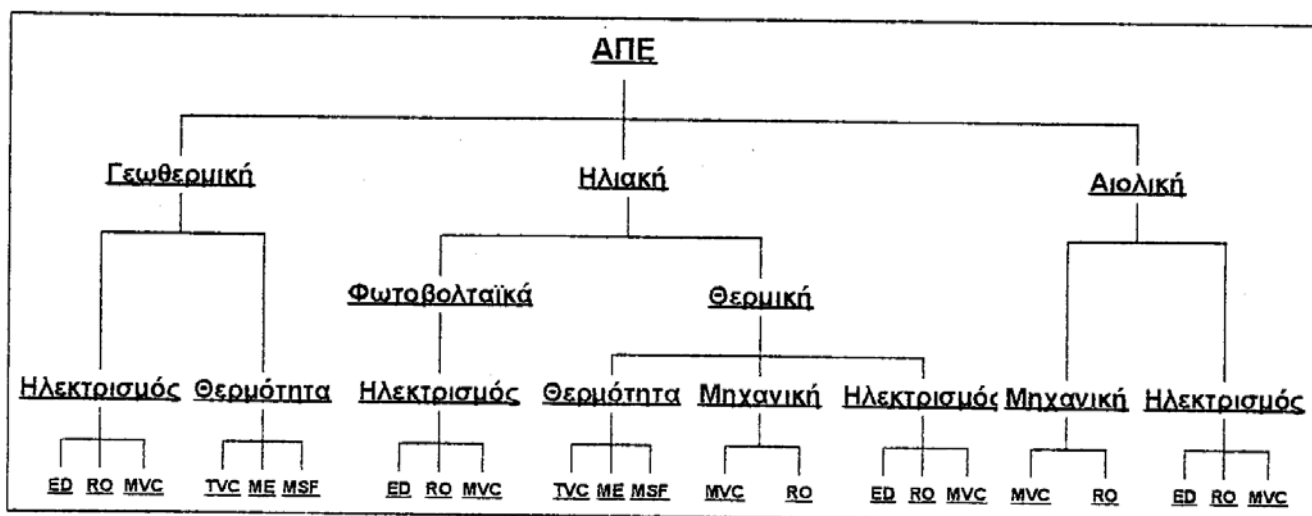
## 2.9.4 ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι υβριδικές μέθοδοι είναι συνδυασμοί διαφόρων μεθόδων από αυτές που αναφέρθηκαν με σκοπό την οικονομική λειτουργία των μονάδων. Βρίσκουν μόνο περιορισμένες εφαρμογές.

## 2.10 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όλες οι διεργασίες αφαλάτωσης θα μπορούσαν να τροφοδοτηθούν έμμεσα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέσω παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η άμεση χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για μονάδες μικρής ή μεσαίας δυναμικότητας είναι οικονομικά βιώσιμη, ιδιαίτερα σε άλυδρες και απομονωμένες περιοχές.

Ο συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μονάδων αφαλάτωσης, αποτελεί μια τεχνική πρόκληση, η οποία συνίσταται στο γεγονός ότι η τροφοδοσία από ανανεώσιμες πηγές δεν μπορεί να είναι συνεχής και στο υψηλό κόστος του όλου συστήματος μετατροπής. Από την άποψη της ενεργειακής τροφοδοσίας, υβριδικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν περισσότερες από μία πηγές ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν και σύστημα αποθήκευσης, μπορούν να σταθεροποιήσουν την απαιτούμενη ενέργεια για την μονάδα αφαλάτωσης. Ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις συστημάτων, όπου η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί μόνο όταν διατίθεται το απαιτούμενο ποσό ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι η επιλεγμένη τεχνολογία αφαλάτωσης λειτουργεί ικανοποιητικά παρά τις συχνές διακοπές. Οι συνηθέστεροι συνδυασμοί Α.Π.Ε. και διεργασιών αφαλάτωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.11: Συνδυασμοί διεργασιών αφαλάτωσης και Α.Π.Ε.

Ο συνδυασμός αντίστροφης ώσμωσης-αιολικής ενέργειας, αποτελεί μια δύσκολη επιλογή δεδομένου ότι η σταθερή ενεργειακή απαίτηση της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, πρέπει να συνδυαστεί με την έντονα μεταβαλλόμενη ισχύ που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες. Ωστόσο σε πολλές περιοχές το κόστος παραγωγής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με την ενέργεια του ηλεκτρικού δικτύου, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός να είναι προτιμητέος για μονάδες μικρής και μέσης δυναμικότητας.

Ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών-αντίστροφης ώσμωσης, προτιμάται για μικρές αυτόνομες μονάδες. Επειδή και οι δύο τεχνολογίες έχουν εφάμιλλη ωριμότητα, τα συστήματα αυτού του τύπου είναι αξιόπιστα, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και είναι εξαιρετικά για απομονωμένες περιοχές.

Οι θερμικές μέθοδοι απαιτούν μεγάλες ποσότητες θερμότητας που μπορούν να ληφθούν με εκμετάλλευση γεωθερμικής ή ηλιακής ενέργειας. Ο Πίνακας 2-2 δίνει τις ενεργειακές τιμές ενεργειακής κατανάλωσης για τις πιο συνηθισμένες διεργασίες αφαλάτωσης.

**Πίνακας 2-2: Ενεργειακή κατανάλωση διεργασιών αφαλάτωσης**

| <b>ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ</b>                           | <b>ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ</b>            | <b>ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ<br/>(KJ/kg προϊόντος)</b> | <b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ<br/>(kWh/m<sup>3</sup> προϊόντος)</b> |
|---|-----------------------------|--|---|
| <b>Θαλασσινό νερό</b>                       | MSF                         | 190 – 290                              | 4 – 6   |
|   | MED                         | 150 – 290                              | 2.5 – 3   |
|   | VC                          | -                                      | 8 – 12  |
|   | RO με ανάκτηση ενέργειας    | -                                      | 4 – 6   |
|   | RO χωρίς ανάκτηση ενέργειας | -                                      | 13 – 15   |
| <b>Υφάλιμο νερό<br/>(1500-3500 ppm TDS)</b> | RO                          | -                                      | 1 – 3   |
|   | ED                          | -                                      | 1.5 – 4   |

Γενικά, η κατάλληλη επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού διεργασίας αφαλάτωσης-ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

**Δυναμικότητα της μονάδας:** Οι MSF και MED χρησιμοποιούνται συνήθως σε μονάδες μεγάλων δυναμικοτήτων λόγω των οικονομιών κλίμακας. Οι MVC και TVC χρησιμοποιούνται σε μεσαίες και μικρές μονάδες, ενώ αντίθετα οι διεργασίες μεμβρανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλο το εύρος δυναμικοτήτων. Λόγω της μεγάλης απαιτούμενης επιφάνειας, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να τροφοδοτήσει μόνο μικρές και μεσαίες μονάδες. Αντίθετα μονάδες με αιολική ενέργεια μπορούν να έχουν αρκετά υψηλή δυναμικότητα. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε μονάδες θερμικών διεργασιών ανεξάρτητα από τη δυναμικότητα.

**Δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας:** Η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί στον τόπο εγκατάστασης επηρεάζει το ενεργειακό κόστος, το οποίο με την σειρά του καθορίζει και την βιωσιμότητα της μονάδας.

Ποιότητα νερού τροφοδοσίας: Οι μέθοδοι απόσταξης χρησιμοποιούνται συνήθως για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, επειδή η ενεργειακή κατανάλωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αλμυρότητα. Η αντίστροφη ώσμωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για αφαλάτωση είτε θαλασσινού είτε υφάλμυρου νερού λόγω της σημαντικής προόδου που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία μεμβρανών. Αντίθετα η ηλεκτροδιάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αφαλάτωση μόνο υφάλμυρου νερού, επειδή η ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται άμεσα με την συγκέντρωση αλάτων.

Ποιότητα παραγόμενου νερού: Γενικά οι θερμικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή απεσταγμένου νερού (λιγότερο από 10ppm TDS για βιομηχανική χρήση). Αντίθετα οι διεργασίες μεμβρανών, χρησιμοποιούνται για παραγωγή πόσιμου νερού (συγκέντρωση 300-500ppm TDS).

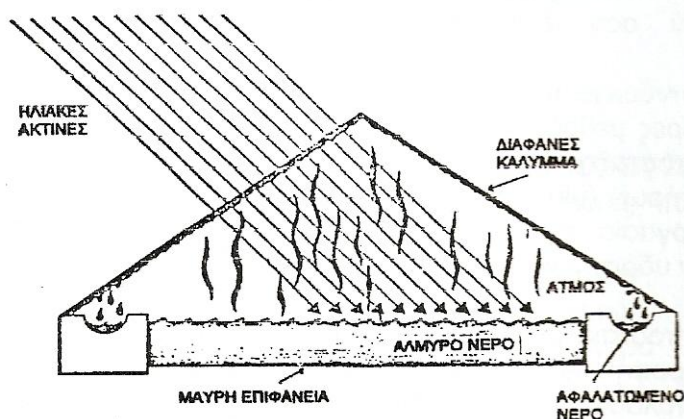
Απλότητα της διεργασίας: Όλες οι διεργασίες αφαλάτωσης χρειάζονται μια εμπειρία στον χειρισμό. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η τεχνολογία Α.Π.Ε. με το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για μικρές μονάδες σε απομονωμένες περιοχές.

Κόστος παραγωγής νερού: Το επενδυτικό και το λειτουργικό κόστος τόσο της μονάδας Α.Π.Ε., όσο και της μονάδας αφαλάτωσης πρέπει να εκτιμώνται ιδιαίτερα προσεκτικά. Γενικά οι θερμικές διεργασίες παρουσιάζουν υψηλότερα κόστη από τις διεργασίες μεμβρανών, ενώ το κόστος παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. εξαρτάται από το νεργειακό δυναμικό της περιοχής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ-3: Ο ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

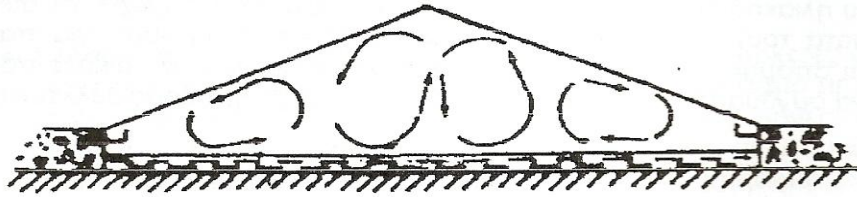
### 3.1 Ο ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ

Ο ηλιακός αποστακτήρας αποτελείται από έναν αεροστεγή χώρο (θάλαμο), στον οποίο λαμβάνει χώρα η εξάτμιση του αλμυρού νερού και η συμπύκνωση του σε αφαλατωμένο νερό, ταυτόχρονα (Σχήμα 3.1). Η ηλιακή ενέργεια διαπερνάει τον θάλαμο διαμέσου του διαφανούς καλύμματος και απορροφάται μερικώς από το αλμυρό νερό, το οποίο περιέχεται στη λεκάνη του αποστακτήρα. Ο πυθμένας της λεκάνης είναι μαύρος ή επικαλυμμένος με υλικό μαύρου χρώματος, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να απορροφάται κατά το μέγιστο.



Σχήμα 3.1. Ο ηλιακός αποστακτήρας μίας βαθμίδας

Σαν συνέπεια της διάταξης, το αλμυρό νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας του καλύμματος, αλλά χαμηλότερη της θερμοκρασίας βρασμού του. Στο μεταξύ, το μίγμα αέρα-ατμών στην επιφάνεια του αλμυρού νερού έχει υψηλότερη θερμοκρασία και χαμηλότερη πυκνότητα από το μίγμα αέρα-ατμού ακριβώς κάτω απ' το διαφανές κάλυμμα. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ρευμάτων μεταφοράς μεταξύ διαφανούς καλύμματος και επιφάνειας αλμυρού νερού (Σχήμα 3.2) με αποτέλεσμα τον σχηματισμό υδρατμών στην εσωτερική, ψυχρή πλευρά του διαφανούς καλύμματος, οι οποίοι στην συνέχεια συμπυκνώνονται σε αφαλατωμένο νερό. Αυτό λόγω της βαρύτητας ρέει στην εσωτερική πλευρά του διαφανούς καλύμματος και συλλέγεται στα συλλεκτικά αυλάκια.



**Σχήμα 3.2. Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του αποστακτήρα μίας βαθμίδας.**

Η διεργασία αυτή αναπτύσσεται στα λεπτά στρώματα στις δύο επιφάνειες αναταλλαγής θερμότητας, ενώ πρακτικά η υπόλοιπη μάζα του αέρα στον αεροστεγή χώρο δεν συμμετέχει στην διεργασία, επειδή η διάχυση και η αγωγή θερμότητας εκεί είναι αμελητέα. Όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας αλμυρού νερού και διαφανούς καλύμματος, τόσο πιο έντονη είναι η κυκλοφορία του μίγματος αέρα-ατμών.

Ο ηλιακός αποστακτήρας παρουσιάζει απώλειες κατά την λειτουργία του. Η ηλιακή ενέργεια διαπερνώντας το υλικό του διαφανούς καλύμματος, αντανακλάται μερικώς στην εξωτερική και στην εσωτερική πλευρά του (10%), ενώ ένα μικρό ποσοστό αυτής (5%) απορροφάται από το κάλυμμα. Σημαντικό ρόλο εδώ παίζει όχι μόνο το υλικό και το πάχος του καλύμματος, αλλά και η κλίση του. Το υπόλοιπο της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην μάζα του αλμυρού νερού, όπου ένα μικρό μέρος ανακλάται (5%), απορροφάται από το νερό καθώς και από τον πυθμένα της λεκάνης, απ' όπου το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας μεταδίδεται στο αλμυρό νερό. Ιδιαίτερο ρόλο παίζει το υλικό και ο τρόπος βαφής του πυθμένα. Ένα μικρότερο μέρος της απορροφούμενης θερμότητας, μεταφέρεται μέσω αγωγής από το υλικό της βάσης του αποστακτήρα στην γη (5%). Να σημειωθεί εδώ ότι παρατηρούνται απώλειες τόσο από τις άκρες του αποστακτήρα (5%), όσο και λόγω διαρροών (5%), οι οποίες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν διά της χρήσεως μονωτικών και στεγανοποιητικών υλικών.

Εκτός από την μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς, συμβαίνει και μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, η οποία πραγματοποιείται μεταξύ της επιφάνειας του αλμυρού νερού και του στρώματος συμπυκνώματος στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος. Η μεταδιδόμενη θερμότητα στο στρώμα συμπυκνώματος μέσω μεταφοράς και ακτινοβολίας, μεταφέρεται στο υλικό του καλύμματος και διαδίδεται μέσω αυτού στην εξωτερική πλευρά του. Από εκεί μέσω μεταφοράς και ακτινοβολίας μεταδίδεται στο περιβάλλον.

Ενώ οι περισσότερες απώλειες που αναφέρθηκαν είναι καθαρά απώλειες θερμότητας για τον αποστακτήρα, η μετάδοση θερμότητας από το διαφανές κάλυμμα στο περιβάλλον δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν καθαρή απώλεια., διότι είναι αναγκαία για την διατήρηση της κυκλικής θερμικής διεργασίας.

### **3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΕΡΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ**

Η παραγωγή των εγκαταστάσεων ηλιακής απόσταξης, εκφράζεται σαν ποσότητα παραγόμενου αφαλατωμένου νερού ανά ημέρα και μονάδα επιφάνειας λεκάνης. Η παραγωγή εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας, συνεπώς και από το γεωγραφικό πλάτος. Σε έναν καθορισμένο τόπο, εξαρτάται φυσικά από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και από την ώρα της ημέρας. Έτσι έχει μέγιστες τιμές τις ηλιόλουστες και ζεστές μέρες του καλοκαιριού και ελάχιστες τον χειμώνα.

Επειδή η ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι καθορισμένη (από την φύση), η παραγωγή μιας δεδομένης εγκατάστασης αυξάνει μόνο με την αύξηση της επιφάνειας του αποστακτήρα. Αυτό είναι χαρακτηριστικό που συμβαίνει μόνο στις εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης. Από πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις σε εγκαταστάσεις ηλιακών αποστακτήρων μιας βαθμίδας, η απολαβή τους κυμαίνεται συνήθως στο εύρος από  $1-2\text{lt}/\text{m}^2$  απορροφητικής επιφάνειας την ημέρα για την χειμερινή περίοδο και  $3-4\text{lt}/\text{m}^2$  για την θερινή περίοδο.

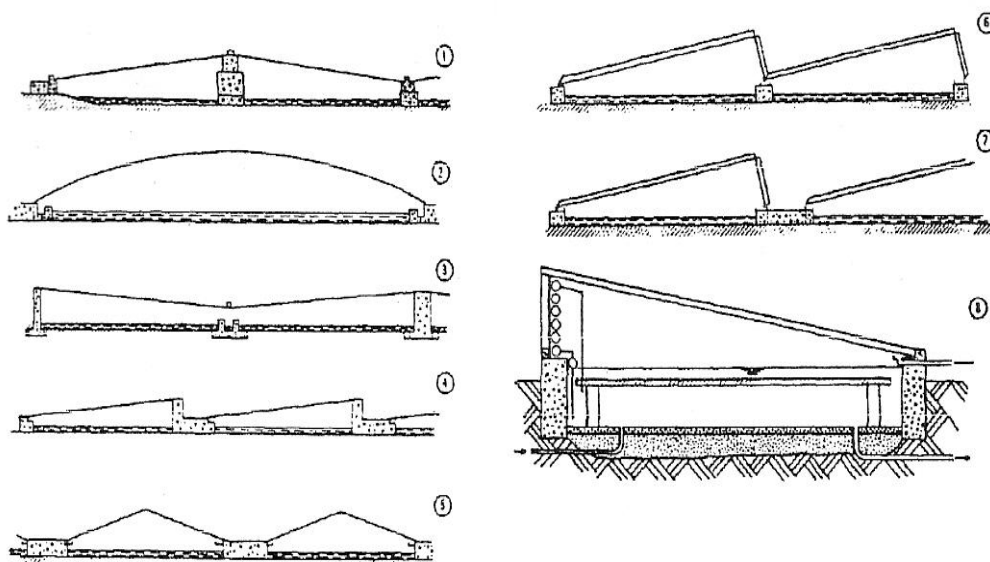
Η σχετικά χαμηλή παραγωγή νερού που παρουσιάζουν τα συστήματα ηλιακής απόσταξης, και κυρίως αυτά της μιας βαθμίδας, είναι το κυριότερο μειονέκτημά τους, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις.

Η απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα, ορίζεται σαν ο λόγος του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού προς την θεωρητική ποσότητα του αλμυρού νερού που εξατμίστηκε, ή αλλιώς σαν ο λόγος του αθροίσματος της ποσότητας που μεταφέρεται από το νερό στο κάλυμμα με εξάτμιση και συμπύκνωση προς την ολική ημερήσια ακτινοβολία που προσπίπτει στη συσκευή. Η απόδοση έχει διακυμάνσεις όπως και η απολαβή και βρίσκεται στο εύρος 25-40% τον χειμώνα και στο εύρος 30-60% τους μήνες υψηλής ακτινοβολίας, εξαρτώμενης φυσικά από τον σχεδιασμό, κατασκευή, περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες.

### 3.3 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ

Τα διάφορα συστήματα ηλιακής απόσταξης, διαφοροποιούνται ως προς την γεωμετρία τους, τα χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή τους και τις διάφορες τεχνικές για την αύξηση της απόδοσής τους.

Η απλούστερη μονάδα ηλιακής απόσταξης είναι ο ηλιακός αφαλατωτής μίας βαθμίδας, όπως περιγράφηκε παραπάνω, ο οποίος τοποθετείται είτε στο έδαφος είτε πάνω σε πλαίσιο. Σχηματικά διαγράμματα των βασικών τύπων ηλιακών αποστακτήρων που έχουν ως τώρα αναπτυχθεί και βρει πρακτική εφαρμογή, δίνονται στο **Σχήμα 3.3** [E. Delyannis, A. Delyannis, 1985], όπου η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στην γεωμετρία τους και ιδιαίτερα στο κάλυμμα, αλλά και στα χρησιμοποιούμενα υλικά.



Σχήμα 3.3. Βασικοί σχεδιασμοί ηλιακών αποστακτήρων



Το **Σχήμα 3.3.1** δείχνει το σχέδιο του Lóf και του Battelle Memorial Institute(Columbus Ohio) σύμφωνα με το οποίο κατασκευάστηκαν οι πειραματικές εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης στην Daytona Beach, και ελαφρά τροποποιημένες στο Las Marinas στην Ισπανία.Οι εγκαταστάσεις αυτές είχαν μία μόνο μεγάλη λεκάνη νερού, καλυμμένη από γυάλινα καλύμματα, τα οποία στηριζόταν στις δύο πλευρές τους σε προφτιαγμένα τμήματα –στηρίγματα μπετόν.Ο πυθμένας της λεκάνης ήταν καλυμμένος από επικάλυψη ασφάλτινου υλικού.Η λεκάνη γεμιζόταν και αδειάζόταν περιοδικά.

Τα **Σχήματα-3.3.2, 3.3.3 και 3.3.4** είναι οι ηλιακοί αποστακτήρες με πλαστικό κάλυμμα που εγκαταστάθηκαν στα ελληνικά νησιά.

Η πρώτη εγκατάσταση ηλιακής απόσταξης στην Ελλάδα έγινε το 1964 στην Σύμη.Σαν υλικό καλύμματος χρησιμοποιήθηκε πλαστικό (Tedlar film), το οποίο με την βοήθεια ελαφριάς υπερπίεσης στο εσωτερικό του αποστακτήρα, διατηρούνταν τεντωμένο(**Σχήμα 3.3.2.**, φουσκωτός πλαστικός τύπος).Ο αποστακτήρας αυτός παρουσίασε απώλειες πίεσης λόγω μη καλής στεγανότητας, ενώ είχε προβλήματα στις κακές καιρικές συνθήκες.

Έτσι ο σχεδιασμός αυτός διαμορφώθηκε στην Σύμη και σε εγκατάσταση στην Αίγινα το 1965.Το πλαστικό κάλυμμα διατηρούνταν σε μορφή V τεντωμένο απ'τίς δύο άκρες του, ενώ στην μέση είχε ένα βάρος (**Σχήμα 3.3.3**, πλαστικός τύπος σχήματος V).Το αφαλατωμένο νερό συγκεντρωνόταν σε ένα αυλάκι στο μέσον του αποστακτήρα.Όμως και αυτή η εγκατάσταση είχε προβλήματα, όπως την επικάθιση άμμου και σκόνης στο μέσον του καλύμματος.

Για τους λόγους αυτούς αποφασίστηκε η διαμόρφωση του σχεδιασμού, με πρόταση του καθηγητή κ .Α. Δεληγιάννη.Έτσι, στη νέα βελτιωμένη εγκατάσταση της Αίγινας (**Σχήμα 3.3.4**, τύπος κεκλιμένου πλαστικού καλύμματος), το πλαστικό κάλυμμα είχε κλίση μόνο από τη μία πλευρά και διατηρούνταν τεντωμένο με μηχανικό τρόπο.

Το **Σχήμα 3.3.5** δείχνει τον Αυστραλιανό τύπο (σχέδιο C.S.I.R.O.) σχεδιασμένο από τον Morse και Read.Ήταν μεμονωμένες δεξαμενές με γυάλινα καλύμματα με συμμετρική μορφή.Το πλάτος της δεξαμενής περιοριζόταν στα 90cm.Ο πυθμένας ήταν καλυμμένος με μαύρο φύλλο πολυαιθυλαίνιου, ενώ είχε ελαφριά κλίση.Τα δύο γυάλινα καλύμματα ακουμπούσαν στο κάτω μέρος τους αρχικά σε μεταλλικά στηρίγματα και αργότερα σε μπετόν, ενώ οι επάνω ακμές τους ακουμπούσαν και στηριζόταν με σιλικόνη.Η είσοδος και έξοδος του νερού γινόταν συνεχώς, ενώ ο στόχος ήταν η λειτουργία τους για πολύ χρόνο χωρίς επίβλεψη.Παρόμοιες εγκαταστάσεις συμμετρικού τύπου με διάφορες γεωμετρίες εγκαταστάθηκαν στην Χιλή, Ινδία και πρώην Σοβιετική Ένωση.

Παρόμοιος είναι και ο σχεδιασμός του Howe του University of California, Berkley, με την διαφορά ότι τα καλύμματα είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματίζουν κυματοειδή μορφή.Επιπλέον το πλάτος των λεκανών ήταν ανεξάρτητο από τις δεδομένες διαστάσεις του καλύμματος.Η λειτουργία τους ήταν μη συνεχόμενη.Διάφορες μικρές εγκαταστάσεις τοποθετήθηκαν στα νησιά Φίτζι και σε άλλα νησιά του Ειρηνικού Ωκεανού.

Το **Σχήμα 3.3.6**, δείχνει το σχέδιο του καθηγητή Α. Δεληγιάννη, σύμφωνα με το οποίο κατασκευάστηκαν οι μεγάλες εγκαταστάσεις στα ελληνικά νησιά (Πάτμο, Κίμωλο, Νίσυρο,Κεφαλλονιά, Ιθάκη, Μεγίστη).Ο σχεδιασμός προέβλεπε ασυμμετρικό κάλυμμα από γυαλί, ενώ ο σκελετός ήταν κατασκευασμένος από αλουμίνιο..Ο πυθμένας της λεκάνης ήταν καλυμμένος από μαύρο πλαστικό υλικό (butylkautsuk), το οποίο ήταν και το μόνο υλικό μη διαθέσιμο στην Ελλάδα.

Ο σχεδιασμός αυτός ελαφρά τροποποιημένος (**Σχήμα 3.3.7**), χρησιμοποιήθηκε στις δύο μεγάλες εγκαταστάσεις που λειτούργησαν στο Gwadar του Pakistan, σε ένα μικρό νησί της Ιαπωνίας και στο Porto-Santo της Πορτογαλίας

Όλες οι εγκαταστάσεις είχαν σχεδιαστεί και εγκατασταθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η συλλογή βροχής.Ο σχεδιασμός αυτός, ο οποίος εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα, αποδείχτηκε

από τους καλύτερους τρόπους για την αύξηση της ετήσιας απολαβής των ηλιακών αποστακτήρων.

Το **Σχήμα 3.3.8** δείχνει το σχέδιο του IPAT, το οποίο εγκαταστάθηκε στο Porto-Santo.Άρχισε να λειτουργεί το 1984 και βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία.Αποτελείται από δύο μονάδες του **Σχήματος 3.3.7** και δύο μονάδες του **Σχήματος 1.3.8**, ενώ τοποθετήθηκε πρόσθετος εναλλάκτης θερμότητας και επιφάνεια συμπύκνωσης για αύξηση της απολαβής.

Εκτός από τις παραπάνω εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης που αναφέρθηκαν, κατασκευάστηκαν διάφοροι άλλοι τύποι ηλιακών αποστακτήρων, μερικοί από τους οποίους βρήκαν

αξιοσημείωτη εφαρμογή για ειδικές εφαρμογές όπως η εγκατάσταση της ONERSOL στην Νιγηρία με παραγωγή  $5\text{lt}/\text{m}^2\text{d}$  για μπαταρίες αυτοκινήτων και για φαρμακευτικούς σκοπούς, καθώς και για σταθμούς διάσωσης. Επίσης το σύστημα της εταιρίας DORNIER SYSTEM GmbH, όπου υπήρχε διαχωρισμός των τμημάτων απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και αφαλάτωσης θαλάσσιου νερού. Εγκαταστάσεις έγιναν στην Ιορδανία, Μεξικό και Ινδονησία. Όμως τελικά η χρήση τεχνολογικά ανεπτυγμένων τμημάτων, όπως οι σωλήνες θερμότητας, δεν κρίθηκε συμφέρουσα.

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την κριτική ανασκόπηση των μοντέλων τα οποία έχουν αναπτυχθεί ως τώρα στον τομέα της ηλιακής απόσταξης.

#### **4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ-ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ**

##### **4.1.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Η λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα διέπεται από διάφορους τρόπους μεταφοράς μάζας και θερμότητας, εκ των οποίων η μετάδοση λόγω μεταφοράς και λόγω ακτινοβολίας είναι οι καθοριστικές, ενώ ένα μικρό ποσό ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ή στο έδαφος από μετάδοση λόγω αγωγής.

Για την μαθηματική περιγραφή των διαφόρων τρόπων μεταφοράς θερμότητας στον αποστακτήρα, είναι βολικό να χωριστούν αυτοί στις μεταδόσεις μάζας και θερμότητας εντός του αποστακτήρα (εσωτερικές μεταδόσεις) και στις μεταδόσεις μεταξύ του αποστακτήρα και του περιβάλλοντος (εξωτερικές μεταδόσεις).

Ωστόσο τονίζεται ότι το συνολικό θέμα των μεταδόσεων θερμότητας είναι ένα. Όμως ο διαχωρισμός των μεταδόσεων γίνεται, γιατί εντός του αποστακτήρα συμβαίνει μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς, ταυτόχρονα με μεταφορά μάζας λόγω εξάτμισης, ενώ έξω από τον αποστακτήρα συμβαίνει μόνο μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς. Παράλληλα και στις δύο περιπτώσεις, παρουσιάζεται μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Η μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς είναι η διεργασία κατά την οποία παρατηρείται μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός ρευστού που την περιβάλλει. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας περιγράφεται από την σχέση:

$$q = hA\Delta T \quad (4.1)$$

όπου  $h$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας,  $A$  το εμβαδόν επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας και  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και επιφάνειας.

Παρά το γεγονός ότι η εξίσωση 2.1 φαίνεται εξαιρετικά απλή, η δυσκολία στο πρόβλημα είναι η σωστή εκτίμηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας  $h$ , ο οποίος είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση των χαρακτηριστικών ροής του ρευστού, των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και της γεωμετρίας της επιφάνειας. Στις πιο πολλές πρακτικές εφαρμογές, οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας υπολογίζονται από εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες προέρχονται από την συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς, συνήθως θεωρείται σαν συνάρτηση τεσσάρων αδιάστατων παραμέτρων: του αριθμού Nusselt ( $Nu$ ), του αριθμού Grashof ( $Gr$ ), του αριθμού Reynolds ( $Re$ ) και του αριθμού Prandtl ( $Pr$ ). Οι εκφράσεις των αριθμών αυτών είναι:

$$\begin{aligned} Nu &= (h_{cw} x_i / k_f) & Gr &= (x_i^3 \rho_f^2 g \beta \Delta T / \mu_f^2) \\ & & & (4.2) \\ Re &= (\rho_f \theta_f x_i / \mu_f) & Pr &= (c_{pf} \mu_f / k_f) \end{aligned}$$

όπου το  $x_i$  στις εξισώσεις αυτές είναι η χαρακτηριστική διάσταση του συστήματος. Στην περίπτωση του ηλιακού αποστακτήρα είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του νερού και του γυάλινου καλύμματος.

## 4.1.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ

Η μετάδοση θερμότητας εντός του αποστακτήρα μεταξύ της επιφάνειας του αλμυρού νερού και του γυάλινου καλύμματος, χαρακτηρίζεται από μεταφορά θερμότητας, μεταφορά μάζας λόγω εξάτμισης και από ακτινοβολία.

### 4.1.2.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η θερμότητα μεταδίδεται μές της μάζας του υγρού αέρα εντός του αποστακτήρα με ελεύθερη μεταφορά. Η ελεύθερη μεταφορά του αέρα, προκαλείται από διαφορές της πυκνότητας του ρευστού πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του αλμυρού νερού και ακριβώς κάτω από την εσωτερική πλευρά του καλύμματος.

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας συνήθως περιέχεται στον αριθμό Nusselt, ο οποίος για την περίπτωση ελεύθερης μεταφοράς είναι συνάρτηση των αριθμών Grashof και Prandtl:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (4.3)$$

Για μετάδοση θερμότητας από οριζόντια, υδάτινη επιφάνεια προς τα επάνω, ο Jacob έδειξε την ακόλουθη σχέση, σχετίζοντας πειραματικά δεδομένα των Mull και Reiher:

$$Nu = C(Gr, Pr)^n \quad (4.4)$$

όπου οι τιμές των C και n είναι αντίστοιχα 1 και 0 για  $Gr < 10^3$   
0.21 και 0.25 για  $10^4 < Gr < 3.2 \cdot 10^5$   
και 0.75 και 0.33 για  $3.2 \cdot 10^5 < Gr < 10^7$

Στην πρώτη περίπτωση η μεταφορά είναι αμελητέα, στην δεύτερη η ροή είναι στρωτή και στην τρίτη είναι τυρβώδης. Ωστόσο έχει αποδειχτεί ότι οι τιμές αυτές δεν έχουν γενική εφαρμογή. Ισχύουν για: μέση θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 50°C και για αθερμοκρασιακή διαφορά ίση με 30°C

παράλληλες πλάκες ροή θερμότητας μόνο προς τα επάνω.

Οι Aggarway κ.α. [S. Aggarway κ.α., 1998], έδειξαν ότι οι τιμές αυτές ισχύουν και για θερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας 24-41 °C. Για άλλες όμως συνθήκες, και κυρίως στο θερμοκρασιακό εύρος 55-75 °C,

οι συντελεστές παίρνουν διαφορετικές τιμές, οι οποίες βρέθηκαν να είναι: C=0.105 και n=0.3074. Οι τιμές αυτές ισχύουν για τιμές Grashof όχι μεγαλύτερες από  $7.6 \cdot 10^6$ .

Οι Kumar κ.α. έδειξαν ότι στην περίπτωση του ηλιακού αποστακτήρα, οι συντελεστές C και n παίρνουν τις τιμές: C=0.0322 και n=0.4114 για  $1.794 \cdot 10^9 < Gr < 5.724 \cdot 10^6$

ενώ για ηλιακό αποστακτήρα συνδεδεμένο με ηλιακούς συλλέκτες, οι συντελεστές γίνονται:

C=0.0538 και n=0.383 για  $5.498 \cdot 10^9 < Gr < 9.128 \cdot 10^6$  [S. Kumar κ.α., 1996]

Οι Tiwari κ.α. προσδιόρισαν τους συντελεστές από πειράματα προσομοίωσης, σε εσωτερικό χώρο τους οποίους βρήκαν να είναι: C=0.0294 και n=0.376 [G.N. Tiwari κ.α., 1998]

Στην περίπτωση που υπάρχει μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς με ταυτόχρονη μεταφορά μάζας του ρευστού με μικρό μοριακό βάρος (π.χ. υδρατμός), χρησιμοποιείται ο ειδικός αριθμός Grashof  $Gr'$ . Έχει αποδειχθεί από τον Sharpley και Boelter [B.F. Sharpley και L.M.K. Boelter, 1938] ότι για μη ισόθερμη εξάτμιση ισχύει:

$$Gr' = \frac{x_i^3 \rho_f^2 g}{\mu_f^2} \left[ \frac{M_\infty T_o'}{M_o T_\infty} - 1 \right] \quad (4.5)$$

όπου το σύμβολο  $M$  δηλώνει μεταφερόμενη μοριακή μάζα και  $T$  δηλώνει θερμοκρασία, ενώ οι δείκτες  $o$  και  $\infty$  αντιστοιχούν στις συνθήκες στην επιφάνεια απ'όπου αρχίζει η εξάτμιση και στο σημείο μακριά απ'αυτήν την επιφάνεια, ενώ ο δείκτης  $f$  αντιπροσωπεύει αέρα κορεσμένο με υδρατμούς. Θεωρώντας ιδανικά αέρια, μετά από μαθηματική επεξεργασία είναι:

$$Gr' = \frac{x_i^3 \rho_f^2 g' \beta'}{\mu_f^2} \Delta T' \quad (4.6)$$

όπου  $\Delta T'$  είναι η ισοδύναμος θερμοκρασιακή διαφορά. Η εξίσωση (2.6) είναι ίδια με αυτή που πρότεινε ο Dunkle [R.V. Dunkle, 1961].

Για μέση θερμοκρασία αέρα  $50^\circ\text{C}$  και ισοδύναμη θερμοκρασιακή διαφορά  $17^\circ\text{C}$  και θεωρώντας κορεσμένο αέρα, ο ειδικός αριθμός Grashof από τη σχέση (2.6) ισούται με  $2.81 \cdot 10^7 x_{li}^3$ . Για το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας του αποστακτήρα και για μέσες τιμές απόστασης νερού-καλύμματος ( $x_i$ ) όχι πολύ μικρές, ο ειδικός αριθμός Grashof βρίσκεται στο εύρος τιμών της τρίτης περιοχής της εξίσωσης (2.4). Για την τιμή που έχει τότε ο εκθέτης  $n$  (0.33), ουσιαστικά ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι ανεξάρτητος από την απόσταση  $x_{li}$ . Ο Dunkle επέλεξε εκείνες τις τιμές των φυσικών παραμέτρων που παρατηρούνται στο εύρος λειτουργίας του αποστακτήρα και κατέληξε στην επόμενη σχέση [R.V. Dunkle, 1961]:

$$q_{cwg} = 0.884 [T_w - T_{gi} + \frac{(p_w - p_g)(T_w + 273)}{(268.9 \cdot 10^3 - p_w)}] (T_w - T_{gi}) \quad (4.7)$$

ή

$$q_{cwg} = h_{cwg} (T_w - T_{gi}) \quad (4.8)$$

#### 4.1.2.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

Η μάζα του αέρα που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου με ελεύθερη μεταφορά είναι:

$$M_a = \frac{q_{cwg}}{c_{pa} (T_w - T_{gi})} = \frac{h_{cwg}}{c_{pa}} \quad (4.9)$$

Θεωρείται ότι ο αέρας πολύ κοντά στην επιφάνεια του νερού είναι κορεσμένος στην θερμοκρασία του νερού, άρα η μάζα του νερού ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα μπορεί να γραφτεί ως εξής [M.A.S. Malik κ.α, 1982]:

$$\frac{M_w'}{M_a'} = \frac{p_w}{(p_T - p_w)} \quad (4.10)$$

όπου  $M_w'$  και  $M_a'$  είναι τα μοριακά βάρη του νερού και του αέρα αντίστοιχα.

Οι Baum και Bairatov έδειξαν ότι ο όγκος του αέρα δεν συμμετέχει ουσιαστικά στην ανταλλαγή υδρατμών με τα στρώματα πάνω από την επιφάνεια του νερού και κάτω από το γυάλινο κάλυμμα [V.A. Baum, R. Bairatov, 1964]. Έτσι η καθαρή μάζα υδρατμών που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, δίνεται από την σχέση:

$$\frac{M_w'}{M_a'} = \frac{h_{cwg}}{c_{pa}} \left[ \frac{p_w}{(p_T - p_w)} - \frac{p_g}{(p_T - p_g)} \right] \quad (4.11)$$

Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το νερό στο γυάλινο κάλυμμα, λόγω μεταφοράς μάζας των υδρατμών είναι:

$$q_{ewg} = \frac{M'_w}{M'_a} \frac{p_w - p_g}{c_{pa}} h_{fg} h_{cwg} \frac{p_T}{(p_T - p_w)(p_T - p_g)} \quad (4.12)$$

ή

$$q_{ewg} = h_e (p_w - p_g) \quad (4.13)$$

Στην πράξη οι πιέσεις  $p_w$  και  $p_g$  είναι σημαντικά μικρότερες από την  $p_T$  και συνεπώς ο όρος  $(p_T - p_w)(p_T - p_g)$  μπορεί να θεωρηθεί ίσος με  $p_T^2$ . Τότε ο ισοδύναμος συντελεστής μεταφοράς μάζας  $h_e$

Εκφράζεται σε σχέση με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h_{cwg}$  ως εξής:

$$\frac{h_e}{h_{cwg}} = \frac{h_{fg}}{c_{pa}} \frac{M'_w}{M'_a} \frac{1}{p_T} \quad (4.14)$$

Με αντικατάσταση των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων, η εξίσωση (2.14) δίνει:

$$h_e = 0.013 h_{cwg} \quad (4.15)$$

Η τιμή του λόγου  $h_e / h_{cwg}$  δηλ. (0.013) είναι μικρότερη από αυτή που προτάθηκε από τους Bowen [I.S. Bowen, 1928] και Dunkle [R.V. Dunkle, 1961] και αυτό λόγω των παραδοχών που έχουν γίνει πιο πάνω. Έχει όμως αναφερθεί [M.A.S. Malik, 1982] ότι η τιμή του λόγου  $h_e / h_{cwg}$ , η οποία περιγράφει καλύτερα τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας και μεταφοράς μάζας είναι η 0.016273. Έτσι η θερμότητα που μεταδίδεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του νερού στο κάλυμμα, είναι:

$$q_{ewg} = 0.01627 h_{cwg} (p_w - p_g) \quad (4.16)$$

ή

$$q_{ewg} = \dot{m}_e h_{fg} \quad (4.17)$$

όπου  $\dot{m}_e$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς μάζας.

Ο Clark ωστόσο μετά την πραγματοποίηση σειράς πειραμάτων, έδειξε ότι οι εξισώσεις ταιριάζουν καλύτερα στην περίπτωση όπου η τιμή του λόγου  $h_e / h_{cwg}$  μειωθεί στο μισό [J.A. Clark, 1990].

### 4.1.2.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς από τον οριζόντιο πυθμένα της δεξαμενής (η θερμότερη περιοχή του αποστακτήρα) προς την μάζα του νερού, καθορίζεται από την σχέση (4.4) [M.A.S. Malik κ.α., 1982], όπου οι τιμές των C και η είναι αντίστοιχα 0.54 και 0.25 για κατευθυνση ροής θερμότητας προς τα πάνω και 0.27 και 0.25 για κατευθυνση ροής θερμότητας προς τα κάτω.

Μετά από αντικατάσταση των τιμών των αριθμών Nu, Gr και Pr, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς από τον οριζόντιο πυθμένα της δεξαμενής προς την μάζα του νερού είναι:

$$h_3 = \frac{Ck_f}{x_l} \left[ \frac{x_l^3 \rho_f^2 g \beta \Delta T_c m_f}{m_f^2 k_f} \right]^{1/4} \quad (4.18)$$

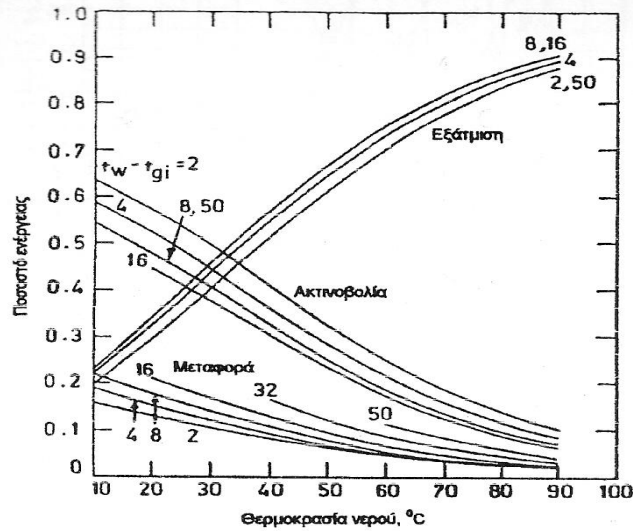
### 4.1.2.4 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στην ανάλυση της λειτουργίας του ηλιακού αποστακτήρα, η επιφάνεια του νερού και η επιφάνεια του καλύμματος θεωρούνται σαν άπειρες παράλληλες πλάκες. Αυτή η θεώρηση είναι αρκετά έγκυρη στην περίπτωση αποστακτήρων με μικρές κλίσεις καλύμματος μεγάλων διαστάσεων. Τότε ισχύει:

$$q_{avg} = \frac{\sigma(T_w^4 - T_g^4)}{\frac{1}{e_w} + \frac{1}{e_g} - 1} \quad (4.19)$$

### 4.1.2.5 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η ένταση και η επιρροή του κάθε συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, στην λειτουργία του αποστακτήρα, εξαρτάται ισχυρά από την θερμοκρασία του νερού και την διαφορά θερμοκρασίας νερού-καλύμματος. Το **Σχήμα 4.1** δείχνει την θερμότητα που μεταφέρεται λόγω μεταφοράς, λόγω εξάτμισης και λόγω ακτινοβολίας σαν κλάσμα του συνόλου της μεταδιδόμενης ενέργειας, συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού και της διαφοράς θερμοκρασίας νερού-καλύμματος. Το πιο σπουδαίο χαρακτηριστικό του **Σχήματος 4.1** είναι ότι για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, το κλάσμα που αντιστοιχεί στην μετάδοση λόγω εξάτμισης είναι το κυρίαρχο, άρα και η εσωτερική απόδοση είναι υψηλή.



Σχήμα 4.1. Ποσοστά μεταδιδόμενης ενέργειας με μεταφορά, εξάτμιση και ακτινοβολία κατά Cooper.

#### 4.1.3.ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του αποστακτήρα και του περιβάλλοντος αποτελείται από μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς και λόγω ακτινοβολίας από το κάλυμμα στο περιβάλλον. Λόγω του μικρού πάχους του γυάλινου καλύμματος, η θερμοκρασία σε αυτό θεωρείται ομοιόμορφη.

##### 4.1.3.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η ροή θερμότητας από το κάλυμμα προς το περιβάλλον λόγω μεταφοράς είναι:

$$q_{cga} = h_{cga} (T_g - T_a) \quad (4.20)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας  $h_{cga}$  είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και δίνεται από τη σχέση: [J.A. Duffie, W.A. Beckman, 1991]

$$h_{cga} = 5.7 + 3.8w \quad (4.21)$$

##### 4.1.3.2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ροή θερμότητας από το κάλυμμα προς το περιβάλλον λόγω ακτινοβολίας είναι:

$$q_{rgs} = \varepsilon_g \sigma [(T_g + 273)^4 - (T_s + 273)^4] \quad (4.22)$$

όπου  $T_s$  είναι η θερμοκρασία του ουρανού, η οποία προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί 12°C κάτω από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Συνεπώς η συνολική θερμότητα που μεταδίδεται από το κάλυμμα προς το περιβάλλον, είναι:

$$q_a = q_{cga} + q_{rgs} \quad (4.23)$$

#### 4.1.4 ΑΠΟΛΑΒΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ

Η ημερήσια απολαβή του αποστακτήρα σε αφαλατωμένο νερό  $M_d$  ανά μονάδα επιφάνειας εξάτμισης, σε  $\text{kg/m}^2$ , ισούται με:

$$M_d = \frac{Q_e}{h_{fg}} \quad (4.24)$$

όπου  $Q_e$  είναι η ενέργεια που σχετίζεται με την εξάτμιση του νερού στον αποστακτήρα (σε  $\text{J/m}^2$ ) και  $h_{fg}$  η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού ( $\text{J/kg}$ ).

Εάν  $H_d$  (σε  $\text{J/m}^2$ ) είναι η συνολική ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον αποστακτήρα, η απόδοση αυτού δίνεται από την σχέση:

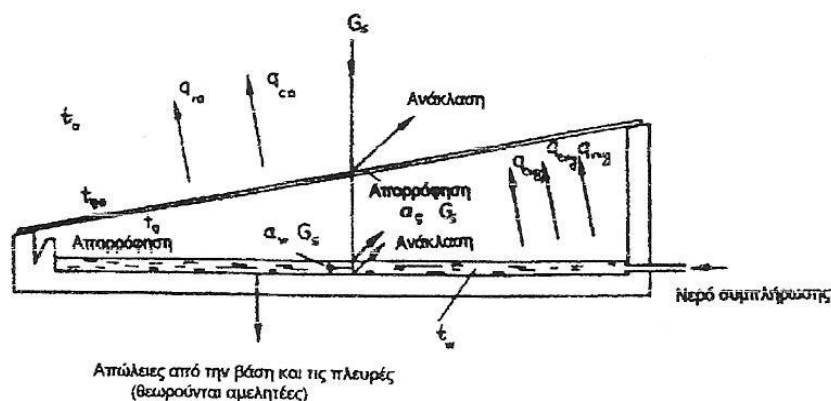
$$h = \frac{Q_e}{H_d} \quad (4.25)$$

### 4.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ

#### 4.2.1 ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Οι παραπάνω βασικές σχέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί κατά βάση σε όλα τα μοντέλα τα οποία έχουν αναπτυχθεί και προταθεί για την περιγραφή της λειτουργίας διάφορων τύπων ηλιακών αποστακτήρων, ξεκινώντας από τους πιο απλούς ως τους πιο πολύπλοκους.

Ο ιδανικός ηλιακός αποστακτήρας είναι ο πιο απλός για μαθηματική ανάλυση. Ιδανικός θεωρείται ο αποστακτήρας που παρουσιάζει μηδενικές απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής και έχει βάθος νερού τόσο μικρό ώστε να μπορεί να αμεληθεί η αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται στο αλμυρό νερό σε σύγκριση με την ενέργεια που μεταφέρεται από και προς το αλμυρό νερό. Ένας τέτοιος αποστακτήρας μελετήθηκε και περιγράφηκε μαθηματικά από τον Cooper [P.I. Cooper, 1973] και φαίνεται στο **Σχήμα 4.2**.



**Σχήμα 4.2. Ροές θερμότητας σε αποστακτήρα μιας βαθμίδας κατά Cooper, 1973**

Οι εσωτερικές μεταδόσεις θερμότητας  $q_{cwg}$ ,  $q_{ewg}$  και  $q_{rvg}$  δίνονται από τις εξισώσεις (4.8), (4.16) και (2.19) αντίστοιχα. Εκφράστηκε το ισοζύγιο θερμότητας στην επιφάνεια του αλμυρού νερού κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης, όπου θεωρήθηκε ότι υπάρχει μια σταθερή προσαγωγή αλμυρού νερού, η οποία αντικαθιστά το νερό που χάνεται λόγω εξάτμισης. Για την έκφραση του ισοζυγίου θερμότητας για το κάλυμμα, θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασιακή μεταβολή διαμέσου του καλύμματος είναι γραμμική και ανεξάρτητη από την ηλιακή ακτινοβολία, που απορροφάται από το κάλυμμα. Τελικά, το ισοζύγιο θερμότητας σε όλον τον αποστακτήρα, συνδέοντας τα παρακάτω ισοζύγια είναι:

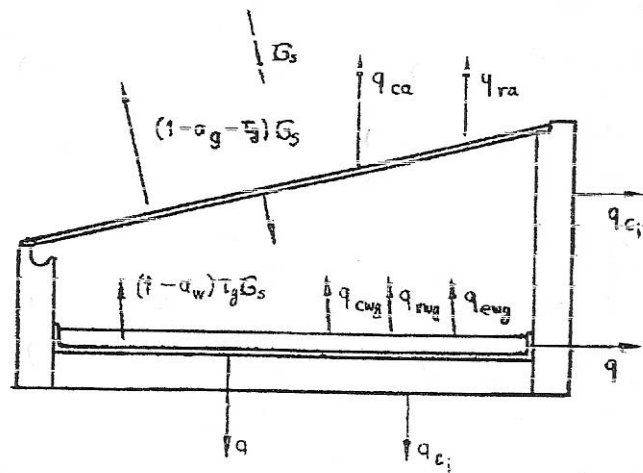
$$0.85\sigma[(T_{go} + 273)^4 - (T_a + 261)^4] + h_{cga}(T_{go} - T_a) = a_g G_s + \frac{K_g}{l_g}(T_{gi} - T_{go}) \quad (4.26)$$

όπου ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από τον αποστακτήρα προς το περιβάλλον  $h_{cga}$  είναι από την εξίσωση (2.21).

Το μοντέλο αυτό μπορεί να κάνει υπολογισμό της απολαβής του αποστακτήρα μόνο με επαναληπτικές τεχνικές.

Ένα μοντέλο για μη ιδανικό αποστακτήρα μιας βαθμίδας, αναπτύχθηκε από τον A. Maalej [A.Y. Maalej, 1991], μετά από σειρά πειραμάτων σε εσωτερικό χώρο. Ο αποστακτήρας μοντελοποιήθηκε σαν τέσσερα διαφορετικά αλλά αλληλοεπιδρώμενα υποσυστήματα (**Σχήμα 4.3**):

- την αλουμινένια λεκάνη
- την μόνωση
- το γυάλινο κάλυμμα
- το περιβάλλον



Σχήμα 4.3. Ροές θερμότητας ηλιακού αποστακτήρα κατά A.Maalej,1991.

Το μοντέλο βασίζεται στα παρακάτω ενεργειακά ισοζύγια για το γυάλινο κάλυμμα, για την λεκάνη και για την μόνωση:

$$M_g c_g \frac{dT_g}{dt} = (q_{rwg} + q_{ewg} + q_{cwg} + \tau_g a_g A_g G_s) - (q_{rgs} + q_{cga}) \quad (4.27)$$

$$(M_w c_{pw} + M_p c_{pp}) \frac{dT_w}{dt} = G_s A_g \tau_g a_w - (q_{rwg} + q_{ewg} + q_{cwg} + q_{ins}) \quad (4.28)$$

$$M_{IN} c_{pi} \frac{dT_{IN}}{dt} = q_{ins} - q_{ci} \quad (4.29)$$

Η αναλυτική λύση του συστήματος των εξισώσεων, οδηγεί στην απολαβή του αποστακτήρα.

Ένα άλλο μοντέλο αναπτύχθηκε από τους Toure και Meukam, το οποίο κινείται στις ίδιες αρχές με τα προηγούμενα μοντέλα. Αναπτύσσονται οι εξισώσεις των θερμικών ισοζυγίων στα διάφορα τμήματα του αποστακτήρα (κάλυμμα, μάζα αλμυρού νερού και απορροφητική επιφάνεια) και το σύστημα των εξισώσεων, αφού γραμμικοποιούνται, λύνεται επαναληπτικά με αριθμητικές μεθόδους. [S. Toure, P. Meukam, 1997]. Έχουν γίνει παραδοχές απλοποίησης, σύμφωνα με τις οποίες οι επιφάνειες εξάτμισης και συμπύκνωσης είναι παράλληλες, αμελείται η θερμοχωρητικότητα της απορροφητικής επιφάνειας, δεν υπάρχει θερμοκρασιακή μεταβολή στο πάχος του καλύμματος, θεωρείται σταθερή ταχύτητα αέρα και οι συντελεστές απορρόφησης και διαπερατότητας του καλύμματος θεωρούνται σταθερές στην διάρκεια της ημέρας κάτι που δεν ισχύει.

Ο Ν. Dhiman ανέπτυξε μοντέλο για την εκτίμηση και τον υπολογισμό του βέλτιστου πάχους του μονωτικού στρώματος του πυθμένα για αποστακτήρα λεκάνης μιας βαθμίδας, όπου χρησιμοποίησε

εξίσωση που εκφράζει το ετήσιο κόστος του αποστακτήρα συναρτήσει του πάχους της μόνωσης αλλά και άλλων κατασκευαστικών και κλιματικών παραμέτρων [N.K. Dihman, 1990]

Ο Α. Rajvanshi ερευνήσε διεξοδικά την επίδραση διαφόρων βαφών και πρότεινε παρόμοιο μοντέλο για τον υπολογισμό της απολαβής του αποστακτήρα. Επίσης ανέπτυξε σχέση, η οποία δίνει την βέλτιστη συγκέντρωση της κάθε βαφής για μέγιστη απολαβή του αποστακτήρα [A.K. Rajvanshi, 1991].

Ο S. H. Soliman ερευνήσε την επίδραση του αέρα στην απολαβή του αποστακτήρα, λαμβάνοντας υπόψη ροή του αέρα παράλληλη στις κεκλιμένες επιφάνειες του αποστακτήρα και ροή του αέρα παράλληλη στις κάθετες επιφάνειές του. Έτσι πρότεινε θεωρητικές εξισώσεις που δίνουν συντελεστές μετάδοσης θερμότητας για τις κεκλιμένες και για τις κάθετες πλευρές. [S.H. Soliman, 1972].

Το θέμα της μείωσης της ροής θερμότητας (ηλιακής ακτινοβολίας) διαμέσου του καλύμματος πάνω στο οποίο ρέει νερό για την ψύξη του ερευνηθήκη από τους Sodha κ.α. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν μαθηματικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τις περιοδικές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και κατέληξαν σε μία περιοδική λύση για την ροή θερμότητας [M.S. Sodha κ.α., 1978].

Βασιζόμενοι στις γνωστές σχέσεις των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας και γράφοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις που εκφράζουν τα ενεργειακά ισοζύγια στα διάφορα τμήματα του αποστακτήρα, οι G.N. Tiwari και V.B. Rao ανέπτυξαν μοντέλο που περιγράφει τη μεταβατική λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα, ενώ υπάρχει συνεχής ροή κρύου νερού στην εξωτερική πλευρά του καλύμματος του αποστακτήρα [G.N. Tiwari και V.B. Rao, 1984]. Στην περίπτωση αυτή λήφθηκε υπόψη το νερό που ρέει πάνω στο κάλυμμα και γράφηκε επιπλέον εξίσωση για το ενεργειακό ισοζύγιο του νερού αυτού. Ομοίως οι Madhuri και G.N. Tiwari ανέπτυξαν μοντέλο σε ηλιακό αποστακτήρα με συνεχή ροή θερμού νερού στην λεκάνη του [Madhuri και G.N. Tiwari, 1984]. Στην εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου του αλμυρού νερού, περιλήφθηκε επιπλέον όρος που εκφράζει την προσδιδόμενη στο αλμυρό νερό θερμότητα, από την ροή του θερμού νερού στην λεκάνη.

Παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε και από τους Ghoneyem και Ileri, γράφοντας τις εκφράσεις των θερμικών ισοζυγίων στον αποστακτήρα και χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων [A. Ghoneyem και A. Ileri, 1997]. Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ παραδοχές, όπως αυτή της μη ύπαρξης θερμοκρασιακής μεταβολής στο πάχος του καλύμματος αλλά και του αλμυρού νερού και της θεώρησης σταθερών θερμικών ροών και θερμοκρασιών ανά ώρα.

Ο Bellache ανέπτυξε μοντέλο για ηλιακό αποστακτήρα μιας βαθμίδας, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των κόμβων, όπου για κάθε κόμβο  $i$  γράφεται το θερμικό ισοζύγιο [O. Bellache, 1991]:

$$V_i c p_i \frac{\partial T_i}{\partial t} + \sum h c_{j,i} A_i (T_j - T_i) + \sum h r_{j,i} A_i (T_j - T_i) + \sum h e_{j,i} A_i (T_j - T_i) + \lambda_i A_i \frac{(T_{lim} - T_i)}{e_i} + Q S_i \quad (4.30)$$

Η επίλυση αυτή γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και έχει αρκετή πολυπλοκότητα.

Ένα ακόμη μοντέλο για τον ηλιακό αποστακτήρα, το οποίο θεωρεί τις παραμέτρους μεταφοράς μάζας και ενέργειας, τις αρχικές θερμοκρασίες και τον όγκο του αλμυρού νερού, αναπτύχθηκε από τους Achilon κ.α.Το μοντέλο αυτό είναι μη γραμμικό και λύνεται μόνο με αριθμητικές μεθόδους [B.M. Achilon κ.α., 1993].

Ακόμη πιο πολύπλοκο μοντέλο για την περιγραφή της λειτουργίας του αποστακτήρα μιας βαθμίδας αναπτύχθηκε από τους Djebedjian και Rayan, οι οποίοι χώρισαν τον αποστακτήρα σε πλέγμα 40\*20 βασισμένο σε εξισώσεις Navier-Stokes και λυμένο με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών [B. Djebedjian και M.A. Rayan, 2000]. Παρ' όλα αυτά έκαναν υποθέσεις απλοποίησης, όπως ροή σε σταθερή κατάσταση, σταθερές θερμοκρασίες σε όλες τις οριακές επιφάνειες, ύπαρξη μίγματος αέρα και υδρατμών πάντα εντός του αποστακτήρα, ενώ θεώρησαν μεταβλητές ιδιότητας των θερμοφυσικών ποσοτήτων.

Επίσης αρκετά πολύπλοκη είναι η ανάλυση που παρουσίασε ο Rheinländer, ο οποίος χώρισε τον αποστακτήρα επίσης σε πλέγμα και εξέφρασε το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε κόμβο [J. Rheinländer, 1982]. Εντός του αποστακτήρα θεωρείται ότι υπάρχει μίγμα τριών συστατικών: ξηρός αέρας, υδρατμός και ομίχλη. Η νέα θεώρηση του μοντέλου είναι η χρήση δύο αριθμών Grashof ξεχωριστά, ένας για τους υδρατμούς και ένας για την ομίχλη και όχι ενός συνδυασμένου όπως ισχύει σε όλες ανεξαιρέτως τις μοντελοποιήσεις που υπάρχουν.

Τέλος για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων των αποστακτήρων, οι Lyashenko και Redzherona χρησιμοποίησαν πολύπλοκα στοχαστικά μοντέλα τα οποία λύνονται με αριθμητικές μεθόδους [I.N. Lyashenko και S.R. Redzherona, 1991]. Ομοίως, οι Salieva και Baitulakova, πρότειναν πολύπλοκο μοντέλο το οποίο λύνεται μόνο με προσεγγιστικές αριθμητικές μεθόδους, για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων του αποστακτήρα [R.B. Salieva και N.D. Baitulakova, 1976].

#### 4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ

Η θεωρία σταθερής κατάστασης του ηλιακού αποστακτήρα είναι μια προσέγγιση η οποία δεν είναι αρκετά έγκυρη, διότι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι περιοδικές παράμετροι στο διάστημα των 24 ωρών. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποία περιέχουν την περιοδικότητα στην ανάλυση του ηλιακού αποστακτήρα. Στα μοντέλα αυτά που διατυπώθηκαν μεταξύ άλλων από τους Cooper [P.I. Cooper, 1969 και P.I. Cooper, 1973], Frick [B. Frick, 1970], Hirschmann και Roefler [J.R. Hirschmann, S.K. Roefler, 1970] και Baum κ.α. [V.A. Baum κ.α., 1970], διατηρούνται μόνο οι βασικές αρμονικές σε όλα τα περιοδικά μεγέθη. Επίσης λαμβάνεται υπόψη και η ποσότητα θερμότητας που χάνεται λόγω αγωγής παρά την όσο καλή μόνωση.

Για αποστακτήρα που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, οι Nayak κ.α. εξέφρασαν τα ενεργειακά ισοζύγια για το κάλυμμα, για την επιφάνεια του αλμυρού νερού και για την απορροφητική επιφάνεια ξεχωριστά, όπου οι ρυθμοί μετάδοσης θερμότητας  $q_{cwg}$ ,  $q_{rwg}$ ,  $q_{ewg}$  και  $q_a$ , δίνονται από τις εξισώσεις 8, 16, 19 και 23 αντίστοιχα. [J.K. Nayak, κ.α., 1980]. Ωστόσο, για τα ισοζύγια αυτά, έχουν γίνει οι παραδοχές ότι η ποσότητα του νερού που χάνεται λόγω της εξάτμισης είναι μικρή σε σύγκριση με την ποσότητα του αλμυρού νερού στην λεκάνη, ότι δεν υπάρχει διαρροή ατμών από τον αποστακτήρα, ότι δεν παρατηρείται θερμοκρασιακή διαφορά κατά την κατακόρυφη διάσταση στο κάλυμμα ή στο νερό της λεκάνης και ότι τα εμβαδά των επιφανειών του καλύμματος, του νερού και του πυθμένα είναι ίσα.

Επιπλέον για απλοποίηση, θεωρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του καλύμματος και του αλμυρού νερού είναι μικρή και εντός αυτού του θερμοκρασιακού εύρους, η πίεση των ατμών μέσα στον θάλαμο, μπορεί προσεγγιστικά να γραφτεί σαν γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας: [M.A.S. Malik κ.α., 1982]

$$P = R_1 T + R_2 \quad (4.31)$$

Σημειώνεται επίσης ότι η μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης με την θερμοκρασία έχει αμεληθεί.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, θεωρούνται περιοδικές συναρτήσεις του χρόνου και εκφράζονται σαν συνάρτηση Fourier ως εξής:

$$G_s = a_o + \operatorname{Re} \sum_n a_n \exp(inwt) \text{ και } T_a = b_o + \operatorname{Re} \sum_n b_n \exp(inwt) \quad (4.32)$$

Η λύση των εξισώσεων του μοντέλου σύμφωνα με τους McAdams [W.C. McAdams, 1954] και

Threlkeld [J.L. Threlkeld, 1970], δίνει την περιοδική έκφραση της θερμοκρασίας του καλύμματος και της θερμοκρασίας του αλμυρού νερού αντίστοιχα. [J.K. Nayak κ.α., 1980]:

$$T_g(t) = g_o + \operatorname{Re} \sum_n g_n \exp(inwt) \text{ και } T_w(t) = G_o + \operatorname{Re} \sum_n G_n \exp(inwt) \quad (4.33)$$

καθώς και αντίστοιχες εκφράσεις για τη θερμοκρασιακή κατανομή κάτω από την απορροφητική επιφάνεια  $\theta_l(x,t)$ , οι οποίες περιέχουν και μιγαδικούς αριθμούς.

### 4.2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ

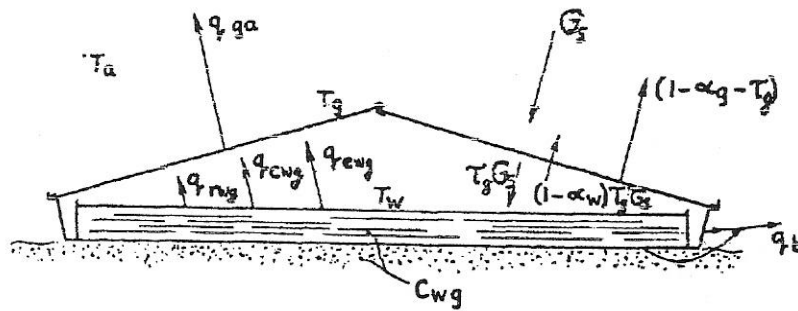
Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για την ανάλυση και τη μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας του ηλιακού αποστακτήρα συναρτήσει του χρόνου. Οι Morse και Read [R.N. Morse, W.R.W. Read, 1968] και ο Cooper [P.I. Cooper, 1969], ανέπτυξαν σχετικά μοντέλα χωρίς να δώσουν αναλυτικές εκφράσεις των παραμέτρων απόδοσης που εξαρτώνται από τον χρόνο, ενώ οι Sodha κ.α. προτείνουν αναλυτικό μοντέλο για την περιγραφή της μεταβατικής λειτουργίας του αποστακτήρα και κατέληξαν σε αντίστοιχες εκφράσεις [M.S. Sodha κ.α., 1980]. Έγινε η παραδοχή ότι η μάζα του αλμυρού νερού στην λεκανή του αποστακτήρα παραμένει σταθερή.

Το μοντέλο των Morse και Read, [R.N. Morse, W.R.W. Read, 1968], βασίζεται στις εξής βασικές σχέσεις για το ισοζύγιο για το γυάλινο κάλυμμα, τη μάζα του νερού και την απορροφητική επιφάνεια του πυθμένα (**Σχήμα 4.4**):

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = \tau_1 G_s + h_1(T_w - T_g) - h_2(T_g - T_a) \quad (4.34)$$

$$C_w \frac{dT_w}{dt} = \tau_2 G_s + h_3(\theta_{ba \sin} - T_w) - h_1(T_w - T_g) \quad (4.35)$$

$$\tau_3 H_s = h_3(\theta_{ba \sin} - T_w) + h_b(\theta_{ba \sin} - T_a) \quad (4.36)$$



Σχήμα 4.4. Ροές θερμότητας ηλιακού αποστακτήρα κατά Morse και Read, 1968.

όπου οι εκφράσεις των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας είναι οι ίδιες με αυτές της παραγράφου 1. Επίσης ισχύουν και οι ίδιες παραδοχές.

Με κατάλληλες αντικαταστάσεις και με μαθηματική επεξεργασία του συστήματος των εξισώσεων (μετασχηματισμός Laplace), καταλήγουμε σε σύστημα το οποίο γράφεται:

$$\frac{d}{dt}(T_w + aT_g) = T_w(a_2 + aa_1) + T_g(b_2 + ab_1) + s(t) \quad (4.37)$$

όπου:  $s(t) = g(t) + af(t)$

Η λύση της εξίσωσης αυτής και θεωρώντας τις οριακές συνθήκες, την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία περιβάλλοντος σε αναπτύγματα σειρών Fourier είναι:

$$T_w(t) = \frac{1}{a_- - a_+} [(a_- P_3 - a_+ P_4) + \sum_n (a_- P_{1n} - a_+ P_{2n}) \exp(inwt) + A_+ a_- \exp(c_+ t) - A_- a_+ \exp(c_- t)] \quad (4.38)$$

$$T_g(t) = \frac{1}{a_+ - a_-} [(P_3 - P_4) + \sum_n (P_{1n} - P_{2n}) \exp(inwt) + A_+ \exp(c_+ t) - A_- \exp(c_- t)]$$

όπου τα  $P_3, P_4, P_{1n}, P_{2n}$  προσδιορίζονται από άλλες εξισώσεις, ενώ τα  $a_-, a_+, c_-, c_+$  είναι λύσεις (δύο ρίζες) δευτεροβάθμιων εξισώσεων. Η λύση είναι αρκετά πολύπλοκη και περιέχει και αριθμούς σε μιγαδική μορφή.

Ο Santori ανέπτυξε άλλο μοντέλο που περιγράφει την μεταβατική λειτουργία του αποστακτήρα και που βασίζεται στις εξισώσεις του Dunkle για τις εκφράσεις των συντελεστών [E. Santori, 1993]. Τα ενεργειακά ισοζύγια που χρησιμοποίησε για τον αποστακτήρα έχουν την μορφή:

$$a_g G + a_w \tau_g G = q_a A + q_b + C_w \frac{dT_w}{dt} \quad \text{και} \quad q_a A = q_{rwg} + q_{cwg} + q_{ewg} + a_g G \quad (4.39)$$

Η επίδραση του πάχους του αλμυρού νερού της λεκάνης στην απολαβή του αποστακτήρα μελετήθηκε από τους Tiwari και Madhuri με την ανάπτυξη μοντέλου που περιγράφει την μεταβατική λειτουργία του αποστακτήρα μιας βαθμίδας [G.N. Tiwari, Madhuri, 1987]. Το μοντέλο θεωρεί τις γνωστές σχέσεις όσον αφορά τα ενεργειακά ισοζύγια στα διάφορα τμήματα του αποστακτήρα και με τις ίδιες παραδοχές. Η επίλυση των εξισώσεων δίνει την επίδραση του πάχους στην ημερήσια απολαβή για διάφορες τιμές της αρχικής θερμοκρασίας του αλμυρού νερού.

#### 4.2.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Οι Morse και Read μελέτησαν την μεταβατική λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα και πρότειναν λύση στις σχέσεις μεταφοράς μάζας και θερμότητας που περιγράφουν την λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα σε μη μόνιμη κατάσταση με γραφικό τρόπο, σε μια προσπάθεια γρήγορης και πρακτικής εξαγωγής αποτελεσμάτων αποφεύγοντας την πολυπλοκότητα των μοντέλων [R.N. Morse, W.R.W. Read, 1968]

Χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση για το ενεργειακό ισοζύγιο του αποστακτήρα:

$$a_g G_s + a_w \tau_g G_s = q_a + q_b + C_w \frac{dT_w}{dt} \quad (4.40)$$

η οποία εκφράζει ότι η ενέργεια που εισέρχεται στον αποστακτήρα αποτελείται από την ενέργεια που

απορροφάται από το κάλυμμα ( $a_g, G_s$ ) και από την ενέργεια που απορροφάται από το αλμυρό νερό ( $a_w, \tau_g, G_s$ ), ενώ η ενέργεια που χάνεται από τον αποστακτήρα, αποτελείται από τις απώλειες προς το περιβάλλον μέσω του καλύμματος ( $q_a$ ) και μέσω του πυθμένα και των πλευρών ( $q_b$ ). Ο όρος αποθήκευσης  $C_w$  εκφράζει τις επιδράσεις του νερού, του εδάφους και των δομικών στοιχείων στον αποστακτήρα.

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ καλύμματος και αλμυρού νερού είναι ίση με ( $q_{cwg} + q_{ewg} + q_{rwg}$ ), ενώ η ροή θερμότητας προς το περιβάλλον είναι:

$$q_a = q_{cwg} + q_{ewg} + q_{rwg} + a_g G_s \quad (4.41)$$

και οι απώλειες από τις πλευρές και την βάση του αποστακτήρα είναι:

$$q_b = h_b (T_w - T_a) \quad (4.42)$$

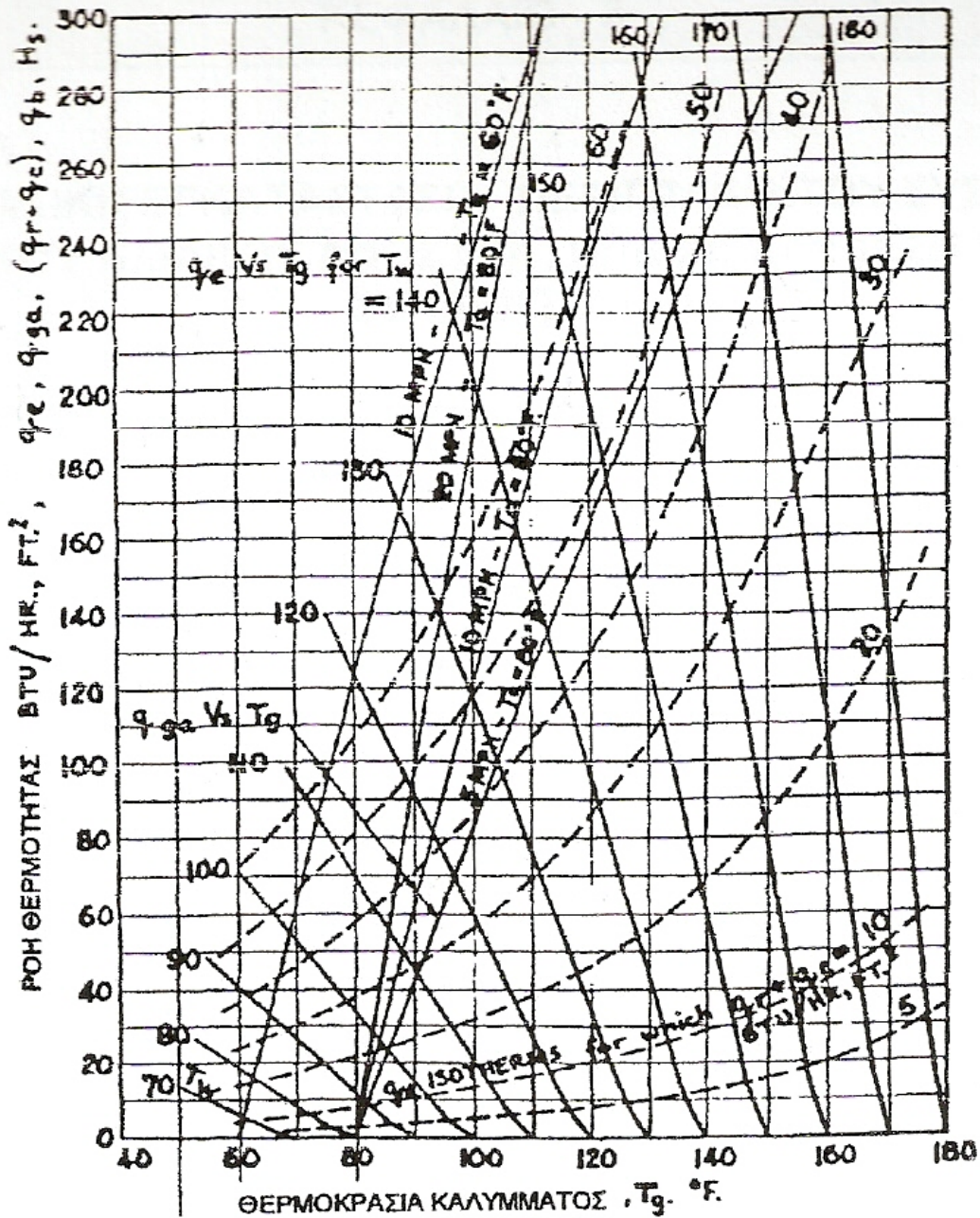
όπου  $h_b$  είναι ο συντελεστής απωλειών από την βάση του αποστακτήρα ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ).

Οι εκφράσεις των συντελεστών  $q_{cwg}, q_{ewg}, q_{rwg}, q_a$  είναι αυτές που προτάθηκαν από τον Dunkle [R.V. Dunkle, 1961].

Οι Morse και Read πρότειναν την λύση των εξισώσεων του μοντέλου σε διάγραμμα, το οποίο φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**. Από το διάγραμμα και για κάθε τιμή της ακτινοβολίας, βρίσκονται <sup>43</sup>



πρώτα οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας και στη συνέχεια οι θερμοκρασίες του καλύμματος  $T_g$  και νερού  $T_w$ .



Σχήμα 4.5. Χαρακτηριστικός χάρτης για την εύρεση της θερμικής απολαβής ηλιακού αποστακτήρα κατά Morse και Read, 1968.

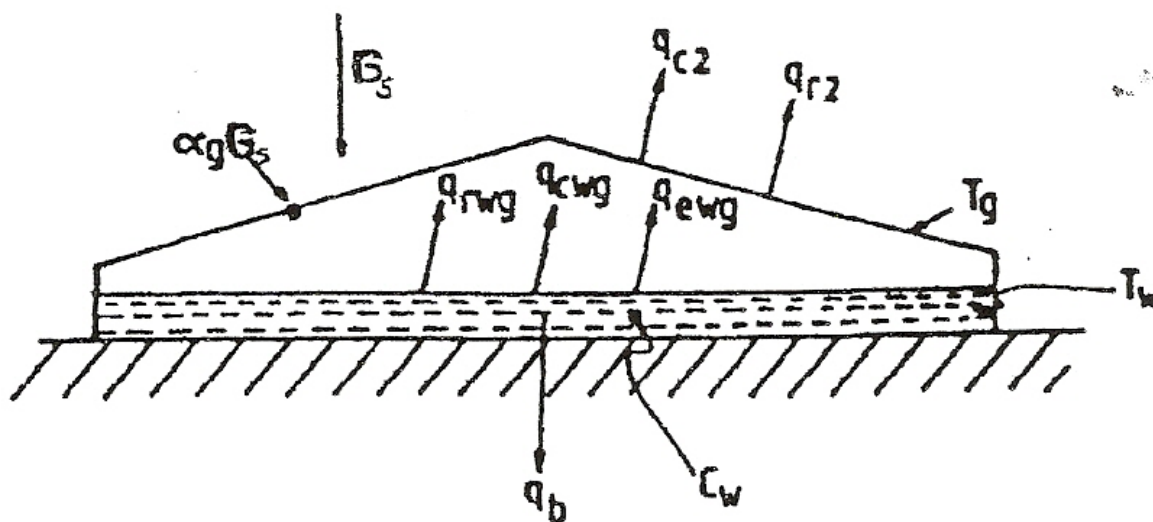
#### 4.2.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΘΕΩΡΟΥΝ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα ως τώρα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της λειτουργίας του ηλιακού αποστακτήρα, οδηγούν σε εξισώσεις οι οποίες είτε δεν έχουν αναλυτική λύση και συνεπώς απαιτούν επαναληπτικές μεθόδους, είτε λύνονται με την βοήθεια διαγραμμάτων είτε η λύση τους είναι τόσο πολύπλοκη που απαιτούνται προσομοιώσεις στον υπολογιστή. Τα περισσότερα μοντέλα θεωρούν σταθερές τιμές για τους διάφορους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας.

Οι Sharma και Mullick ανέπτυξαν μια ημιεμπειρική εξίσωση για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του καλύμματος για δεδομένες τιμές θερμοκρασιών νερού και περιβάλλοντος, η οποία όπως έδειξαν δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα [V.B. Sharma, S.C.Mullick, 1991]. Στη συνέχεια ανέπτυξαν ένα μοντέλο [V.B. Sharma, S.C.Mullick, 1993], σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η ωριαία απολαβή του αποστακτήρα σε περίοδο 24 ωρών. Η θερμοκρασία του νερού υπολογίζεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης ισοζυγίου θερμότητας στο τέλος της ώρας, θεωρώντας ότι οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας παραμένουν σταθεροί σε αυτό το διάστημα.

Το θερμικό ισοζύγιο του αποστακτήρα σύμφωνα με το μοντέλο των Sharma και Mullick όπως αυτός φαίνεται στο **Σχήμα 4.6**, εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{C_w}{A_w} \frac{dT_w}{dt} = n_{od} G_s - U_t (T_w - T_s) - U_b (T_w - T_a) \quad (4.43)$$



**Σχήμα 4.6. Ροές θερμότητας σε ηλιακό αποστακτήρα κατά Sharma και Mullick, 1991.**

όπου χρησιμοποιήθηκε ένας ολικός συντελεστής απωλειών μεταξύ νερού και καλύμματος  $U_t$ , προς τα επάνω, συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δια μέσου πυθμένα και πλευρών  $U_b$ , ενώ λαμβάνονται υπόψη η θερμοχωρητικότητα του νερού στην λεκάνη  $C_w$  και η οπτική απόδοση του αποστακτήρα

$n_{od}$ . Οι επιφάνειες του καλύμματος και του νερού είναι  $A_g$  και  $A_w$  αντίστοιχα. Οι εκφράσεις των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας είναι ίδιες με αυτές του Dunkle [R.V. Dunkle, 1961] και δίνονται αναλυτικά σε σχετική αναφορά [V.B. Sharma, S.C.Mullick, 1993].

Το ενεργειακό ισοζύγιο στο κάλυμμα εκφράστηκε ως:

$$A_r h_w (T_g - T_a) + A_r h_{rga} (T_g - T_s) = (h_{cwg} + h_{ewg} + h_{rwg}) (T_w - T_g) \quad (4.44)$$

Η θερμοκρασία του νερού στη λεκάνη στο τέλος της ώρας (ή της θεωρούμενης περιόδου) λαμβάνεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης (4.43), θεωρώντας ότι οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας παραμένουν σταθεροί σε αυτή την περίοδο:

$$T_{w,f} = \left[ \frac{n_{od} G + U_t T_s + U_b T_a}{(U_t + U_b)} \right] + [T_{w,in} - \frac{n_{od} G + U_t T_s + U_b T_a}{(U_t + U_b)}] \exp\left(-\frac{U_t + U_b}{C_w}\right) \quad (4.45)$$

όπου  $T_{w,in}$  και  $T_{w,f}$  είναι η αρχική και τελική θερμοκρασία του νερού αντίστοιχα, ενώ  $G, T_a$  και  $T_s$  είναι οι μέσες τιμές της ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ουρανού στο θεωρούμενο διάστημα, αντίστοιχα.

Οι διάφοροι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας υπολογίζονται για α κάθε ώρα αν είναι γνωστή η θερμοκρασία του καλύμματος. Αυτή μπορεί να υπολογιστεί είτε από την ημιεμπειρική εξίσωση που έχει προταθεί από τους ίδιους συγγραφείς: [V.B. Sharma, S.C. Mullick, 1991]

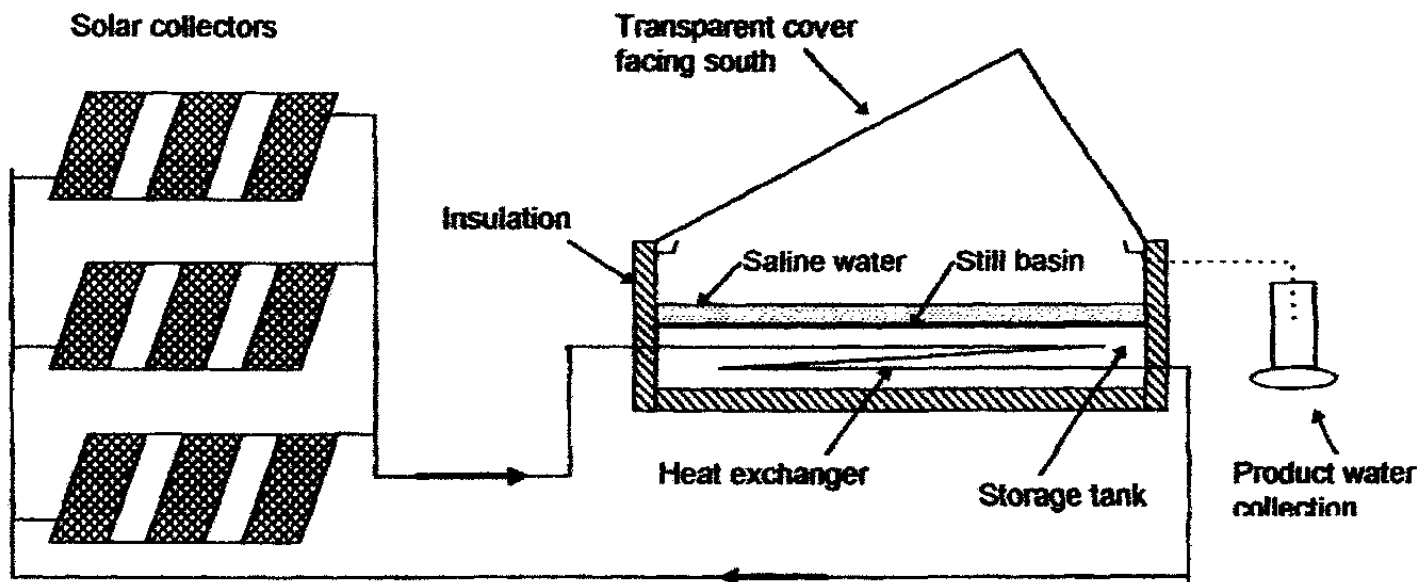
$$T_g = \frac{\{(0.02612T_w^2 - 15.76T_w + 23.92)T_w + A_r h_w T_a + A_r (0.048T_a - 9)T_s\}}{\{(0.02612T_w^2 - 15.76T_w + 23.92) + A_r h_w + A_r (0.048T_a - 9)\}} \quad (4.46)$$

είτε από την εξίσωση [V.B. Sharma, S.C. Mullick, 1993]:

$$T_g = \frac{U_i T_w + A_r h_w T_a + A_r h_{ra} T_s}{U_i + A_r h_w + A_r h_{rga}} \quad (4.47)$$

5.1 ΗΛΙΑΚΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Το ηλιακό υβριδικό σύστημα αφαλαάτωσης και θέρμανσης νερού, το οποίο κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο Ηλιακών –Ενεργειακών συστημάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», αποτελείται από έναν συμβατικό ηλιακό αποστακτήρα τύπου greenhouse συνδεδεμένο με πεδίο ηλιακών συλλεκτών (Σχήμα 5.1). Η κύρια επιφάνεια του καλύμματος του αποστακτήρα έχει προσανατολισμό στον Νότο και κλίση 30°, η δε βόρεια πλευρά 60°.



Σχήμα 5.1: Σχηματική παράσταση του πειραματικού συστήματος ηλιακής απόσταξης.

Η μαύρη λεκάνη διαστάσεων 5\*2.5 μέτρα περιέχει το προς αφαλαάτωση νερό, ενώ ακριβώς κάτω βρίσκεται η καλά μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας όγκου  $V_s=3750\text{lt}$ . Το νερό της δεξαμενής θερμαίνεται μέσω σωληνωτού εναλλάκτη θερμότητας από πεδίο 24 ηλιακών συλλεκτών συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας  $43\text{m}^2$ . Περιμετρικό κανάλι εντός του αεροστεγούς χώρου του αποστακτήρα εξασφαλίζει την συλλογή του απεσταγμένου νερού ενώ ταυτόχρονα το ζεστό νερό της δεξαμενής αποθήκευσης παραλαμβάνεται από την έξοδό της.

Παράλληλα εγκαταστάθηκε σύστημα μετρήσεων, το οποίο καταγράφει συνεχώς την στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία, τις θερμοκρασίες του νερού δεξαμενής, λεκάνης καλύμματος, αεροστεγούς χώρου και περιβάλλοντος καθώς και την παραγόμενη ποσότητα νερού.

5.1.1 ΛΕΠΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Η λειτουργία του ασύνδετου ηλιακού αποστακτήρα διερευνήθηκε μέσω εκτεταμένης σειράς πειραμάτων τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για την επικύρωση και διαπίστωση ισχύος της μεθόδου «πρόσπτωσης-απολαβής». Στην συνέχεια διερευνήθηκε πειραματικά η λειτουργία του συνδεδεμένου ηλιακού αποστακτήρα. Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η σύνδεση του συμβατικού ηλιακού αποστακτήρα με το πεδίο συλλεκτών και την δεξαμενή αποθήκευσης είναι ένας από τους πλέον καλύτερους τρόπους αύξησης της παραγωγής αφαλατωμένου νερού, τόσο σε ημερήσια όσο κυρίως σε νυχτερινή βάση, καθώς η συνολική παραγωγή του συνδεδεμένου αποστακτήρα είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή του ασύνδετου και μάλιστα ανεξάρτητα από τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες.

Η σημαντική αύξηση της απολαβής του συνδεδεμένου αποστακτήρα οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασικής διαφοράς νερού λεκάνης και καλύμματος ( $T_w - T_c$ ), η οποία οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασία  $T_w$  νερού λεκάνης, αποτέλεσμα της μετάδοσης θερμότητας προς αυτό από το θερμότερο νερό της δεξαμενής αποθήκευσης. Ακόμη και σε όλη την νυχτερινή περίοδο.

Η πειραματική διερεύνηση του συνδεδεμένου αποστακτήρα απέδειξε την εγκυρότητα της μεθόδου «πρόσπτωσης –

απολαβής» να περιγράψει την λειτουργία του και να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια την απολαβή σε μακροχρόνια βάση. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα περίπου ενός μήνα, όπου η πραγματική απολαβή του συστήματος συγκρίθηκε με την θεωρητικά εκτιμώμενη από το μοντέλο για όλη την χρονική περίοδο των πειραμάτων.

Ο Πίνακας 1 δίνει τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ της συνολικής πραγματικής απολαβής (για το σύνολο των 28 ημερών-περίοδος μετρήσεων Άνοιξη 2001) και της αντίστοιχης θεωρητικής συνολικά υπολογιζόμενης από το μοντέλο η οποία είναι το άθροισμα ( $M_{out,d} + M_{out,n}$ ). Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την καταλληλότητα του μοντέλου για την αξιόπιστη εκτίμηση της απολαβής του αποστακτήρα σε μακροχρόνια βάση.

**Πίνακας 5.1 : Σύγκριση πραγματικής και θεωρητικής παραγωγής αφραλατωμένου νερού.**

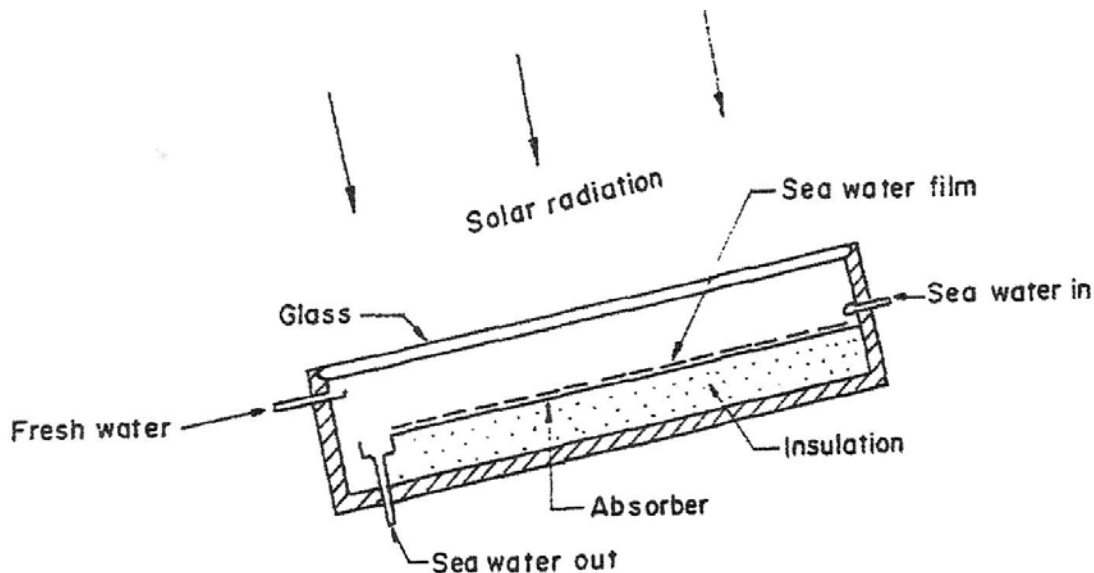
|                    | ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ | ΝΥΧΤΕΡΙΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| <b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ</b>   | 374.4kg           | 435.4kg            | 809.8kg           |
| <b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ</b> | 386.3kg           | 447.5kg            | 833.8kg           |
| <b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>     | 3.2%              | 2.8%               | 3.0%              |

### 5.1.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η παραπάνω διερεύνηση δεν θεωρεί αφαίρεση ζεστού νερού από την δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, συνεπώς η συνολική παραγωγή αφραλατωμένου νερού του συστήματος είναι η μέγιστη δυνατή. Η χρήση του ηλιακού συστήματος ως υβριδικό, σημαίνει την απομάστευση ορισμένης ποσότητας ζεστού νερού από την δεξαμενή σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής  $T_{sw}$ , λόγω της ανάμιξής του με το εισερχόμενο κρύο νερό του δικτύου  $T_c$ . Το γεγονός αυτό μειώνει την θερμότητα που μεταφέρεται από το νερό της δεξαμενής αποθήκευσης προς το νερό της λεκάνης του αποστακτήρα με συνέπεια την χαμηλότερη θερμοκρασία του νερού λεκάνης, άρα και την χαμηλότερη απολαβή του αποστακτήρα σε αφραλατωμένο νερό.

Το μειονέκτημα των απλών μονάδων ηλιακής απόσταξης είναι ότι η οριζόντια επιφάνεια του νερού δέχεται λιγότερη ακτινοβολία, από το να ήταν κεκλιμένη, (εκτός όταν η μονάδα βρίσκεται κοντά στον Ισημερινό).

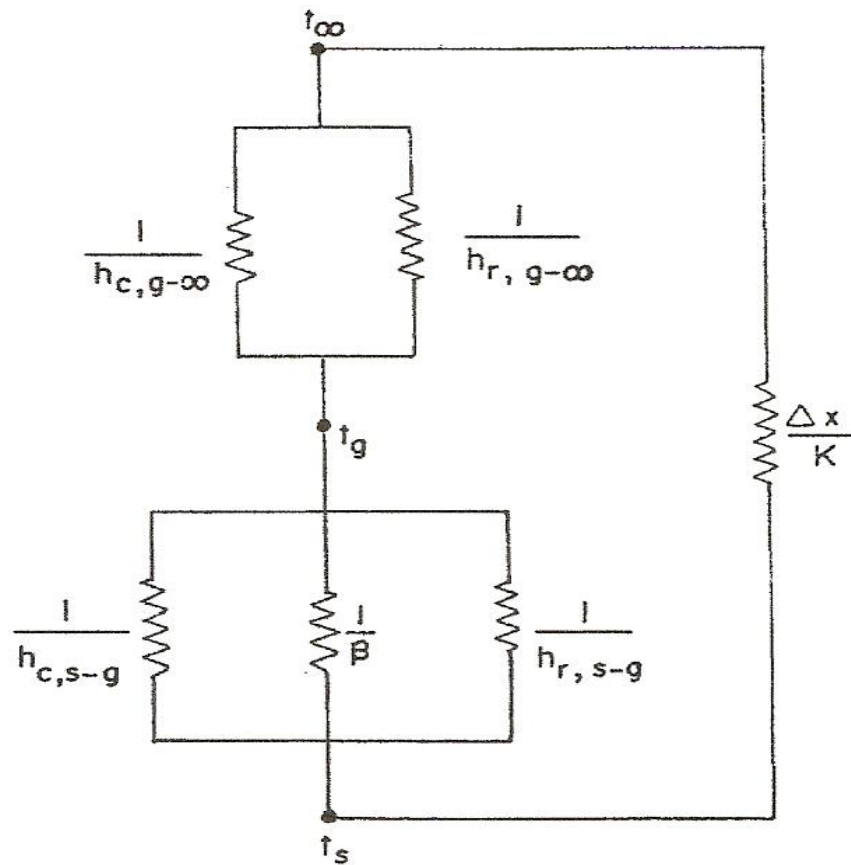
Η χρησιμοποιούμενη εγκατάσταση απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.2**. Αποτελείται από μία επίπεδη, μαύρη, κεκλιμένη επιφάνεια (χωρίς καμία πορώδη υδρο-απορροφητική επιφάνεια) πάνω από την οποία το θαλασσινό νερό ρέει σαν λεπτό φιλμ και είναι καλυμμένη από ένα μονό κρύσταλλο, το οποίο αφάνει ένα κενό αέρος, περίπου 2.5cm. Ο πυθμένας του αποστακτήρα είναι καλά μονωμένος. Το θαλασσινό νερό θερμαίνεται από την ηλιακή ενέργεια και ο ατμός που παράγεται από την εξάτμισή του φτάνει στο γυάλινο κάλυμμα δι' αγωγής, όπου συμπυκνώνεται στο κάτω μέρος του. Το συμπύκνωμα ρέει κατά μήκος της γυάλινης επιφάνειας χάρη στην βαρύτητα και συγκεντρώνεται σε μία λεκάνη συγκέντρωσης.



**Σχήμα 5.2: Κεκλιμένος ηλιακός αποστακτήρας**

Το θερμικό κύκλωμα για τον συγκεκριμένο αποστακτήρα, φαίνεται στο **Σχήμα 5.3**. Η μεταφορά ενέργειας από το θαλασσινό νερό στο γυάλινο κάλυμμα γίνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Αγωγή
- Ακτινοβολία
- Εξάτμιση-συμπύκνωση



Σχήμα 5.3 : Θερμικό κύκλωμα του κεκλιμένου ηλιακού αποστακτήρα

Οι απώλειες στο πίσω μέρος του αποστακτήρα, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με ένα ικανοποιητικό πάχος μόνωσης και έτσι μπορούν να αμεληθούν στην παρούσα ανάλυση.

Το γυάλινο κάλυμμα μεταφέρει θερμότητα στην ατμόσφαιρα με αγωγή και ακτινοβολία. Διαρροές αέρα και πλευρικές απώλειες αμελούνται επίσης σ' αυτή την μελέτη.

## 5.3 ΗΛΙΑΚΟΙ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΕΣ

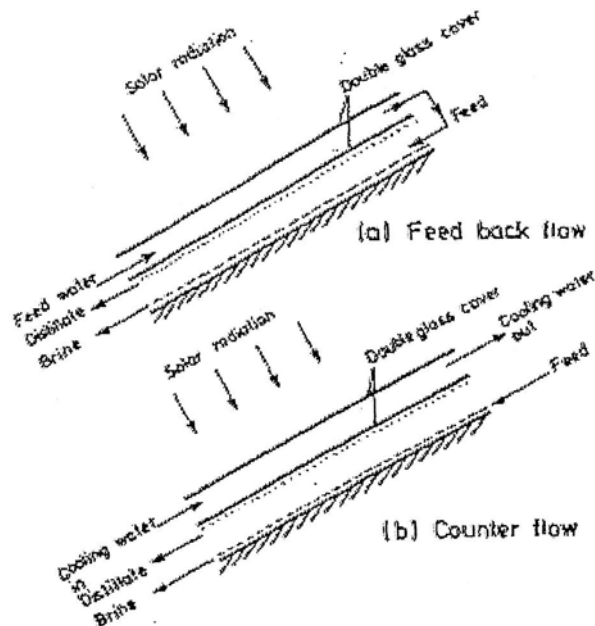
### 5.3.1 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΛΕΚΑΝΗ

#### 5.3.1.1 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΗΣ ΚΛΙΣΗΣ

Υπάρχουν δύο τύποι συσκευών. Ο πρώτος είναι αυτός που έχει μόνο μία πλευρά, δηλαδή μονή κλίση και ο άλλος τύπος που έχει διπλή κλίση γιατί έχει δύο πλευρές. Ο λόγος δημιουργίας του συλλέκτη διπλής κλίσης έχει να κάνει με την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της μέρας, στην προσπάθεια εκμετάλλευσης της μέγιστης δυνατής ηλιακής ακτινοβολίας. Η συσκευή μονής κλίσης έχει όμως λιγότερες απώλειες συναγωγής και ακτινοβολήσης προς το περιβάλλον.

#### 5.3.1.2 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΨΥΧΟΜΕΝΟ ΚΑΛΥΜΜΑ

Ο σκοπός δημιουργίας αυτής της παραλλαγής είναι να αυξήσει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της λεκάνης και του γυάλινου καλύμματος. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους. Είτε με μείωση της θερμοκρασίας του γυάλινου καλύμματος, είτε με αύξηση της θερμοκρασίας της λεκάνης είτε και με τα δύο ταυτόχρονα. Οι δύο βασικές υλοποιήσεις της ιδέας είναι αυτές που φαίνονται στο **Σχήμα 5.4** και χρησιμοποιούν είτε τη λεγόμενη μέθοδο της επανατροφοδότησης, είτε τη μέθοδο της αντίθετης ροής.



Σχήμα 5.4 Ψύξη γυάλινου καλύμματος με (α) επανακυκλοφορία, (β) αντίθετη ροή.

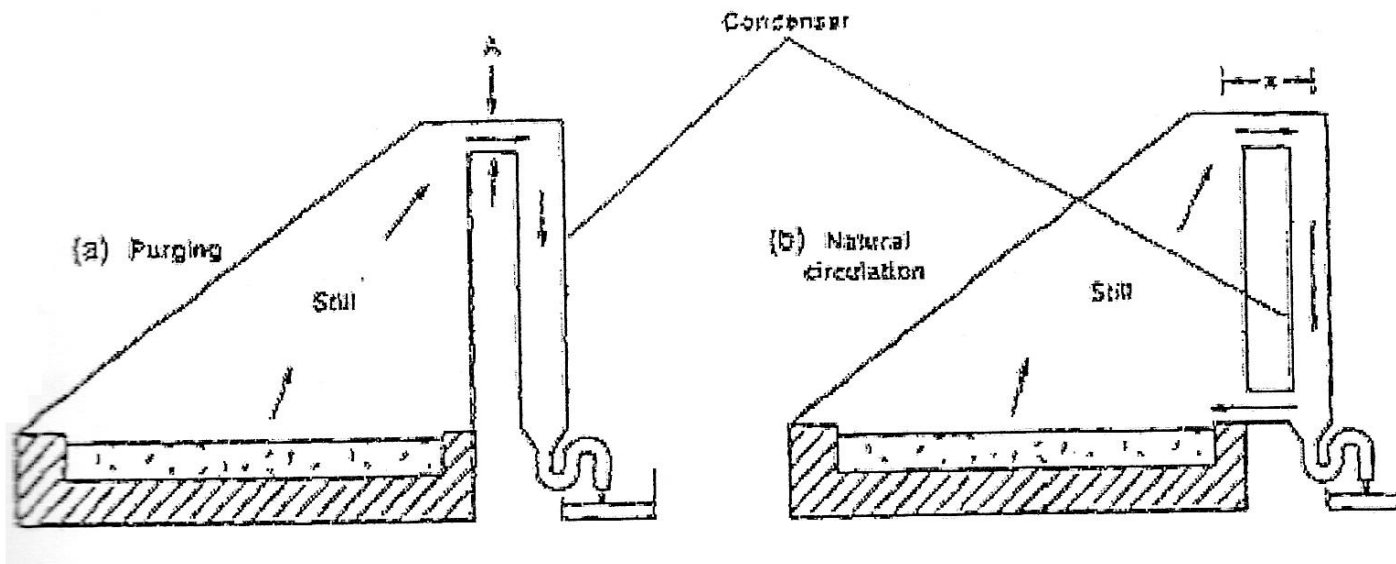
#### 5.3.1.3 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ

Γίνεται χρήση κάποιων ουσιών, όπως υδροφθορικό οξύ για την επεξεργασία της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος. Αυτές οι ουσίες αυξάνουν την ποσότητα υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει το κάλυμμα, ενώ παράλληλα επιτρέπουν την επιπλέον μείωση της ελάχιστης επιτρεπόμενης κλίσης αυτού. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η παραγωγική ικανότητα της συσκευής.

#### 5.3.1.4 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΜΕ ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ

Μια άλλη προσπάθεια βελτίωσης της κλασικής συσκευής είναι η προσθήκη ενός πρόσθετου συμπυκνωτή παθητικού τύπου στη σκιερή πλευρά του ηλιακού αποστακτήρα. Στο **Σχήμα 5.5** φαίνεται η εν λόγω διάταξη.





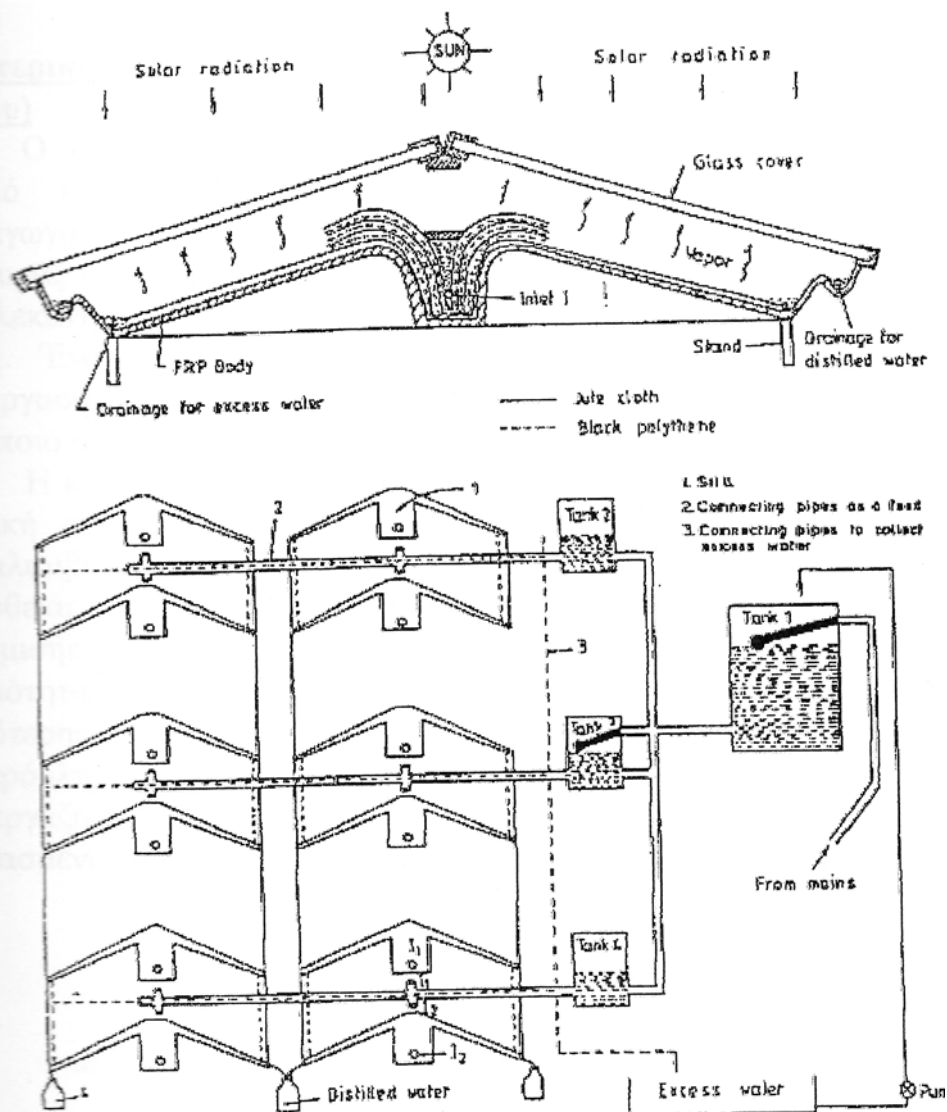
Σχήμα 5.5 Μονής κλίσης αποστακτήρας με παθητικό συμπυκνωτή.

### 5.3.2 ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ ΦΥΤΙΛΙΟΥ (WICK STILL)

Έχει τεκμηριωθεί, ότι η μείωση της ποσότητας άλμης που υπάρχει στη λεκάνη, οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής εξαπίας κυρίως της μεγαλύτερης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στη λεκάνη. Το πλεονέκτημα αυτής της σχεδίασης είναι ότι προσπαθεί να διατηρήσει τη στάθμη της άλμης σε όσο το δυνατόν πιο χαμηλά επίπεδα (άρα η άλμη θα έχει μικρή θερμοχωρητικότητα), ενώ παράλληλα θα γίνεται προσπάθεια να μην υπάρχουν στεγνά σημεία. Αυτού του τύπου οι συσκευές συναντώνται σε τρεις μορφές:

- Μονοφύπλος αποστακτήρας (single wick still)
- Πολυφύπλος αποστακτήρας (multi wick still)
- Συνδυασμός αποστακτήρα φυτίλι-λεκάνη (wick-basin still).

Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται ένας πολυφύπλος αποστακτήρας.



Σχήμα 5.6 Διπλής κλίσης πολυφύλλος αποστακτήρας. Πάνω: Τομή. Κάτω: Σχεδιάγραμμα μονάδας απόσταξης.

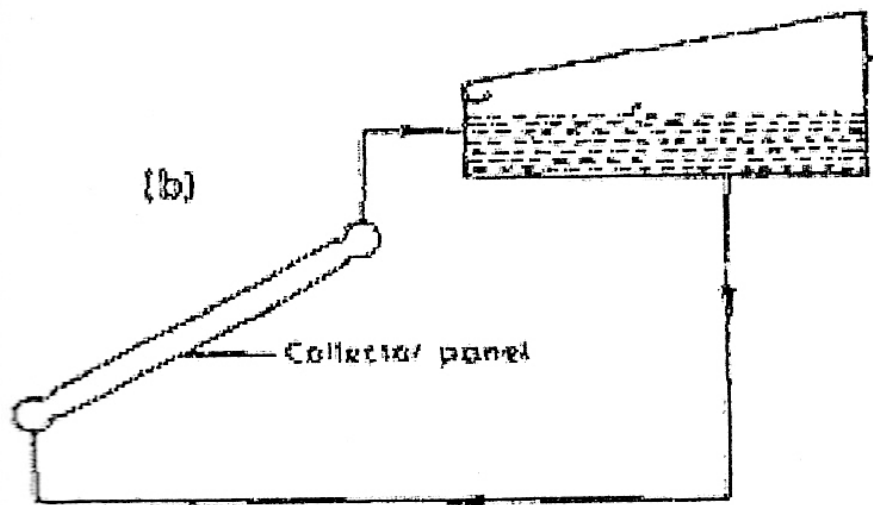
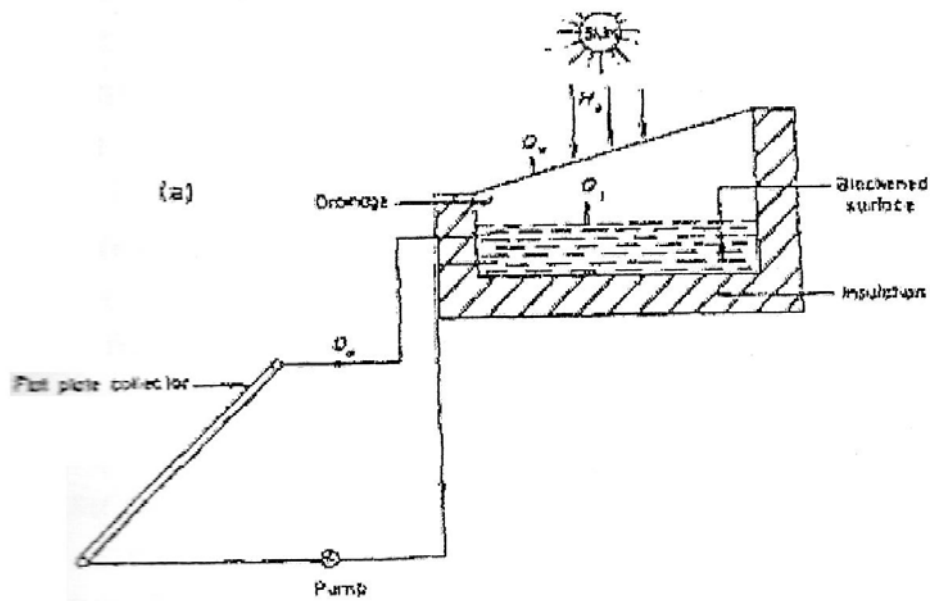
### 5.3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Πολλές φορές στην κορυφή θερμοκηπίων, ενσωματώνεται μια συσκευή ηλιακής αφαλάτωσης. Ο σκοπός αυτής της κίνησης είναι η εξουδετέρωση κατά το δυνατόν της θερμικής φόρτισης του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα προμηθεύεται με καθαρό νερό για τις ανάγκες των κηπευτικών.

### 5.3.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ (ΕΝΕΡΓΟΥ ΤΥΠΟΥ)

Ο κύριος στόχος αυτών των συσκευών είναι να βελτιώσουν τον ρυθμό εξάτμισης του νερού και κατά συνέπεια την συνολική παραγωγικότητα της διεργασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με διεύρυνση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ λεκάνης και καλύμματος. Η θερμοκρασία της λεκάνης μπορεί να αυξηθεί με επιπρόσθετη θέρμανση από εξωτερική πηγή. Ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μπορεί να επιτευχθεί αν συνεργαστεί η συσκευή ηλιακής αφαλάτωσης με κάποιον ηλιακό συλλέκτη ή κάποιο σύστημα συγκομιδής της απορριπτόμενης θερμότητας.

Η κυκλοφορία μέσα στον συλλέκτη μπορεί να γίνεται είτε με φυσική ροή είτε με τη βοήθεια κάποιων αντλιών. Η θερμότητα που παραλαμβάνεται από τον εξωτερικό συλλέκτη μπορεί να διοχετεύεται απευθείας στη συσκευή ηλιακής αφαλάτωσης για να αυξηθεί ο ρυθμός εξάτμισης ή να διοχετεύεται με έμμεσο τρόπο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Η άμεση προσφορά της θερμότητας έχει το πλεονέκτημα της καλύτερης απόδοσης, ενώ η έμμεση προστατεύει καλύτερα τη συσκευή από το πρόβλημα της διάβρωσης. Στο Σχήμα 5.7 φαίνονται δύο συσκευές που συνεργάζονται με συλλέκτη. Μια είναι φυσικής και η άλλη είναι βεβιασμένης κυκλοφορίας.



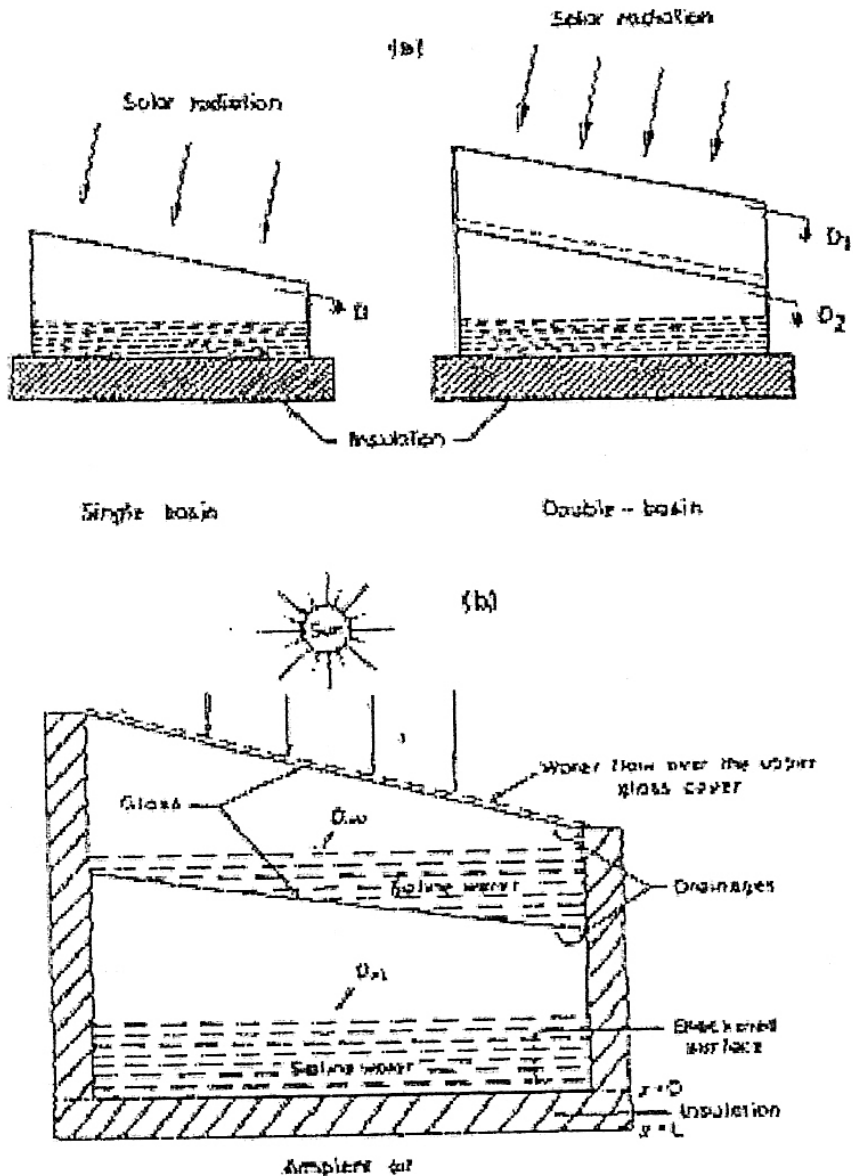
Σχήμα 5.7 Αφαλάτωση με συλλέκτη.(a). Βεβιασμένης κυκλοφορίας. (b). Φυσικής κυκλοφορίας

### 5.3.5 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΡΑΣΗΣ (MULTI EFFECT)

Η παραγωγικότητα των συσκευών ηλιακής αφαλάτωσης, μπορεί να βελτιωθεί αν χρησιμοποιηθεί η λανθάνουσα θερμότητα από τη συμπύκνωση του ύδατος. Αυτή η διαδικασία της επαναχρησιμοποίησης της λανθάνουσας θερμότητας σε δύο ή περισσότερα στάδια, καλείται multi effect distillation. Η κατηγοριοποίηση των συσκευών ηλιακής αφαλάτωσης πολλαπλής δράσης ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με αυτή του απλού τύπου.

### 5.3.6 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΛΕΚΑΝΗ

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι το νερό στη δεύτερη λεκάνη μπορεί να κυλά πάνω από το γυάλινο κάλυμμα ή να είναι στατικό μέσα στη λεκάνη. Και οι δύο αυτές περιπτώσεις φαίνονται στο Σχήμα 5.8.

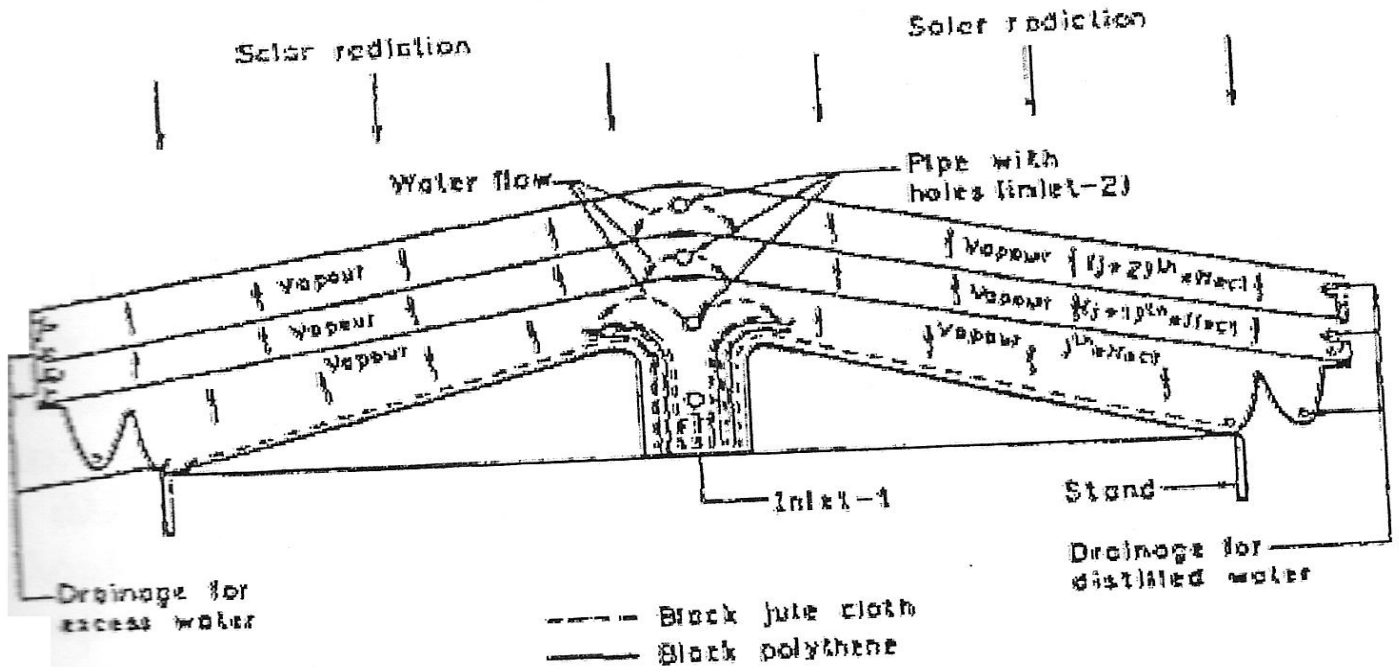


**Σχήμα 5.8 Ηλιακοί αποστακτήρες διπλής λεκάνης. (α) αποστακτήρα μονής και διπλής λεκάνης (β) Σταθερός αποστακτήρας διπλής λεκάνης με ρέον ύδωρ στην πάνω του βάση.**

Για μεγαλύτερη ημερήσια παραγωγή πρέπει όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση η θερμοκρασιακή διαφορά λεκάνης – καλύμματος να είναι μεγάλη. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με τη σύνδεση της λεκάνης με κάποια πηγή θερμότητας, όπως είναι ένας ηλιακός συλλέκτης ή κάποιο σύστημα εκμετάλλευσης της θερμότητας αποβλήτων. Επιπρόσθετα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η ροή ύδατος πάνω από το γυάλινο κάλυμμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τις βραδυνές ώρες καλό είναι ο ηλιακός συλλέκτης να μην είναι συνδεδεμένος με τη συσκευή ηλιακής αφαλάτωσης για να αποφευχθεί η ροή θερμότητας από τη λεκάνη προς το συλλέκτη.

### 5.3.7 ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΠΟΛΥΦΥΤΙΛΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ

Σ' αυτή την περίπτωση αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η ροή του νερού δεν θα πρέπει να είναι πολύ υψηλή πάνω από το γυάλινο κάλυμμα, γιατί τότε δεν θα υπάρχει αρκετός χρόνος εξάτμισης. Επομένως για τη μέγιστη δυνατή απόδοση, αυτή η ροή του νερού πάνω από το γυάλινο κάλυμμα πρέπει να μένει κάτω από κάποια ορισμένη τιμή. Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται σε τομή μια τέτοια συσκευή ηλιακής αφαλάτωσης.



Σχήμα 5.9 CROSS SECTION OF MULTI-EFFECT, MULTI-WICK STILL

### 6.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

Ηλιακή αφαλάτωση θεωρείται ένα σύστημα αφαλάτωσης, το οποίο χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας για την λειτουργία του, την ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα είτε έμμεσα. Άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται στους ηλιακούς αποστακτήρες, όπου μια ποσότητα νερού θερμαίνεται απ' ευθείας από την ηλιακή ακτινοβολία, εξατμίζεται και στη συνέχεια οι σχηματιζόμενοι ατμοί συμπυκνώνονται σε αφαλατωμένο νερό. Πρόκειται, δηλαδή για ένα παθητικό σύστημα ηλιακής εφαρμογής. Η έμμεση χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας, προϋποθέτει τη μετατροπή της σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Συνήθως σε θερμική ή ηλεκτρική, ικανή να τροφοδοτήσει ένα συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης. Η άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται σε συσκευές που ονομάζονται «ηλιακοί αποστακτήρες» (solar stills). Η αντίστοιχη μέθοδος καλείται «ηλιακή απόσταξη» (solar distillation).

Η αφαλάτωση που πραγματοποιείται με έμμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας, ονομάζεται «ηλιο-προωθούμενη» (solar assisted) ή «ηλιακά κινούμενη» (solar driven) αφαλάτωση.

Οποιοδήποτε σύστημα συμβατικής αφαλάτωσης συνδέεται με ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας. Διακρίνονται οι εξής τεχνολογίες θερμικής αφαλάτωσης:

- Η «Εξάτμιση Πολλαπλών Βαθμιδών» (Multiple Stage Flash-Distillation ή MSF)
- Η «Εκρηκτική Εξάτμιση» (Multiple Effect Distillation ή MED)
- Η «Θερμική Επανασυμπύεση Ατμών» (Vapor Compression ή VC)
- Η θερμική αφαλάτωση αφορά ηλιακά συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ατμό ή θερμό νερό.

Άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης, διαφορετικές της θερμικής είναι οι ακόλουθες:

- Η «Μηχανική Επανασυμπύεση Ατμών» (Mechanical Vapor Compression ή MVC)
- Η «Αντίστροφη Ωσμωση» (Reverse Osmosis ή RO)
- Η «Ηλεκτροδιάλυση» (Electrodialysis ή ED)

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι αφαλάτωσης αφορούν τη μηχανική αφαλάτωση η οποία συνδέεται με συστήματα που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Με αυτά τα συστήματα δεν θα καταπιαστεί η παρούσα εργασία, παρά μονάχα με τα ηλιακά συστήματα αφαλάτωσης. Τα μηχανικά συστήματα αφαλάτωσης αναφέρονται ενδεικτικά.

Τόσο η συμβατική ηλιακή απόσταξη όσο και τα συστήματα αφαλάτωσης με ηλιακή κίνηση, λειτουργούν με συνθήκες ασταθούς λειτουργίας, εφόσον εξαρτώνται από την ημερήσια ένταση και διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας και γενικά τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Σε ελάχιστες περιπτώσεις είναι δυνατή θερμική αποθήκευση μικρής χρονικής διάρκειας.

Η αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια, άμεση ή έμμεση, έχει βρει εφαρμογή σε:

- Μονάδες μικρής παροχής
- Απόμακρες ή ερημικές άγονες ή ημιάγονες περιοχές, όπου διαθέτουν άφθονο θαλασσινό ή αλμυρό νερό, ενώ στερούνται σε καύσιμα και ηλεκτρική ενέργεια.

Οι περιοχές αυτές ανήκουν στη λεγόμενη «ευήλιο ζώνη», όπου η ακτινοβολία είναι έντονη, ενώ το ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης μηδαμινό. Τέτοιες χαρακτηριστικές περιοχές είναι τα ελληνικά νησιά όπως η νήσος Ναξος, όπου θα μελετηθεί παρακάτω.

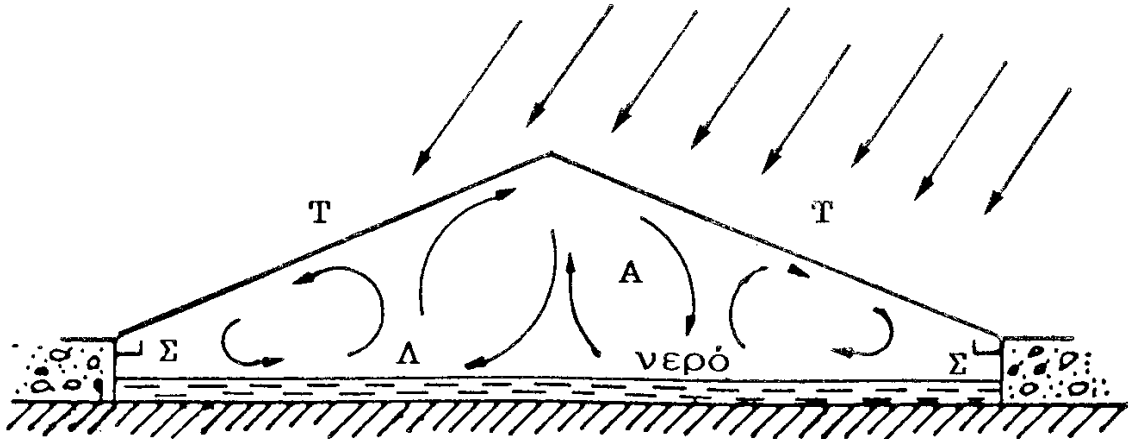
Απόμακρες κοινότητες υπάρχουν επίσης στην ενδοχώρα των ηπειρωτικών περιοχών. Η μεταφορά καυσίμων σε αυτές τις περιοχές έχει υψηλό κόστος, ενώ οι πηγές νερού είναι συνήθως υφάλμυρες ή αλμυρές.

Η εκλογή της μεθόδου αφαλάτωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως π.χ. από την ζητούμενη παροχή, από τις τοπικές δυνατότητες της αγοράς, όπως και από το αν ζητείται ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση της κοινότητας.

## 6.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΠΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ

Οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι απλές συσκευές. Κατασκευάζονται εύκολα και τοποθετούνται επίσης εύκολα σε οποιαδήποτε επίπεδη ή κεκλιμένη επιφάνεια, ανάλογα με τον τύπο του αποστακτήρα. Αποτελούνται στην απλούστερη μορφή τους από μια λεκάνη, η οποία περιέχει το προς εξάτμιση νερό και από ένα διαφανές κάλυμμα, το οποίο επιτρέπει τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Διαφανές κάλυμμα και λεκάνη σχηματίζουν έναν αεροστεγή χώρο, όπου λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες της εξάτμισης και συμπύκνωσης.

Στο **Σχήμα 6.1** δίνεται η μορφή ενός ηλιακού αποστακτήρα του τύπου θερμοκηπίου (greenhouse type), δηλαδή με το διαφανές κάλυμμα σε ισόπλευρη διάταξη.



**Σχήμα 6.1** Ηλιακός αποστακτήρας τύπου θερμοκηπίου. Τ είναι το διαφανές κάλυμμα, Α η λεκάνη που περιέχει το νερό και Σ τα κανάλια συλλογής του αποστάγματος.

Η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται μέσα από το διαφανές κάλυμμα Τ και απορροφάται από τη μάζα του νερού στη λεκάνη Α. Η βάση της λεκάνης καλύπτεται από ένα λεπτό υλικό, συνήθως μαύρο, το οποίο έχει μεγάλη απορροφητικότητα ως προς την ηλιακή ακτινοβολία.

Ως απορροφητικά χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά, όπως:

- Μαύρο χρώμα
- Μαύροι τάπητες από ελαστικό ή διάφορα πλαστικά υλικά
- Ειδικές κατεργασίες της επιφάνειας της λεκάνης εφ' όσων αυτή είναι μεταλλική
- Συχνά, σαν φθινό υλικό, χρησιμοποιείται τάπητας λινάτσας εμποτισμένης με άσφαλτο.

Το στρώμα του νερού συχνά διαφέρει ως προς το πάχος. Λεπτή στοιβάδα νερού θερμαίνεται γρήγορα και κατά τις ώρες της μείζονος ακτινοβολίας εξάτμιζεται εξ' ίσου γρήγορα αφήνοντας μια λεπτότατη στοιβάδα νερού, η οποία ψύχεται ταχύτατα κατά τη δύση του ήλιου, όταν η ακτινοβολία ελαττώνεται σημαντικά, σταματώντας την εξάτμιση. Αντίθετα όταν το πάχος της στοιβάδας του νερού είναι σημαντικό, εξάτμιζεται μόνο μικρό ποσοστό της συνολικής του μάζας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του διατηρεί την αισθητή θερμότητα που έχει συλλεχθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας, επιτρέποντας έτσι τη συνέχιση της εξάτμισης, με σταδιακά ελαττούμενη ταχύτητα, και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επομένως, η ρύθμιση του πάχους της στοιβάδας του νερού, επιτρέπει μια μερική αποθήκευση ενέργειας.

Μέσα στον αποστακτήρα, η θερμοκρασία του νερού είναι υψηλότερη από αυτή του διαφανούς καλύμματος Τ. Συνήθως η θερμοκρασία του νερού κυμαίνεται από 50°C έως 70°C, ενώ τις ώρες της μείζονος ακτινοβολίας και εφ' όσων το υδάτινο στρώμα είναι λεπτό, φθάνει έως 90°C.

Στον ελεύθερο χώρο Α, κάτω από το κάλυμμα Τ σχηματίζονται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας νερού-καλύμματος, ρεύματα από μίγμα ατμών και αέρα. Το μίγμα ακριβώς κάτω από το κάλυμμα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία και είναι ακόρεστο σε υδρατμούς, ενώ στην επιφάνεια του νερού η θερμοκρασία του μίγματος είναι υψηλότερη, έχει μικρότερη

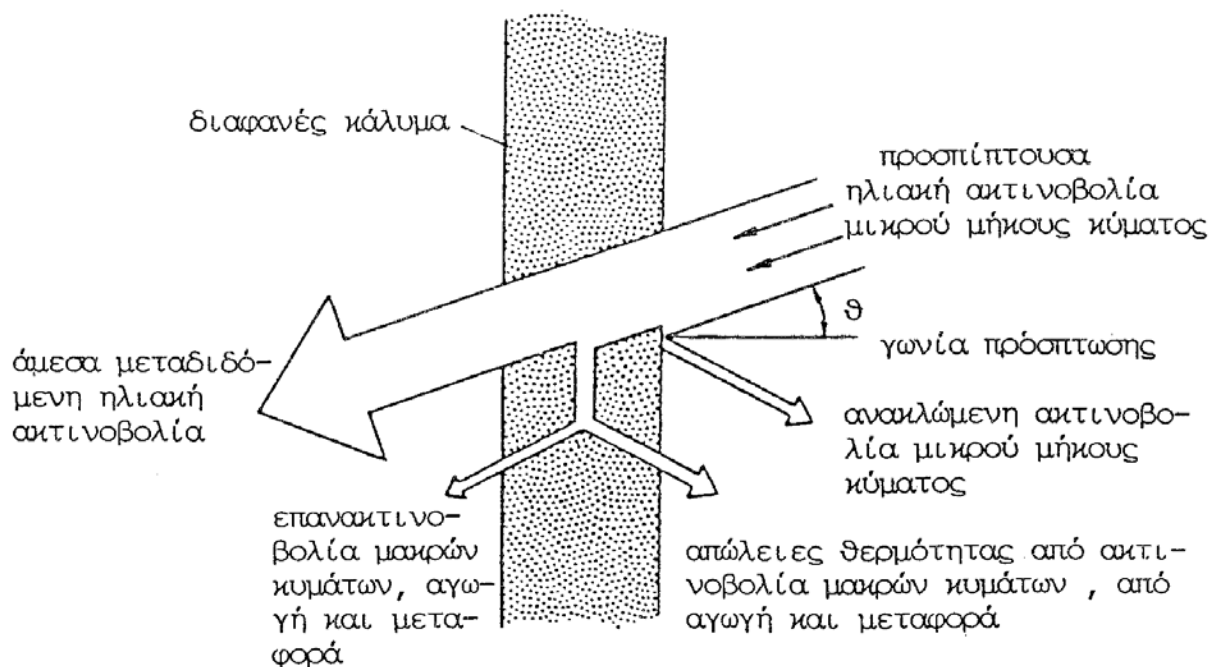
πυκνότητα και είναι κορεσμένο σε υδρατμούς. Αυτό δημιουργεί ανοδικά ρεύματα, του κορεσμένου σε υδρατμούς θερμού μίγματος, προς την επιφάνεια του καλύμματος όπου το μίγμα ψύχεται και μέρος των υδρατμών συμπυκνώνεται, ενώ το υπόλοιπο μίγμα αντιστρέφει την πορεία του και κινείται προς την επιφάνεια του νερού.

Το συμπύκνωμα των ατμών σχηματίζει ένα λεπτό υμένα στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος, το οποίο ρέει προς τα κανάλια συλλογής Σ, όπου συλλέγεται ως αφραλατωμένο νερό.

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος και επιφάνειας του νερού, τόσο ενονότερος είναι ο σχηματισμός των ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων και επομένως η παραγωγή αποστάγματος είναι μεγαλύτερη. Συγχρόνως όμως, κατ' αναλογία, αυξάνουν και οι θερμικές απώλειες από τα διάφορα σημεία του αποστακτήρα.

Το διαφανές κάλυμμα αποτελείται είτε από γυαλί είτε από πλαστικό υλικό, το οποίο κατεργάζεται κατάλληλα ως προς την εσωτερική του επιφάνεια, ώστε να διαβρέχεται από το συμπύκνωμα. Πλαστικά υλικά τα οποία δεν διαβρέχονται από το συμπύκνωμα, σχηματίζουν στην επιφάνειά τους σταγόνες αφραλατωμένου νερού, οι οποίες μεγαλώνουν σε μέγεθος καθώς το συμπύκνωμα συσσωρεύεται και επαναφέρονται, καθιζόμενες λόγω βαρύτητας, στη λεκάνη Λ.

Στο **Σχήμα 6.2** δίνεται η κατανομή της ακτινοβολίας, η οποία προσπίπτει στο διαφανές γυάλινο κάλυμμα. Η άμεση ακτινοβολία απορροφάται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από τη μάζα του νερού και τη μαύρη επιφάνεια της λεκάνης, ενώ το υπόλοιπο αποτελεί τις διάφορες απώλειες.



**Σχήμα 6.2** Σχηματική παράσταση της κατανομής της ηλιακής ενέργειας κατά την πρόσπτωσή της, υπό γωνία  $\theta$ , στην κεκλιμένη επιφάνεια του διαφανούς καλύμματος ενός ηλιακού αποστακτήρα.



### 6.3 ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι γενικά συσκευές που λειτουργούν με χαμηλή απόδοση παρουσιάζοντας αρκετές θερμικές απώλειες.

Ο ισολογισμός της ενέργειας σε έναν ηλιακό αποστακτήρα, ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία μια αίθρια ημέρα δίνεται από εξισώσεις που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές. Εδώ θα δοθούν δύο πρότυπα εξισώσεων ισολογισμού της ενέργειας. Το πρώτο αναλύει την κατανομή της ενέργειας και το δεύτερο υπολογίζει τον ισολογισμό με βάση τους συντελεστές μετάδοσης της θερμότητας.

Η ποσότητα του παραγόμενου αποστάγματος είναι επίσης δυνατόν να προβλεφθεί και να υπολογιστεί από τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και ορισμένες παραμέτρους που καθορίζονται από τα κατασκευαστικά δεδομένα του αποστακτήρα.

Οι παράμετροι κατασκευής καθορίζουν το ύψος των διαφόρων απωλειών θερμότητας και ενέργειας. Στο **Σχήμα 6.3** δίνεται ο διασκορπισμός της ηλιακής ενέργειας  $I$ , η οποία προσπίπτει ανά ώρα στην διάφανη επιφάνεια του καλύμματος  $T$ . Ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας  $I_a$  ανακλάται στην επιφάνεια του γυαλιού και διασκορπίζεται στο περιβάλλον, ενώ ένα ποσοστό  $I_v$  απορροφάται από το γυαλί. Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας  $I$  η οποία εισέρχεται στο χώρο  $A$  του αποστακτήρα ανέρχεται σε  $I_t$ , όπου  $\tau$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του γυαλιού ή γενικά του διαφανούς καλύμματος.

Το νερό απορροφά ένα ποσό ενέργειας, το οποίο ανέρχεται σε  $a_w \cdot \tau \cdot I$ . Ένα μέρος αυτής της ενέργειας διατίθεται σαν θερμότητα για την ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού στη λεκάνη του αποστακτήρα. Το ποσό αυτό ανέρχεται σε  $C_w \cdot (dT_w / dt)$ , αποτελεί τις απώλειες οι οποίες κατανέμονται ως εξής:

- απώλειες που οφείλονται στην ανάκλαση από την επιφάνεια του νερού. Η ποσότητα αυτής της ενέργειας είναι:  $(1 - a_w) \cdot \tau \cdot I$ , και διαπερνά το γυαλί από μέσα προς το περιβάλλον όπου διασκορπίζεται.
- απώλειες από ακτινοβολία από την επιφάνεια του νερού προς την εσωτερική επιφάνεια του γυαλιού.
- απώλειες μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια του νερού προς την εσωτερική επιφάνεια του γυαλιού.
- απώλειες θερμότητας από την επιφάνεια του νερού προς την εσωτερική επιφάνεια του γυαλιού που οφείλονται στην θερμότητα που εκλείεται από την συμπύκνωση των ατμών
- απώλειες από τον πυθμένα του αποστακτήρα  $Q_b$

Σύμφωνα με το διάγραμμα Sankey, ο ολικός ισολογισμός της ηλιακής ενέργειας είναι:

$$a_g \cdot I + a_w \cdot \tau \cdot I = Q_{cgs} + Q_b + c_w \cdot (dT_w / dt) \quad [6.27]$$

ενώ ο ισολογισμός στην εσωτερική επιφάνεια του γυαλιού είναι:

$$Q_{cgs} = Q_{cwg} + Q_{rvg} + Q_{ewg} + a_g \cdot I, \quad [6.28]$$

όπου τα σύμβολα στις δύο εξισώσεις είναι:

$a_g, a_w$  : η απορροφητικότητα του γυαλιού και του νερού αντίστοιχα (-)

$\tau$  : ο συντελεστής διαπερατότητας του γυαλιού (-)

$I$  : η ολική ακτινοβολούμενη ηλιακή ενέργεια ( $kJ/h$ )

$C_w$  : η θερμοχωρητικότητα του νερού και του σκελετού του αποστακτήρα ( $kJ/K$ )

$(dT_w / dt)$  : η ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού στη μονάδα του χρόνου ( $K/h$ )

$Q_b$  : η θερμότητα η οποία διασκορπίζεται από την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού προς το περιβάλλον ( $kJ/h$ )

$Q_{cwg}$  : αποτελεί τη θερμότητα που χάνεται από μεταφορά μεταξύ της επιφάνειας του γυαλιού και του νερού ( $kJ/h$ )

$Q_{rvg}$  : η θερμότητα που ακτινοβολείται από την επιφάνεια του νερού προς αυτή του γυαλιού ( $kJ/h$ )

$Q_{ewg}$  : η θερμότητα η οποία μεταφέρεται από την επιφάνεια του νερού στην επιφάνεια του γυαλιού λόγω της συμπύκνωσης των ατμών ( $kJ/h$ )



Θερμικές απώλειες και απώλειες απεσταγμένου νερού από διαφυγές υδρατμών. Οι εξισώσεις [27] και [28], όπως δόθηκαν παραπάνω δεν είναι εύκολο να λυθούν, δίνουν όμως μια σαφή εικόνα, όπως το διάγραμμα 7B της κατανομής της ενέργειας σε έναν ηλιακό αποστακτήρα. Η λύση των εξισώσεων για ωριαία λειτουργία, γίνεται με την μέθοδο της δοκιμής και του λάθους και η ημερήσια απόλειψη αφυδατωμένου νερού υπολογίζεται γραφικά από διαγράμματα που χαράσσονται από μετρήσεις.

Ένας δεύτερος ισολογισμός θερμότητας βασισμένος στο νερό της λεκάνης  $\Lambda$  και ανά  $m^2$  μαύρης επιφάνειας, δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$(m \cdot c_p)w \cdot \frac{dT_w}{dt} = GT_c a - g_{ewg} - g_{rwg} - g_{cwg} - q_k \quad [6.29]$$

όπου είναι:

$q_k$  : η θερμότητα που χάνεται από αγωγή ( $j / s \cdot m^2$ )

ενώ οι δείκτες έχουν την ίδια έννοια όπως στις εξισώσεις [28] και [29].

Παρόμοια εξίσωση ισολογισμού στο διαφανές κάλυμμα δίνει:

$$g_{ewg} + g_{rwg} + g_{cwg} = q_{cga} + q_{rga} \quad [6.30]$$

Οι εξισώσεις [29] και [30] πρέπει να λύνονται συγχρόνως για την ίδια χρονική στιγμή καθ'όσον  $g_{ewg}$  δεν είναι γραμμική συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του καλύμματος και της λεκάνης. Επομένως οι θερμοκρασίες λεκάνης  $T_w$ , καλύμματος  $T_c$  και  $g_{ewg}$  βρίσκονται από τις προηγούμενες εξισώσεις ως συνάρτηση του χρόνου.

Η θερμότητα ακτινοβολίας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot a_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \quad [6.31]$$

Η εξίσωση [31] δίνει γενικά την μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών  $A_1$  και  $A_2$  που βρίσκονται σε θερμοκρασία  $T_1$  και  $T_2$ ,  $T_2 > T_1$  και έχουν συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  αντίστοιχα.  $F_{1,2}$  είναι ένας συντελεστής διαμόρφωσης ή συντελεστής εναλλαγής μεταξύ δύο επιφανειών  $A_1$  και  $A_2$ .

Στην περίπτωση, που οι δύο επιφάνειες  $A_1$  και  $A_2$  είναι παράλληλες και ίσες, όπως π.χ. στους επίπεδους συλλέκτες, ο συντελεστής  $F_{1,2}$  είναι ίσος προς την μονάδα και η εξίσωση [31] μετατρέπεται στην:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [6.32]$$

Εάν η επιφάνεια  $A_1$  περιβάλλεται από μία κατά πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια  $A_2$ , τότε η σχέση των δύο επιφανειών  $A_1/A_2$ , πλησιάζει το μηδέν και ο συντελεστής  $F_{1,2}$  την μονάδα. Οπότε η εξίσωση [32] γίνεται:

$$Q_1 = \varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad [6.33]$$

Αυτή η περίπτωση έχει ως συνέπεια την απορρόφηση όλης της ενέργειας που ακτινοβολείται από την μικρή επιφάνεια  $A_1$ , από την μεγάλη επιφάνεια η οποία συμπεριφέρεται σαν μαύρη επιφάνεια.

Για γυάλινες διαφανείς επιφάνειες, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$g_{rwg} = 0.96 \cdot (T_w^4 - T_g^4) \quad [6.34]$$

ενώ η θερμότητα  $q_k$ , η οποία χάνεται με αγωγή από το έδαφος και θπό την προϋπόθεση ότι το έδαφος έχει την

ίδια θερμοκρασία με το περιβάλλον, δίνεται από τη σχέση:

$$q_k = U_b \cdot (T_w - T_a) \quad [6.35]$$

Οι αντίστοιχοι συντελεστές της θερμικής ροής δίνονται από τις επόμενες εξισώσεις (6)

$$h_{ewg} = 9.15 \cdot 10^{-7} \cdot h_{cwg} \cdot (p_w - p_g) \cdot h_{fg} (T_w - T_g) \quad [6.36]$$

$$h_{cwg} = 0.884[(T_w - T_g) + \frac{p_w - p_g}{2016 - p_w} - T_w]^{0.33} \quad [6.37]$$

$$h_{rwg} = 0.96 \cdot (T_w^2 + T_g^2) \cdot (T_w + T_g) \quad [6.38]$$

$$U_{wa} = \left[ \frac{1}{U_{wg}} + \frac{1}{A_r \cdot U_{ga}} \right]^{-1} \quad [6.39]$$

$$U_{wg} = h_{ewg} + h_{cwg} + h_{rwg} \quad [6.40]$$

$$U_{ga} = h_{cgs} + h_{rgs} \quad [6.41]$$

Οι αντίστοιχοι συντελεστές μεταφοράς της θερμότητας με μεταφορά ή ακτινοβολία δίνονται από τις εξισώσεις:

$$h_{cgs} = h_{win} \cdot \frac{(T_g - T_a)}{(T_g - T_s)} \quad [6.42]$$

$$h_{rgs} = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_g^2 + T_s^2) \cdot (T_g + T_s) \quad [6.43]$$

όπου είναι:

$p_w$  : η τάση των ατμών του νερού στη λεκάνη  $\Lambda$  στην θερμοκρασία  $T_w$  (mmHg)

$p_g$  : η τάση των ατμών του νερού στη θερμοκρασία του καλύμματος  $T_g$  (mmHg)

$U_{wa}$  : ο ολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς μεταξύ νερού και περιβάλλοντος ( $W/m^2K$ )

$U_{wg}$  : ο ολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς μεταξύ νερού και καλύμματος ( $W/m^2K$ )

$U_{ga}$  : ο ολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος ( $W/m^2K$ )

$h_{win}$  : ο συντελεστής μεταφοράς από το νερό κατά την αρχή της λειτουργίας του αποστακτήρα ( $W/m^2K$ )

Εάν η εξίσωση [29] γραφτεί ως προς τους συντελεστές θερμικής μεταφοράς για ωριαία ακτινοβολία  $I$ , λαμβάνεται η επόμενη εξίσωση:

$$\frac{C_w}{A_w} \cdot \frac{dT_w}{dt} = T_c \cdot a \cdot I - U_{wa} \cdot (T_w - T_s) - U_b \cdot (T_w - T_a) \quad [6.44]$$

όπου είναι:

$A_w$  : η ελεύθερη οριζόντια επιφάνεια του νερού στη λεκάνη του αποστακτήρα ( $m^2$ )

$C_w$  : η θερμοχωρητικότητα της λεκάνης  $\Lambda$  του αποστακτήρα με το νερό (JK)

$I$  : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ )

$T_c \cdot a$  : η οπτική απόδοση του αποστακτήρα (-)

$T_a$  : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K)

$T_s$  : η θερμοκρασία του ουρανού, ισοδύναμη προς μαύρη επιφάνεια (K)

$U_{wa}$  : συντελεστής ολικής θερμικής ροής μεταξύ νερού και περιβάλλοντος ( $W/m^2K$ )

$U_b$  : συντελεστής θερμικής μεταφοράς από τον πυθμένα και τις πλευρές του αποστακτήρα ( $W/m^2K$ )

Συστημάτων» σε έναν ασύμμετρο ηλιακό αποστακτήρα, όπως αυτός του σχήματος 9<sup>A</sup>, διαμορφώθηκε μια εξίσωση για τον υπολογισμό της ημερήσιας παραγωγής ενός αποστακτήρα. Από τα δεδομένα των μετρήσεων χημάκηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες και η ημερήσια λειτουργία χωρίστηκε σε τρεις φάσεις:

- 1<sup>η</sup> φάση: η έναρξη της λειτουργίας, π.χ. 6<sup>η</sup> έως 8<sup>η</sup> πρωινή, όπου τόσο η ακτινοβολία όσο και η απόσταση είναι χαμηλά
- 2<sup>η</sup> φάση: πρόκειται για φάση με φαινομενική σταθερή λειτουργία ή ψευδο-σταθερή κατάσταση (pseudo steady state), η οποία αφορά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, έως τις απογευματινές ώρες κοντά στη δύση του ηλίου.
- 3<sup>η</sup> φάση: κατά την οποία η απόσταση εξακολουθεί λόγω της αισθητής θερμότητας του νερού, ενώ τόσο η ποσότητα όσο και η θερμοκρασία του νερού ελαττώνονται ταχύτατα

Η εξίσωση, λοιπόν που διαμορφώθηκε δίνει τη μέση ημερήσια παραγωγή απεσταγμένου νερού ως συνάρτηση της ημερήσιας ακτινοβολίας και της μέσης θερμοκρασίας νερού και περιβάλλοντος. Η μέθοδος αυτή του προσδιορισμού της ημερήσιας παραγωγής για δωδεκάωρη λειτουργία, ονομάζεται μέθοδος «εισαγωγής-εξαγωγής».

Η γενική εξίσωση είναι:

$$M_{εξ} = F_1 \cdot H_d + F_2 \cdot (T_{ad} - T_{wd}) + F_3 \quad [6.45]$$

όπου τα σύμβολα είναι:

$H_d$  : η ημερήσια ακτινοβολία (MJ/m<sup>2</sup>)

$T_{ad}$  : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

$T_{wd}$  : η μέση ημερήσια θερμοκρασία του νερού στη λεκάνη του αποστακτήρα (K)

Οι συντελεστές  $F_1$  και  $F_2$  είναι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον αποστακτήρα και αναφέρονται στην απόδοση και στις απώλειες αντίστοιχα. Η παράμετρος  $F_3$  αναφέρεται στην ενεργειακή κατάσταση της φάσης 1 και χαρακτηρίζει την αδράνεια του αποστακτήρα. Οι τρεις παράμετροι  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_3$  είναι συναρτήσεις των θερμικών ιδιοτήτων του αποστακτήρα και υπολογίζονται παρακάτω.

Η ημερήσια παραγωγή αποστάγματος είναι δυνατόν να υπολογιστεί με ολοκλήρωση, για χρονική περίοδο μιας ημέρας, της εξίσωσης που εκφράζει την πυκνότητα της μαζικής ροής του συμπυκνώματος, δηλαδή της ενέργειας ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας γυάλινου καλύμματος που χρησιμοποιείται για την εξάτμιση:

$$\frac{Q_e}{A_g} = m \cdot h_{fg} = \frac{h_{ewg}}{U_{wg}} \cdot U_{wa} \cdot (T_w - T_a) \quad (W/m^2) \quad [6.46]$$

Η ολοκλήρωση της προηγούμενης εξίσωσης ως προς τον χρόνο δίνει:

$$M_{εξ} = A_g \cdot \frac{h_{cwg}}{h_{fg}} \cdot \frac{U_{wa}}{U_{wg}} \cdot \Delta t \cdot (\bar{T}_{wd} - \bar{T}_{ad}) \quad (kg/day) \quad [6.47]$$

όπου είναι:

$A_g$  : η επιφάνεια του γυαλιού στην οποία χρησιμοποιείται ποσότητα θερμότητας  $Q_e$  για την εξάτμιση (m<sup>2</sup>)

$Q_e$  : η ταχύτητα μεταφοράς της θερμότητας για την εξάτμιση (W)

$m$  : η πυκνότητα ροής του συμπυκνώματος (kg/m<sup>2</sup>s)

$h_{ewg}$  : ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας μεταξύ νερού και γυαλιού για συμπύκνωση (W/m<sup>2</sup>K)

$U_{wg}$  : ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας μεταξύ νερού και γυαλιού (W/m<sup>2</sup>K)

$U_{wa}$  : ο συνολικός συντελεστής της ανοδικής ροής της θερμότητας μεταξύ νερού και περιβάλλοντος (W/m<sup>2</sup>K)

$\Delta t$  : διαφορά χρόνου (s)

Εάν η εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας για χρονική περίοδο μιας ώρας, ολοκληρωθεί για την χρονική περίοδο της ψευδο-σταθερής κατάστασης και συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης με την εξίσωση [47], στην εξίσωση [45] λαμβάνονται οι τιμές των παραμέτρων  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_3$  ως:

$$F_1 = T_c \cdot a \cdot n_o \cdot \frac{A_g A_w}{C_w} \cdot \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \cdot \frac{U_{wa}}{U_{wg}} \cdot \Delta t \quad (\text{kg m}^2/\text{MJ}) \quad [6.48]$$

$$F_2 = (U_{wa} + U_{wg}) \cdot \frac{A_g A_w}{C_w} \cdot \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \cdot \frac{U_{we}}{U_{wg}} \cdot \Delta t \quad (\text{kg/K}) \quad [6.49]$$

$$F_3 = A_g \cdot \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \cdot \frac{U_{wa}}{U_{wg}} \cdot \Delta t_1 \cdot (T_{win} - T_{ain}) \quad (\text{kg}) \quad [6.50]$$

όπου  $\Delta t$  είναι η χρονική διάρκεια της φάσης 1,  $T_{win}$  η θερμοκρασία του νερού, κατά την έναρξη της φάσης 1 και  $T_{ain}$  η αντίστοιχη του περιβάλλοντος.

Η θερμοκρασία του νερού  $T_{win}$ , εκτός από τον προσδιορισμό της μέτρησης, υπολογίζεται θεωρητικά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{win} = T_{ain} + (T_{wf} - T_{an}) \cdot \exp\left[\frac{A_w}{C_w} \cdot (U_{wa} + U_{wg}) \cdot \Delta t_n\right] \quad (\text{K}) \quad [6.51]$$

όπου  $T_{wf}$  είναι η θερμοκρασία στο τέλος της 2<sup>ης</sup> φάσης κατά την προηγούμενη ημέρα και  $\Delta t_n$  είναι η διάρκεια της νύχτας.

## 6.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ

Οι ηλιακοί αποστακτήρες μίας βαθμίδας έχουν το σοβαρό μειονέκτημα, όπως άλλωστε όλες οι εγκαταστάσεις απόσταξης μίας βαθμίδας, της χαμηλής απόδοσης. Μαθηματικές αναλύσεις δίνουν μια καλή εικόνα της θερμοδυναμικής κατάστασης της μεθόδου και προσδιορίζουν ακριβώς τις διάφορες απώλειες με μεγάλη ακρίβεια, δεν έχουν όμως βοηθήσει στο να αυξηθεί πρακτικά η απόδοση των αποστακτιήρων σε μια ηλιακή εγκατάσταση αφαλάτωσης. Για να αυξηθεί η απόδοση, πρέπει να προσαχθεί εξωτερικά μια ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή προσφέρεται με χρησιμοποίηση είτε προθερμασμένου νερού είτε απορριπτόμενη ενέργεια σαν νερό τροφοδότησης.

Η προθέρμανση του νερού τροφοδότησης γίνεται είτε με χρήση ηλιακών συλλεκτών ή ηλιακών λιμνών. Ένας άλλος τρόπος είναι η συλλογή της βροχής, εφ' όσον υπάρχει, με κατάλληλη κατασκευή εξωτερικά των αποστακτιήρων, ώστε η βροχή να συλλέγεται σε κανάλια. Η συλλογή της βροχής αυξάνει την απόδοση σε νερό κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου η απόσταξη είναι χαμηλή.

Η απόδοση ενός ηλιακού αποστακτιήρα δίνεται από τη θερμότητα  $\Sigma Q_i$  που χρησιμοποιήθηκε για την εξάτμιση του νερού και στην συνέχεια συμπυκνώθηκε, για την παραγωγή  $m_d$  (kg) αποστάγματος, της ημερήσιας ακτινοβολίας.

$$n = \frac{\Sigma Q_\varepsilon}{\Sigma I_s} = \frac{\Sigma Q_\varepsilon}{H} = \frac{m_d \cdot h_{fg}}{H} \quad [6.52]$$

Η μέση απόδοση των αποστακτιήρων κυμαίνεται από 25% έως 40% κατά τους χειμερινούς μήνες και κατά 30% έως 60% κατά τους θερινούς μήνες.

Στην εξίσωση [6.50] δόθηκε ο συντελεστής  $F_3$  της απόδοσης ενός αποστακτιήρα ανά βαθμό ανύψωσης της θερμοκρασίας, ως συνάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων του νερού και των θερμικών συντελεστών μεταφοράς της θερμότητας.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας ηλιακός συλλέκτης για τη θέρμανση του νερού τροφοδότησης, τότε η απόδοση του αποστακτιήρα αυξάνει και στους υπολογισμούς ισολογισμού μάζας πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψην ότι η λειτουργία είναι συνεχής και ο ισολογισμός μάζας, για τον αποστακτιήρα μόνο σε λειτουργία, δίνεται:

$$I \cdot (1 - L_r) = \Sigma Q + m_d \cdot (T_c - T_f) + m_d \cdot (T_b - T_f) + \Sigma L_o \quad [6.53]$$

Για τον αποστακτιήρα με τον συλλέκτη, στον ισολογισμό πρέπει να ληφθούν υπ' όψην και οι σωληνώσεις που συνδέουν τις δύο συσκευές. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση [53] μετασχηματίζεται στην: (8)

$$m_c \cdot c_p \cdot (T_{\varepsilon\xi} - T_{\varepsilon\sigma}) = f \cdot A_c \cdot (\tau \cdot \alpha)_{\text{eff}} I - L_c \cdot (T_b - T_a) - (C_c - C_p) \cdot \frac{dT_b}{dt} - L_p \cdot A_p \cdot (T_b - T_a) \quad [6.54]$$

όπου είναι:

$T_{\varepsilon\xi}, T_{\varepsilon\sigma}$  : οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου στον συλλέκτη (K)

$m_d, m_b$  : η ροή της μάζας του αποστάγματος και της απορριπτόμενης άλμης (kg/m<sup>2</sup>s)

$T_f, T_b$  : οι θερμοκρασίες του νερού τροφοδότησης στον αποστακτιήρα και της απορριπτόμενης άλμης (K)

$T_c$  : η θερμοκρασία του καλύμματος (K)

$L_r$  : οι απώλειες θερμότητας που οφείλονται σε ανάκλαση (%)

$\Sigma L_o$  : το άθροισμα όλων των άλλων απωλειών (J/m<sup>2</sup>s)

$A_c, A_p$  : η αποτελεσματική επιφάνεια του συλλέκτη και των σωληνώσεων (m<sup>2</sup>)

$T_a$  : η θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

$(\tau \cdot \alpha)_{eff}$  : ο συντελεστής διαβίβασης-απορρόφησης του συλλέκτη (-)

$L_c, L_p$  : οι ολικές απώλειες θερμότητας στον συλλέκτη και στους σωλήνες ( $W/m^2 K$ )

$C_c, C_p$  : οι θερμοχωρητικότητες του συλλέκτη και των σωλήνων μαζί με το περιεχόμενο νερό (J/K)

$m_c$  : ροή μάζας του νερού στον συλλέκτη (kg/s)

$f$  : συντελεστής απόδοσης συλλέκτη (-)

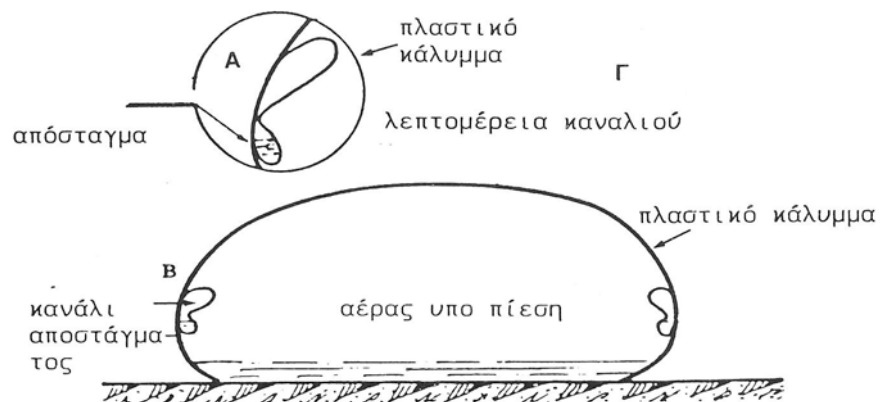
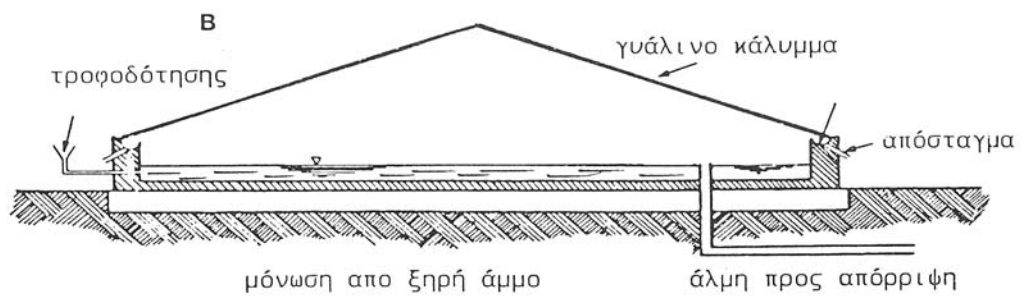
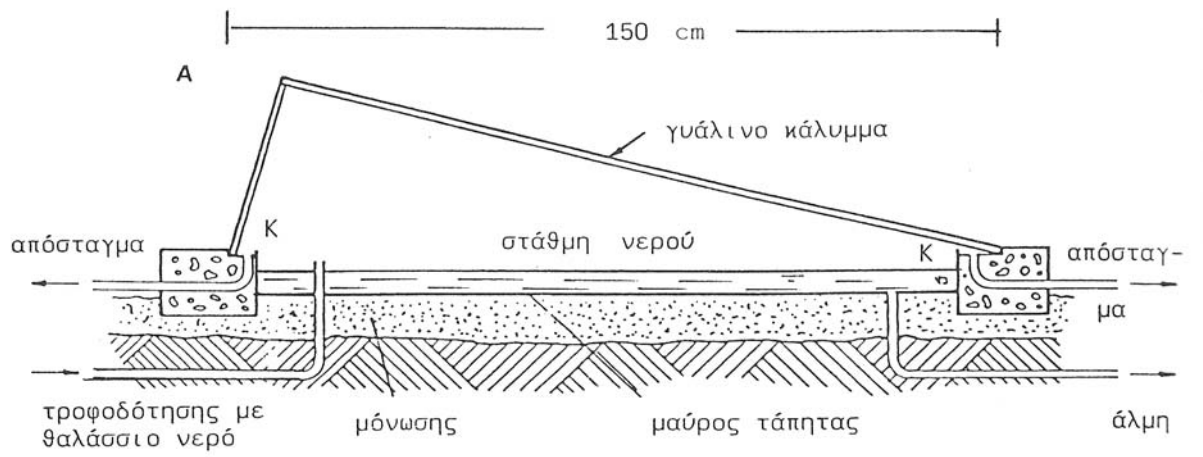
Διάφοροι άλλοι τρόποι έχουν χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της απόδοσης των αποστακτήρων, όπως π.χ. η τοποθέτηση σωληνώσεων στην εσωτερική πλευρά των ασύμμετρων αποστακτήρων. Μέσα στους σωλήνες κυκλοφορεί το νερό τροφοδότησης το οποίο θερμαίνεται από τους συμπυκνούμενους αμμούς. Αυτή η διάταξη προϋποθέτει συνεχή κυκλοφορία του νερού τροφοδότησης και απόρριψης της άλμης, με την αισθητή θερμότητα της οποίας απομακρύνεται σημαντικό ποσό ενέργειας. Από πολλά πειραματικά δεδομένα έχει αποδειχθεί ότι ουσιαστικά η μεν απόδοση δεν αυξάνει, ενώ αυξάνει το κόστος από την εγκατάσταση των σωληνώσεων και της αντλίας και επιπλέον το κόστος ενέργειας για την κίνηση της αντλίας.

Στα **σχήματα 6.4 και 6.5** δίνονται σχηματικά η διάταξη διάφορων αποστακτήρων.

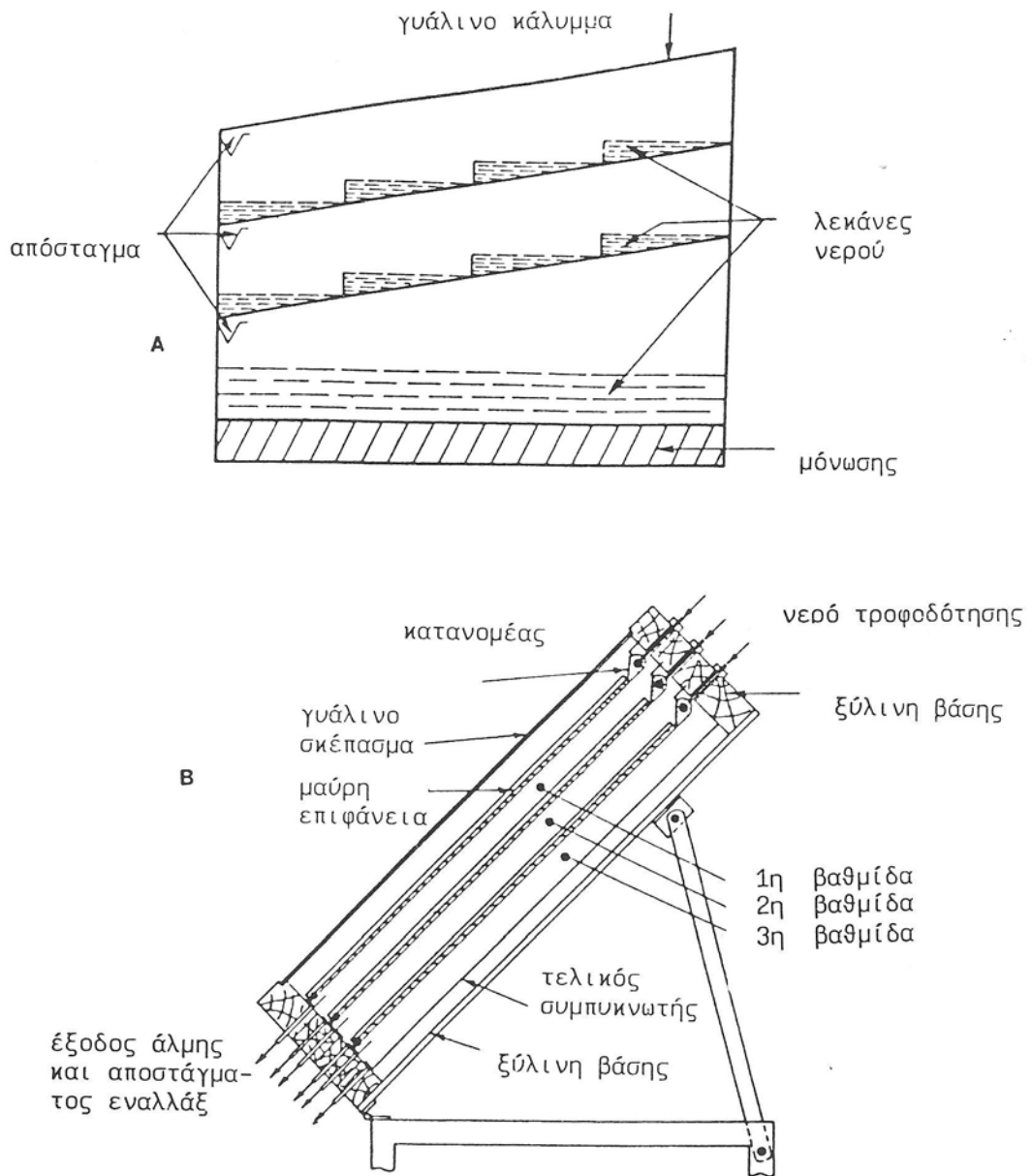
Στο **σχήμα 6.4A** δίνεται η μορφή ενός ασύμμετρου αποστακτήρα του τύπου που χρησιμοποιήθηκε στα ελληνικά νησιά. Το σχήμα **6.4B** δίνει τη διάταξη ενός αποστακτήρα του τύπου του θερμοκηπίου. Και στα δύο σχήματα έχουν σχεδιαστεί τα σημεία αποχέτευσης της άλμης και τροφοδότησης του αποστάγματος. Το σχήμα **6.4Γ** παριστάνει έναν ηλιακό αποστακτήρα με πλαστικό κάλυμμα, το οποίο «φουσκώνει» με την διοχέτευση αέρα υπό πίεση.

Στο **σχήμα 6.5** οι αποστακτήρες είναι πολλαπλών βαθμιδών με κεκλιμένη επιφάνεια οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις, μεγέθους pilot plant ή εργαστηριακά.





Σχήμα 6.4 Διάφοροι τύποι ηλιακών αποστακτήρων. Α: ασύμμετρος τύπος Ε.Μ.Π. όπως εφαρμόστηκε στα ελληνικά νησιά Β. Τύπος θερμοκηπίου Γ. με διαφανή επιφάνεια από πλαστικό



Σχήμα 6.5 Ηλιακοί αποστακτήρες κεκλιμένου επιπέδου A και B πολλαπλών βαθμίδων.

## 6.5 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ

Υπάρχουν πολλοί τύποι ηλιακών αποστακτήρων με διαφορετική διαμόρφωση κατασκευής, σε ημι-εμπορικά και εμπορικά μεγέθη. Τα περισσότερα είναι του συμμετρικού τύπου και θερμοκηπίου, ενώ υπάρχουν και ασύμμετρες κατασκευές όπως αυτή του σχήματος 9<sup>Α</sup>.

Η ασύμμετρη κατασκευή είχε μελετηθεί στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και βάσει του σχεδιασμού και των μελετών που έγιναν, κατασκευάστηκαν στα ελληνικά νησιά πέντε εγκαταστάσεις ηλιακών αποστακτήρων. Η ασύμμετρη κατασκευή προσανατολίζεται με την μεγάλη επιφάνεια γυαλιού προς τον νότο παρουσιάζοντας μεγαλύτερη διάρκεια πρόσπτωσης της ηλιακής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες άλλες κατασκευές οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε μικρότερη κλίμακα όπως αυτή του **σχήματος 6.59B**, η οποία αποτελείται εξ'ολοκλήρου από διαφανές πλαστικό το οποίο κρατείται τεντωμένο με τη διοχέτευση αέρα, με επανακυκλοφορία. Διάφορες άλλες κατασκευές αποβλέπουν στην αύξηση της απόδοσης, όπως π.χ. αποστακτήρες με καταιονισμό του νερού τροφοδότησης. Οι περισσότεροι έχουν μελετηθεί σε εργαστηριακό μέγεθος για την εξαγωγή θεωρητικών συμπερασμάτων και μαθηματικών μοντέλων.

Γενικά η ηλιακή απόσταση καταλαμβάνει μεγάλες επιφάνειες εγκατάστασης.

## 6.6 ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ

Αντίθετα με τις συμβατικές μεθόδους αφαλάτωσης η ηλιακή απόσταση έχει μικρό κόστος λειτουργίας, ενώ η ενέργεια παρέχεται χωρίς κόστος. Στις άλλες μεθόδους αφαλάτωσης, εκτός της ηλιακής απόσταξης, το μεγαλύτερο κόστος είναι αυτό της παραγωγής ενέργειας. Επομένως στην ηλιακή απόσταξη, το κόστος της επένδυσης και τα έξοδα που σχετίζονται με το κεφάλαιο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το κόστος της εγκατάστασης.

Η ολική επένδυση του κεφαλαίου σε συνδυασμό με τους τόκους επί του κεφαλαίου και το χρεωλύσιο, εξαρτώνται από τον ωφέλιμο χρόνο ζωής της εγκατάστασης και είναι οι παράμετροι που καθορίζουν το κόστος του παραγόμενου νερού.

Η C.S.I.R.O., Μελβούρνη, κατήρησε έναν πίνακα όπου δίνονται αναλυτικά όλα τα δεδομένα, τα οποία προσδιορίζουν το κόστος κατασκευής και λειτουργίας μιας ηλιακής εγκατάστασης απόσταξης. Τα δεδομένα είναι για εικοσαετή διάρκεια ζωής της ηλιακής εγκατάστασης.

Το κόστος υπολογίζεται και από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$C = \frac{10 \cdot K \cdot (IA + MR + TI) + 1000 \cdot (O \cdot c + C_s)}{A \cdot (Y_d + Y_c)} \quad [6.55]$$

όπου είναι:

$C$  : το κόστος του αφαλατωμένου νερού (\$/m<sup>3</sup>)

$K$  : επένδυση κεφαλαίου (\$)

$IA$  : μέσο ετήσιο τόκοι (%)

$MR$  : μέσο ετήσιο κόστος συντήρησης, επισκευών, εργατικών και υλικών (%)

$TI$  : χρεωλύσιο (%)

$O$  : ετήσια εργασία λειτουργίας (ανθρωπο-ώρες)

$c$  : κόστος εργατικών λειτουργίας (μισθοί) (\$)

$C_s$  : ολικό κόστος αλμιρού ή θαλάσσιου νερού (\$)

$A$  : η επιφάνεια του αποστακτήρα, βάση της οποίας υπολογίζεται η απόδοση (συνήθως η μαύρη επιφάνεια) (m<sup>2</sup>)

$Y_d$  : ετήσια απόδοση σε απεσταγμένο νερό (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

$Y_c$  : ετήσια απόδοση σε νερό βροχής εφ' όσων συλλέγεται (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

Ο μέσος ετήσιος τόκος και το χρεωλύσιο  $IA$  υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$IA = r \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\left( 1 + \frac{r}{100} \right)^{n-1}} \right] \quad [6.56]$$

όπου είναι:

$r$  : το ετήσιο επιτόκιο (%)

$n$  : η περίοδος εξόφλησης (έτη)

Η εξίσωση ισχύει για νερά με αλμυρότητα 5 έως 35 (g/kg).

## 6.7 ΗΛΙΟ-ΚΙΝΟΥΜΕΝΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

### 6.7.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η συμβατική αφαλάτωση, η οποία λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια, συνδέεται με μια εγκατάσταση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε μια χρησιμοποιήσιμη μορφή η οποία είναι είτε θερμότητα είτε ηλεκτρισμός.

Τα συστήματα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική περιλαμβάνουν:

ηλιακές λίμνες οι οποίες παράγουν ζεστό νερό ως 90°C

τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες οι οποίοι θερμαίνουν νερό ως 95°C

ηλιακούς συλλέκτες με σωλήνες κενού, οι οποίοι επιτυγχάνουν θερμοκρασίες, για το θερμαινόμενο υγρό, έως 200°C. Η πίεση στο εσωτερικό των σωληνώσεων είναι της τάξης των 0.133Pa

εστιαζόμενους συλλέκτες, οι οποίοι συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την εστιάζουν είτε σε ένα κεντρικό σωλήνα που κυκλοφορεί το θερμαινόμενο ρευστό είτε σε ένα κεντρικό λέβητα

Τα συστήματα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια, χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο συλλογής της ενέργειας:

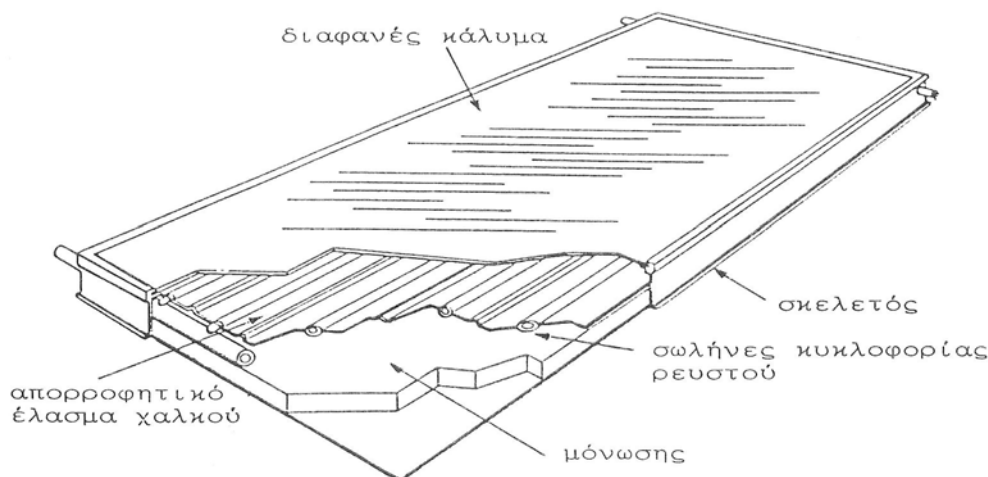
- Στα συστήματα διανομής, όπου κάθε μονάδα συμπυκνωτή της ηλιακής ενέργειας, εστιάζει την ακτινοβολία σε έναν δέκτη τοποθετημένη στην ζώνη εστίασης. Ένα υδραυλικό δίκτυο διανομής μεταφέρει το θερμαινόμενο υγρό από όλες τις μονάδες σε ένα κεντρικό σημείο αποθήκευσης.
- Στα συστήματα κεντρικής εστίασης, όπου ένα σύστημα από συλλέκτες με καθρέπτες, αντανακλά την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν κεντρικό συλλέκτη, όπου θερμαίνεται το προς χρήση ρευστό.

### 6.7.2 ΗΛΙΑΚΕΣ ΛΙΜΝΕΣ

Οι ηλιακές λίμνες είναι η απλούστερη μορφή των ηλιακών συλλεκτών. Μια ηλιακή λίμνη αποτελείται από μια μεγάλης έκτασης ρηχή λεκάνη, η οποία περιέχει αλμυρό νερό που θερμαίνεται κατά την διάρκεια της ημέρας από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τις νυκτερινές ώρες σκεπάζεται με ένα πλαστικό κάλυμμα ώστε να αποφεύγονται οι θερμικές απώλειες. Μια κατάλληλα ρυθμιζόμενη βάρθρωση της αλμυρότητας, εμποδίζει κατά την ημέρα την μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον. Αυτές οι λίμνες ονομάζονται «λίμνες βάρθρωσης άλατος» (salt gradient ponds).

Αποτελούνται από τρεις διάκριτες ζώνες, **Σχήμα 6.6**:





**Σχήμα 6.7 Τομή ενός επίπεδου συλλέκτη**

Η θερμοκρασία στην οποία φθάνει το νερό που κυκλοφορεί στα κανάλια είναι:

$$T = T_{\text{εισ}} + Q_u / A \cdot U \cdot F_r \cdot (1 - F_r / F') \quad [6.57]$$

ενώ η στιγμιαία απόδοση του είναι:

$$n = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{εξ}} - T_{\text{εισ}}) / G \cdot A \quad [6.58]$$

όπου είναι:

$Q$  : η ολική παραγόμενη ενέργεια από τον συλλέκτη (W)

$U$  : ο συντελεστής ολικής θερμικής μεταφοράς ( $W/m^2 \cdot K$ )

$F_r$  : συντελεστής θερμικής απομάκρυνσης (-)

$F'$  : συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη (-)

$A$  : η επιφάνεια του συλλέκτη ( $m^2$ )

$m$  : ταχύτητα ροής του νερού μέσα από κάθε κανάλι του συλλέκτη (kg/s)

$c_p$  : ειδική θερμότητα του νερού (J/kgK)

$G$  : η πυκνότητα ροής της ηλιακής ενέργειας ( $W/m^2$ )

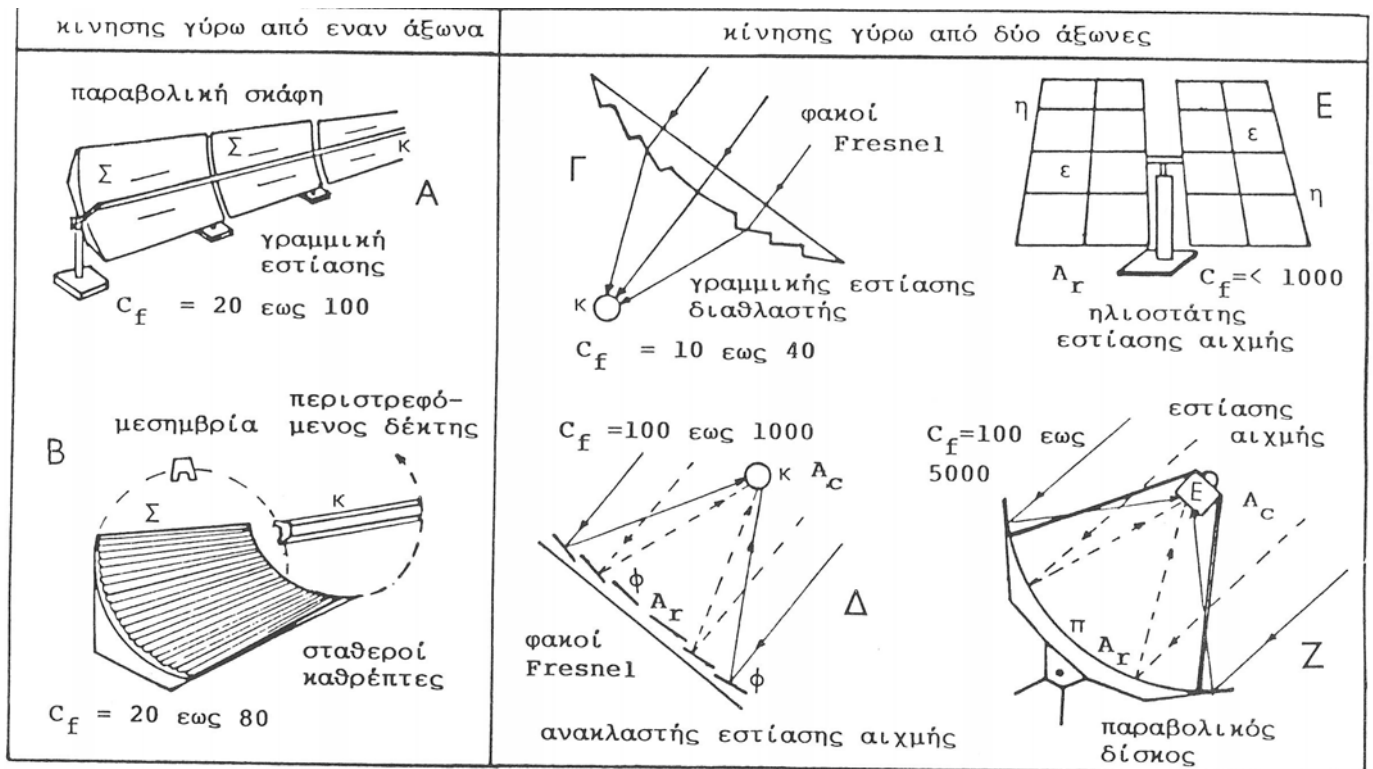
Οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν γενικά μεγαλύτερη απόδοση από τους ηλιακούς αποστακτήρες και μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους τροφοδοτώντας τους αποστακτήρες με ζεστό νερό. (13) Ο ισολογισμός της θερμότητας για την διαδικαστική λειτουργία αποστακτήρα-συλλέκτη, δόθηκε στην εξίσωση [28]. Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν και για τους συλλέκτες με σωλήνες κενού, οι οποίοι περιέχουν το απορροφητικό επίστρωμα της μαύρης επιφάνειας και διατηρούνται σε πίεση 0.133Pa.

Στο **Σχήμα 6.7** δίνεται η τομή ενός επίπεδου συλλέκτη, ενώ η φωτογραφία του Σχήματος 10 είναι μια εγκατάσταση συλλεκτών σωλήνων κενού.

#### 6.7.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες αποτελούνται από μια κατάλληλα διαμορφωμένη επιφάνεια, όπου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται με συγκλινόμενες ακτίνες, οι οποίες εστιάζονται σε ένα κεντρικό σημείο όπου κυκλοφορεί το θερμαινόμενο ρευστό.

Οι κυριότεροι τύποι των συγκεντρωτικών συλλεκτών δίνονται στο **Σχήμα 6.8**. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών: εκείνοι οι οποίοι εστιάζουν τις ακτίνες σε ένα γραμμικό σωλήνα (**Σχήμα 6.8Α και Β**) και αυτοί οι οποίοι τις εστιάζουν σε ένα κεντρικό σημείο ή αιχμή (line focus και point focus αντίστοιχα).



**Σχήμα 6.8** Σχηματική παράσταση διαφόρων τύπων συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

Τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών αποτελούν οι:

- Παραβολικές σκάφες, **6.8Α**, οι οποίες κινούνται γύρω από έναν άξωνα και ανακλούν την ακτινοβολία η οποία προσπίπτει στην σκάφη ε, εστιάζοντάς την σε έναν κεντρικό σωλήνα κ, όπου θερμαίνεται ένα ρευστό σε κυκλοφορία. Έχουν, δηλαδή γραμμική εστίαση.
- Παραβολικές σκάφες, **6.8Β**, οι οποίες αποτελούνται από λεπτές λωρίδες από καθρέπτες, τοποθετημένες σταθερά στη σκάφη, η οποία είναι ακίνητη.
- Φακοί Fresnel, οι οποίοι κινούνται γύρω από δύο άξωνες ακολουθώντας την ημερήσια και την εποχιακή πορεία του ήλιου. Υπάρχουν δύο τύποι φακών Fresnel:
  - ο αυτοί οι οποίοι διαθλούν τις ηλιακές ακτίνες, **σχήμα 6.8Γ**, και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε έναν κεντρικό σωλήνα κ ο οποίος βρίσκεται στο πίσω μέρος των φακών. Πρόκειται για φακούς γραμμικής εστίασης.
  - Εκείνοι οι οποίοι εστιάζουν την ακτινοβολία σε ένα σημείο κ, αντανακλώντας τις ακτίνες που προσπίπτουν στους φακούς φ, **σχήμα 6.8Δ**.
- Ηλιοστάτες, **6.8Ε**, οι οποίοι αποτελούνται από επίπεδους καθρέπτες ε, προσαρμοσμένους σε μια επίπεδη επιφάνεια η. Τοποθετημένες ανά δύο οι επίπεδες επιφάνειες, σχηματίζουν έναν ηλιοστάτη ο οποίος κινείται γύρω από δύο άξωνες, ανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία και εστιάζοντάς την σε έναν κεντρικό λέβητα. Οι ηλιοστάτες ανήκουν στα συστήματα κεντρικής εστίασης.
- Παραβολικοί δίσκοι, οι οποίοι αποτελούνται από παραβολικά κάτοπτρα και εστιάζουν την ανακλώμενη στο δίσκο π ακτινοβολία, συγκεντρώνοντάς την στο σημείο Ε. Κινούνται γύρω από δύο άξωνες, **6.8Ζ**. Οι τύποι των συγκεντρωτικών συλλεκτών παρέχουν είτε ζεστό νερό είτε ατμό μέσης ή υψηλής θερμοκρασίας.

Στο **Σχήμα 6.8**, ο συντελεστής  $C_f$  είναι ο συντελεστής συγκέντρωσης, ο οποίος δίνει το βαθμό της συμπίκνωσης της ηλιακής ενέργειας και δίνεται από την εξίσωση:

$$C_f = A_c / A \quad [6.59]$$

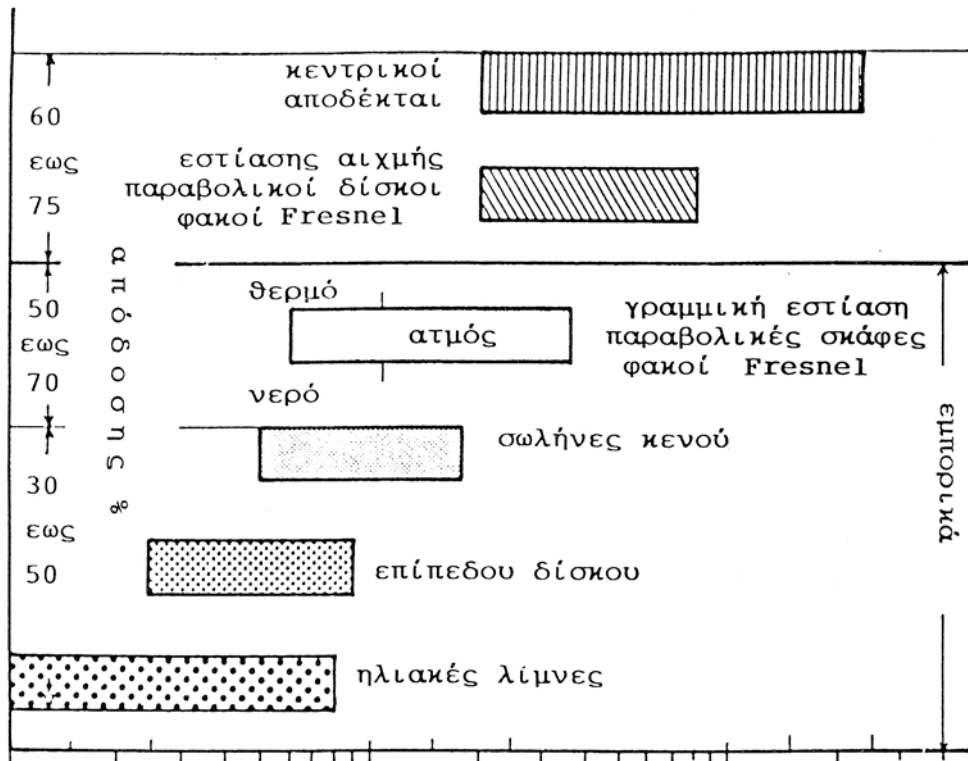
όπου:

$A_c$  : η επιφάνεια συγκέντρωσης της ακτινοβολίας ( $m^2$ )

$A_r$  : η επιφάνεια πρόσπτωσης της ηλιακής ενέργειας ( $m^2$ )

Το ζεστό νερό και ο ατμός υψηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιούνται κυρίως για θερμομηχανικούς σκοπούς στην βιομηχανία, για την θέρμανση χώρων και σε μικρότερη κλίμακα στην αφαλάτωση.

Ο ατμός υψηλότερης θερμοκρασίας, όπως αυτός των συστημάτων κεντρικής εστίασης, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

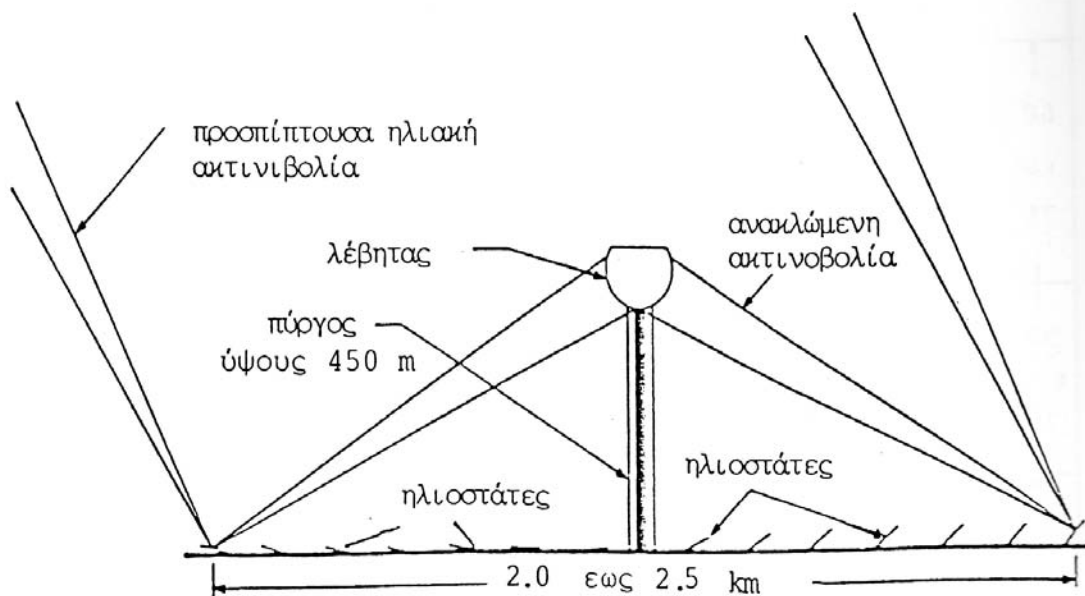


**Σχήμα 6.9** Περιοχές των θερμοκρασιών λειτουργίας των διαφόρων ηλιακών συλλεκτών και η αντίστοιχη απόδοσή τους.

Στο **Σχήμα 6.9** δίνεται η περιοχή των θερμοκρασιών που παρέχει ο κάθε τύπος ηλιακού συλλέκτη καθώς και τα όρια απόδοσής τους.

Το **Σχήμα 6.10** παρέχει μια γενική εικόνα της διαμόρφωσης μιας εγκατάστασης με σύστημα κεντρικής εστίασης, το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.





Σχήμα 6.10 Σχηματική παράσταση ενός συστήματος κεντρικής εστίασης με ηλιοστάτες.

Η απόδοση των ηλιακών συμπυκνωτών δίνεται ως το γινόμενο της θερμικής με την οπτική απόδοση:

$$n_{ολ} = n_{\theta} \cdot n_{οπ} \quad [6.60]$$

Η θερμική απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$n_{\theta} = a - [(\varepsilon \cdot (T_r^2 - T_a^2) + (h + k) \cdot (T_r - T_a))] / G \quad [6.61]$$

Η οπτική απόδοση είναι:

$$n_{οπ} = (1 - P_c) \cdot (1 - P_{gwr}) \cdot (1 - P) \quad [6.62]$$

όπου είναι:

$a$  : απορροφητικότητα (-)

$\varepsilon$  : συντελεστής εκπομπής (-)

$h$  : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $W/m^2K$ )

$k$  : συντελεστής μεταφοράς δι' αγωγής ( $W/m^2K$ )

$T_r$  : η θερμοκρασία επιφάνειας του συλλέκτη (K)

$T_r$  : η θερμοκρασία επιφάνειας του συλλέκτη (K)

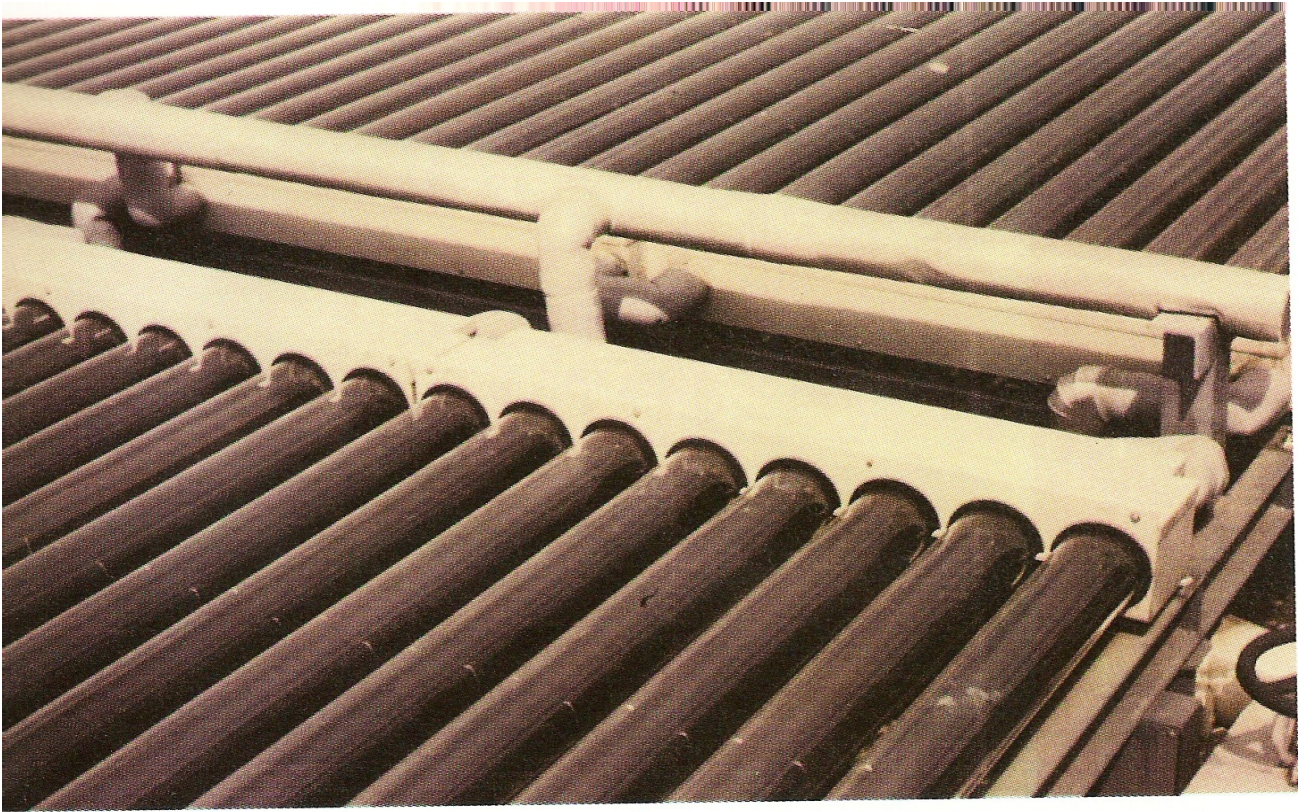
$T_a$  : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K)

$P_c$  : η αναλογία της ενέργειας στην επιφάνεια του συλλέκτη, η οποία δεν έχει ανακλαστεί

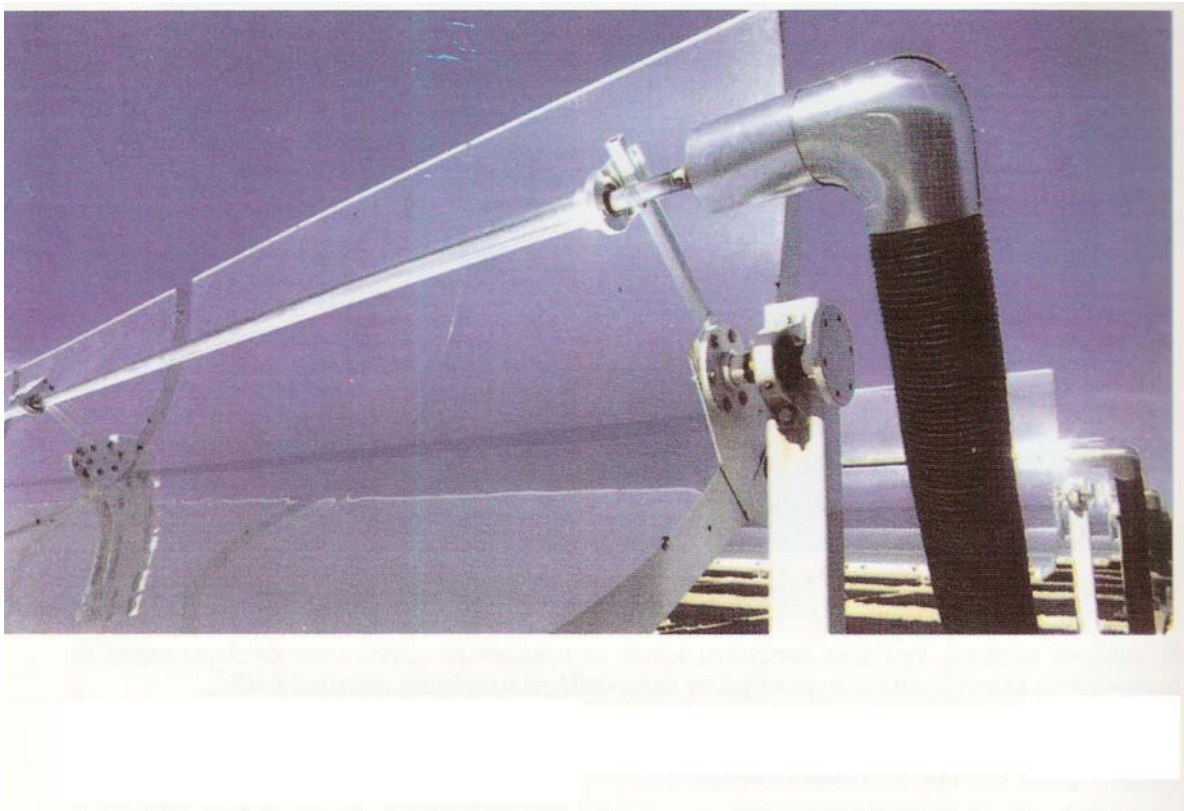
$P_{gwr}$  : οι γεωμετρικές απώλειες του δέκτη (στο σημείο αιχμής) (-)

$P$  : διάφορες άλλες απώλειες

Η ολική στιγμιαία απόδοση μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση [58].



**Σχήμα 6.11 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού της εταιρίας Sanyo, Ιαπωνία.**



**Σχήμα 6.12 Φωτογραφία μιας εγκατάστασης ηλιακής απόσταξης με ασύμμετρους αποστακτήρες. Η εγκατάσταση λειτουργούσε στην νήσο Κίμολο, είχε επιφάνεια εξάτμισης 2508τ.μ. και τα τροφοδοτείτο με θαλάσσιο νερό.**





**Σχήμα 6.13 (A+B) Φωτογραφία εγκατάστασης ηλιακής απόσταξης στην νήσο Byobujima, Ιαπωνία. Οι αποστακτήρες είναι του τύπου θερμοκηπίου και της ασύμμετρης διαμόρφωσης.**



**Σχήμα 6.15** Πεδίο παραβολικών σκαφών για την παραγωγή ζεστού νερού στην βιομηχανία Johnson and Johnson, U.S.A. Η κατασκευή είναι της Acurex Solar Corp.

## 6.8 ΑΠΟΣΤΑΞΗ

### 6.8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απόσταξη (distillation) είναι μια από τις πιο γνωστές και παλαιότερες μεθόδους για την παραγωγή γλυκού νερού από ένα αλατούχο διάλυμα και συγχρόνως η πιο ανεπτυγμένη μέθοδος για πολύ μεγάλες παροχές αφαλατωμένου νερού.

Η πολύ απλή βασική αρχή της μεθόδου είναι η αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο, όπου οι ατμοί που παράγονται επανασυμπυκνώνονται σε υγρό, δηλαδή στον καθαρό διαλύτη, ο οποίος είναι πλήρως απαλλαγμένος από τα άλατα του αρχικού διαλύματος. Η αλλαγή αυτή της φάσης γίνεται με την προσαγωγή θερμότητας, θεωρητικά ίσης με τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού, η οποία αποδίδεται ξανά στο σύστημα κατά την συμπύκνωση των ατμών.

Όταν ένα υδατικό διάλυμα αλάτων θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία του βρασμού του, σχηματίζονται υδρατμοί απηλλαγμένοι από τα άλατα του διαλύματος, πρακτικά έως τη θερμοκρασία των 300°C. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300°C, ο σχηματιζόμενος ατμός παρασύρει κατά τον σχηματισμό του ιόντα των διαλυμένων αλάτων με αποτέλεσμα το συμπύκνωμα να περιέχει μια μικρή ποσότητα αλάτων.

Όταν οι ατμοί έρθουν σε επαφή με μια κρύα επιφάνεια, ψύχονται και συμπυκνώνονται, σχηματίζοντας το αφαλατωμένο απόσταγμα (distillate).

Για τη συμπλήρωση ενός κύκλου παραγωγής αφαλατωμένου νερού, από το διάλυμα του θαλασσινού νερού, λαμβάνουν χώρα τα εξής στάδια:

- Σχηματισμός ατμών με την πρόσδοση, από εξωτερική πηγή, θερμότητας στο θαλασσινό νερό.
- Συμπύκνωση των ατμών κατά την επαφή τους με μια επιφάνεια, η οποία βρίσκεται σε κατά πολύ μικρότερη θερμοκρασία από αυτή των ατμών.
- Απορρόφηση της θερμότητας που εκλύεται κατά την συμπύκνωση, από διάλυμα που κυκλοφορεί στην άλλη πλευρά της επιφάνειας ψύξης.

Κατά την απόσταξη των υδατικών, αλατούχων διαλυμάτων, η περιεκτικότητα των αλάτων του διαλύματος δεν έχει ιδιαίτερη σημασία για την καθαρότητα του παραγόμενου αποσταγμάτος, η οποία επηρεάζει μόνο την ανύψωση του σημείου βρασμού και τον βαθμό συμπύκνωσης της άλμης.

Από την προηγούμενη περιγραφή αλλαγής φάσης, είναι φανερό ότι η «απόσταξη» για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού από τη θάλασσα, ανήκει στη διεργασία της χημικής μηχανικής που ονομάζεται «εξάτμιση» (evaporation-*varorization*). Ωστόσο διεθνώς έχει επικρατήσει η ονομασία «απόσταξη». Οι προσπάθειες των επιστημόνων να διατηρήσουν την σωστή ονομασία «εξάτμιση» απέτυχαν και η λέξη «απόσταξη» έγινε συνώνυμο με τη μέθοδο παραγωγής αφαλατωμένου νερού από τη θάλασσα με εξάτμιση. Παρόλο που η αφαλάτωση με τη μέθοδο αυτή δεν έχει τίποτα κοινό με τη θεωρία της απόσταξης, η ονομασία αυτή θα διατηρηθεί στις επόμενες σελίδες με τη χρήση και των δύο εννοιών, προκειμένου να είμαστε σύμφωνοι με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Τα μηχανήματα και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού, τα λεγόμενα «εξατμιστήρια», είναι ουσιαστικά εξατμιστήρια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της ζάχαρης, ειδικά τροποποιημένα για την αφαλάτωση.

Όλα τα εξατμιστήρια που χρησιμοποιούνται σήμερα στη χημική βιομηχανία, ανεξάρτητα από τον τύπο κτασκευής, έχουν σαν κοινό πρόκατοχο τους βραστήρες παραγωγής αλατού κατά τον μεσαίωνα. Αυτοί οι βραστήρες αποτελούνταν από μια μεταλλική λεκάνη, η οποία θερμαινόταν σε απ'ευθείας επαφή με τις φλόγες, οποιουδήποτε καυσίμου υλικού ήταν διαθέσιμο. Το αλάτι που παρέμενε στην λεκάνη ήταν πανάκριβο, κακής ποιότητας και αμφίβολης καθαρότητας, ενώ όλη η θερμότητα χανόταν στην ατμόσφαιρα μαζί με τους ατμούς.

Η χημική βιομηχανία κατά την εφαρμογή της εξάτμισης δίνει έμφαση στην παραγωγή ή στην ανάκτηση ενός διαλύματος, το οποίο έχει συμπυκνωθεί ή στο στέρεο προϊόν που απομένει μετά την εξάτμιση όλης της ποσότητας του διαλύτη. Όπως π.χ. στη βιομηχανία της ζάχαρης ή στην παραγωγή χλωριούχου νατρίου από διάλυμα εκχύλισης ορυκτών αλάτων. Τα προϊόντα είναι η ζάχαρη και το αλάτι. Οι ατμοί οι οποίοι παράγονται κατά την εξάτμιση απορρίπτονται ως άχρηστοι, αφού

ανακτηθεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, μέρος της θερμότητας που περιέχουν. Η μέθοδος της αφαλάτωσης με εξάτμιση, αντίθετα, δίνει όλη την έμφαση στην ανάκτηση των ατμών, ως συμπύκνωμα καθαρού νερού, ενώ η άλμη συνήθως απορρίπτεται. Σπανιότερα κατεργάζεται για την ανάκτηση ορισμένων αλάτων, όπως υδροξείδιο του μαγνησίου ή οξείδιο του ασβεστίου.

Για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού χρησιμοποιούνται διάφορα εξατμιστήρια, τα οποία παρουσιάζουν, μεταξύ των, σημαντικές κατασκευαστικές διαφορές, οι οποίες επηρεάζουν τις παράμετρους λειτουργίας, όπως π.χ. την κυκλοφορία της άλμης, τις θερμοκρασίες των διαλυμμάτων και την πίεση.

Η εξάτμιση, ανάλογα με τον τύπο των εξατμιστηρίων που χρησιμοποιούνται ή με το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται, χωρίζεται σε τέσσερις μεγάλες ομάδες, η οποίες με τη σειρά τους χωρίζονται σε υποομάδες.

Οι ομάδες που διακρίνονται είναι:

- Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Evaporation ή ME)
- Πολυβάθμιος εκρηκτική εξάτμιση ή πολυβάθμιος εκτόνωση (Multi-Stage-Flash-Evaporation ή MSF)
- Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (Vapor Compression ή VC)
- Απόσταξη με ηλιακή ενέργεια (Solar distillation)

Οι μέθοδοι με πολλαπλές βαθμίδες και η πολυβάθμιος εκρηκτική εξάτμιση, χρησιμοποιούν ως ενέργεια για την λειτουργία τους ατμό θέρμανσης, ο οποίος παράγεται από παρακείμενο λέβητα ή παρέχεται από κάποια άλλη πηγή. Η μέθοδος με επανασυμπύεση των ατμών χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για μηχανική επαναθέρμανση των ατμών ή ατμό όταν εφαρμόζεται θερμοσυμπύεση με εκτοξευτή ατμού. Κατά την απόσταξη με ηλιακή ενέργεια η θερμότητα λαμβάνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, είτε απ' ευθείας στην συμβατική απόσταξη με ηλιακή ενέργεια, είτε έμμεσα εφαρμόζοντας μια από τις γνωστές μεθόδους συλλογής και αποθήκευσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στις μεθόδους απόσταξης που αναφέρθηκαν, τα εξατμιστήρια παρουσιάζουν μεγάλες κατασκευαστικές διαφορές, ανάλογα με την κατασκευαστική εταιρεία. Οι διεργασίες όμως της μεθόδου και οι βασικές αρχές λειτουργίας παραμένουν οι ίδιες.

## 6.8.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Οι ορισμοί που ακολουθούν έχουν καθιερωθεί σχεδόν για όλες τις μεθόδους αφαλάτωσης με εξάτμιση, ανεξάρτητα από τον τύπο του εξεταστικού. Οι εξισώσεις δίνονται σε απλοποιημένη μορφή, όπως συνήθως χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς ρουτίνας κατά την λειτουργία των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης.

Η ειδική ενθαλπία (specific enthalpy), το  $h_f$  δίνεται από τη σχέση:

$$h_f = c_p \cdot \Delta t \quad [6.8.1]$$

και ισχύει για όλες τις μεταβολές των θερμοκρασιών των διαλυμάτων της άλμης.

Η ειδική θερμότητα (specific heat)  $c_p$  θεωρείται σταθερή στις συνήθεις θερμοκρασίες, πιέσεις και συγκεντρώσεις που εφαρμόζονται κατά την λειτουργία μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης.(1) Η μέση αριθμητική τιμή της είναι:

- για το θαλάσσιο νερό:  $3.995 \cdot 10^3$  (J/kgK)
- για το αφαλατωμένο νερό:  $4.184 \cdot 10^3$  (J/kgK)
- Με το παλαιό σύστημα μονάδων είναι:
- για το θαλάσσιο νερό: 0.955 (kcal/kg°C)
- για το αφαλατωμένο νερό: 1.000 (kcal/kg°C)

Η μερική τάση (partial pressure) των διαλυμένων αλάτων θεωρείται αμελητέα, επειδή είναι πολύ μικρή. Επομένως οι ατμοί υπεράνω μιας επιφάνειας υδατικού διαλύματος θεωρούνται ως ατμοί καθαρού νερού.

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης υπολογίζεται στην θερμοκρασία, όπου ο ατμός βρίσκεται σε ισορροπία με το βράζον υδατικό διάλυμα:

$$t_i = t_d + t_{av} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [6.8.2]$$

όπου  $t_d$  είναι η θερμοκρασία των ατμών και  $t_{av}$  η θερμοκρασία ανύψωσης του σημείου βρασμού.

Η θερμική ροή (heat flow) δια μιας επιφάνειας  $A$ (m<sup>2</sup>) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta t_m \text{ (J/s)} \quad [6.8.3]$$

όπου είναι:

$h$  : ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας (heat transfer coefficient) (W/m<sup>2</sup>K)

$\Delta t_m$  : η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας (°C,K)

Ο λεβητόλιθος που σχηματίζεται στην μεταλλική επιφάνεια από την πλευρά της άλμης, ελαττώνει την ροή της θερμότητας. Η αντίσταση στην ροή είναι ανάλογη με το πάχος της απόθεσης. Ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{h} = R_s + R_b + R_T + R_\lambda \text{ (m}^2\text{KW)} \quad [6.8.4]$$

Οι αντιστάσεις  $R$  στην εξίσωση 4 είναι:

$R_s$  : η αντίσταση του υμένα από την πλευρά του ατμού,  $\frac{1}{h_s}$  (m<sup>2</sup>KW)

$R_b$  : η αντίσταση του υμένα από την πλευρά της άλμης (m<sup>2</sup>KW)

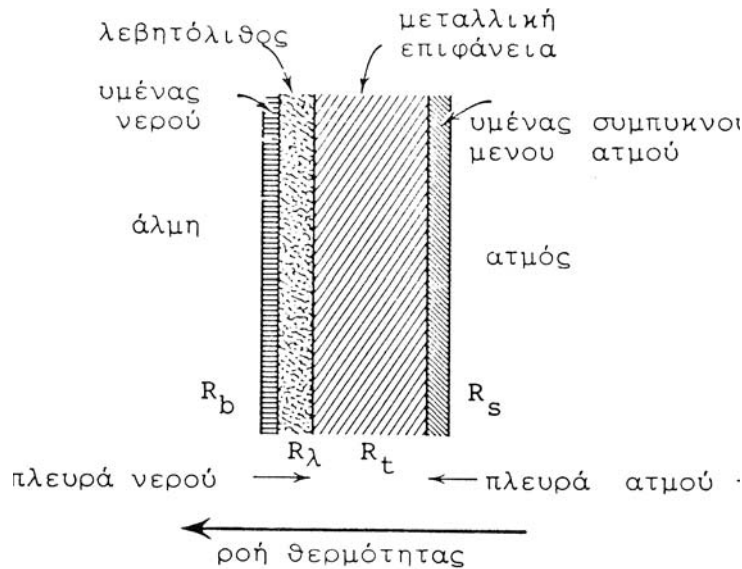


$R_T$  : η αντίσταση του τοιχώματος του σωλήνα πάχους  $s_T$  :  $R_T = s_T / \lambda_T$  ( $m^2KW$ )

$R_\lambda$  : η αντίσταση του λεβητόλιθου  $R_\lambda = s_\lambda / \lambda_\lambda$  ( $m^2KW$ )

Το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα,  $s_T$ , είναι γνωστό, όπως επίσης είναι γνωστό και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity coefficient) του μεταλλικού τοιχώματος του σωλήνα.

Στο **σχήμα 6.8.1** δίνεται η τομή μιας πλευράς από ένα τοίχωμα σωλήνα συμπτυκνωτή με το σχετικό πάχος του τοιχώματος του σωλήνα, των δύο υμένων υγρού και λεβητόλιθου.



**Σχήμα 6.8.1** Ροή της θερμότητας μέσα από το τοίχωμα κατακόρυφου σωλήνα. Ο ατμός συμπυκνώνεται στο εξωτερικό τοίχωμα του σωλήνα, θερμαίνοντας την άλμη η οποία ρέει στο εσωτερικό τοίχωμα.

Από την πλευρά του ατμού σχηματίζεται ένας λεπτότατος υμένας από συμπύκνωση, με αντίσταση  $R_s$  στην ροή της θερμότητας προς το τοίχωμα του σωλήνα. Η ροή της θερμότητας στον υμένα γίνεται δι' αγωγής. Το πάχος του υμένα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως π.χ. από την ταχύτητα συμπύκνωσης των ατμών και από την ταχύτητα με την οποία απομακρύνεται το σχηματιζόμενο συμπύκνωμα. Το πάχος του ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του υμένα, γιατί ελαττώνεται το ιξώδες του με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα ροής του συμπυκνώματος. Το πάχος του υμένα επηρεάζεται και από την ταχύτητα κυκλοφορίας του ατμού. Μεγάλη ταχύτητα του ατμού σχηματίζει δίνες και τριβές με το συμπύκνωμα, το οποίο απομακρύνεται ταχύτερα από την επιφάνεια των σωληνίων. Η παρουσία μη συμπυκνωμένων αερίων στον ατμό επηρεάζει επίσης το πάχος του υμένα και τη ροή της θερμότητας, διότι τα αέρια έχουν γενικά μεγάλη αντίσταση ή πολύ μικρό συντελεστή μεταφοράς.

Όταν η μεταλλική επιφάνεια δεν διαβρέχεται ομοιόμορφα από το συμπύκνωμα του ατμού, σχηματίζονται σταγόνες νερού σε διάφορα μεγέθη, οι οποίες αυξάνουν με την προσθήκη νέου συμπυκνώματος. Αυτή η αύξηση συνεχίζεται μέχρι που, υπό την επίδραση του βάρους τους, να υπερβούν την επιφανειακή τάση και να αποκολληθούν από την επιφάνεια και αρχίζει ο σχηματισμός νέων σταγόνων. Η συμπύκνωση με σταγόνες γίνεται πάνω σε πολύ λείες επιφάνειες, σε επιφάνειες που έχουν υποστεί ειδική κατεργασία ή σε αυτές που έχουν επικαθίσει διάφορες ξένες ουσίες, όπως π.χ. διάφορα λάδια που παρασύρονται από τον ατμό, τα οποία σχηματίζουν τοπικές επικαλύψεις στην μεταλλική επιφάνεια και δεν επιτρέπουν τη συνεχή ροή του υμένα του συμπυκνώματος.

Οι δύο τύποι συμπύκνωσης δίνουν πολύ διαφορετικούς συντελεστές θερμικής μεταφοράς  $h$ . Στην πράξη ο ατμός συμπυκνώνεται και με τους δύο τρόπους, πάντοτε όμως ο υμένας σχηματίζεται σε πολύ μεγαλύτερη αναλογία. Συνήθως παρατηρείται μια απόκλιση από τον υπολογιζόμενο αριθμό Nusselt για συμπύκνωση μόνο για υμένα, κατά περίπου 20%.



Ο σχηματισμός συμπυκνώματος με τους δύο τρόπους και οι αντίστοιχες εξισώσεις, αναπτύσσονται στο κεφάλαιο της πολυβάθμιας εκρηκτικής εξάτμισης, όπου αυτή η παράμετρος έχει ιδιαίτερη σημασία.

Στο εσωτερικό του σωλήνα, δηλαδή από την πλευρά της άλμης, οι συνθήκες ροής της θερμότητας είναι πιο πολύπλοκες. Το πάχος και επομένως και η αντίσταση στην ροή του λεβητόλιθου που σχηματίζεται στην εσωτερική επιφάνεια των σωλήνων, είναι ανομοιομορφα και κατά την πορεία της λειτουργίας αλλάζουν, λόγω του ότι επικάθεται νέο στρώμα λεβητόλιθου, του οποίου η αντίσταση είναι γενικά μεγάλη. Π.χ. αν θεωρηθεί ένα τοίχωμα από χαλκό, οι συντελεστές αγωγιμότητας μίγματος οξειδίου του μαγνησίου και ανθρακικού ασβεστίου για τον λεβητόλιθο είναι εκατό φορές μικρότεροι εκείνων του χαλκού. Αυτό σημαίνει ότι λεβητόλιθος πάχους 0.01mm παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή της θερμότητας από ότι τοίχωμα χαλκού πάχους 1.0mm. Η θερμική αγωγιμότητα του λεβητόλιθου δεν είναι μόνο συνάρτηση της χημικής σύστασής του, αλλά και της διασποράς των ορυκτών που σχηματίζονται, δηλαδή της σχετικής ομοιομορφίας του στερεού στρώματος λεβητόλιθου, αυτή δε η παράμετρος δεν ελέγχεται κατά τη λειτουργία.

Εξωτερικά του στρώματος του λεβητόλιθου πάχους  $s_s$ , σχηματίζεται μια λεπτότατη μεμβράνη, η οποία αποτελείται από το ίδιο διάλυμα της άλμης που κυκλοφορεί στο εσωτερικό του σωλήνα. Το πάχος της  $s_b$  επηρεάζεται από την ταχύτητα κυκλοφορίας της άλμης και από τις θερμοκρασίες που επικρατούν στις συνεχόμενες βαθμίδες.

Ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας  $h$  υπολογίζεται από την τελική εξίσωση:

$$h = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{s_r}{\lambda_r} + \frac{s_\lambda}{\lambda_\lambda} + \frac{1}{h}} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad [6.8.5]$$

Στον πίνακα 4.1 δίνεται ο συντελεστής αγωγιμότητας διαφόρων μετάλλων και λεβητόλιθου με ποικίλη σύσταση ορυκτών.

Στην διεργασία μετάδοσης της θερμότητας έχουν καθιερωθεί ορισμένοι εμπειρικοί αριθμοί αντιστάσεων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς ρουτίνας και οι οποίοι έχουν υπολογιστεί από πολλές και διάφορες εργαστηριακές μελέτες και ειδικά για τις συνθήκες λειτουργίας των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με τη μέθοδο της απόσταξης.

Οι αριθμητικές τιμές τους είναι:

- Για συμπυκνόμενο ατμό  $R_s = (1.1898 \rightarrow 2.38) * 10^{-4}$
- Για μεταλλικό τοίχωμα  $R_s = (0.1186 \rightarrow 0.5943) * 10^{-4}$
- Για την άλμη σε βρασμό  $R_s = (0.9513 \rightarrow 1.422) * 10^{-4}$
- Για τον λεβητόλιθο  $R_s = (0.9513 \rightarrow 1.900) * 10^{-4}$
- Ολική αντίσταση  $\frac{1}{h} = R_o = (3.211 \rightarrow 6.305) * 10^{-4}$

Όλες οι αντιστάσεις εκφράζονται σε ( $\text{m}^2\text{KW}$ ).

Οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές των ορίων που κυμαίνονται οι αντιστάσεις στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Η ακριβής τιμή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως π.χ. αν η συμπύκνωση των ατμών γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια ή στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα και αν η ροή είναι γραμμική ή στροβιλώδης.(2)

Ειδικά για συμπύκνωση ατμού ή για τον βρασμό υδατικού αλατούχου διαλύματος, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τιμές ως εμπειρικοί συντελεστές θερμικής μεταφοράς:

- Για διαλύματα που βράζουν  $h_b$  7000 ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )
- Για συμπυκνόμενο ατμο  $h_s$  11340 ως 14200 ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

Οι αντίστροφες τιμές, δηλαδή οι αντιστάσεις  $R_b$  και  $R_s$ , έχουν πολύ μικρές τιμές σε σχέση με τις αντιστάσεις του τοιχώματος και του λεβητόλιθου και δεν επηρεάζουν αισθητά το τελικό αποτέλεσμα.

Η θερμότητα εξάτμισης ή συμπύκνωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = m \cdot h_{fg} \quad (\text{J/h}) \quad [4 \text{ (J/h)}] \quad [6.8.6]$$

όπου  $m$  είναι η μέση ροή μάζας της εξατμιζόμενης άλμης σε kg/h και  $h_{fg}$  η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού σε KJ/kg.

Η ολική θερμότητα που απαιτείται για την θέρμανση ή την ψύξη ενός διαλύματος άλμης μάζας  $m$  (kg) είναι:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t = m \cdot 3.995 \cdot 10^3 \cdot \Delta t \quad (\text{J/h}) \quad [6.8.7]$$

Η αναλογία απόληψης (extraction rate), παρέχει το ποσό του αφαλατωμένου νερού το οποίο παράγεται από ένα διάλυμα με αρχική συγκέντρωση αλάτων  $C_a$ , και τελική συγκέντρωση στην άλμη, πριν την απόρριψη,  $C_b$ .

$$E = 1 - \frac{C_a}{C_b} = \frac{m_d}{m_T}$$

όπου  $m_d$  είναι η ποσότητα του αφαλατωμένου νερού και  $m_T$  η ποσότητα του νερού τροφοδότησης (kg/h).

Βαθμός απόδοσης  $R$  (performance ratio), είναι η ποσότητα του αφαλατωμένου νερού που παράγεται κατά την προσαγωγή 2326KJ θερμότητας και αντιπροσωπεύει τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού στις συνήθεις θερμοκρασίες απόσταξης. Δεν είναι αδιάστατος αριθμός και αναφέρεται σε kg/2326KJ. Προήλθε από τον καθιερωμένο όρο στο αγγλοσαξωνικό σύστημα μονάδων, όπου ο βαθμός απόδοσης  $R$  εκφράζεται ως το ποσό του αφαλατωμένου νερού που παράγεται σε lb/1000Btu προσφερόμενης θερμότητας.

**Πίνακας 6.8.1 Θερμική αγωγιμότητα διαφόρων υλικών**

| Υλικό                  | °C  | $\lambda$ (W/mK) | Υλικό                        | °C     | $\lambda$ (W/mK) |
|------------------------|-----|------------------|------------------------------|--------|------------------|
| Αλουμίνιο              | 0   | 203.5            | Ατμός                        | 66     |                  |
|                        | 100 | 205.8            |                              | 93     |                  |
| Νικέλιο                | 0   | 62.8             |                              | 100    |                  |
|                        | 100 | 59.3             |                              | 150    |                  |
| Ορείχαλκος<br>70/30    | 0   | 96.5             | Λεβ/λιθος<br>πλούσιος σε:    |        | 0.69-2.32        |
|                        | 100 | 103.5            |                              | Γύψο   | 0.08-0.232       |
| Καθαρός<br>Χαλκός      | 0   | 388              | Πυρπικά<br>Ανθρακικά         |        | 0.15-2.32        |
|                        | 100 | 377.9            |                              |        |                  |
| Χάλυβας<br>μαλακός     | 100 | 45.4             | Προσπ/τικά<br>επιστρ/τα από: |        | 0.4-1.05         |
|                        |     |                  |                              | Σμάλτο | 0.16-0.81        |
| Χάλυβας<br>ανοξειδωτός | 100 | 16.3             | Τεχνητές ρητίνες<br>Ελαστικά |        | 0.116-0.232      |
|                        | 0   | 55.8             |                              |        |                  |
| Χυτοσίδηρος            | 100 | 52.3             |                              |        |                  |
|                        | 40  | 0.630            |                              |        |                  |
|                        | 60  | 0.653            |                              |        |                  |
| Νερό                   | 100 | 0.681            |                              |        |                  |
|                        |     |                  |                              |        |                  |

Ο βαθμός απόληψης (gained output ratio ή GOR), είναι η ποσότητα του αφυδατωμένου νερού σε kg που παράγεται ανά kg ατμού θέρμανσης που χρησιμοποιείται:

$$GOR = \frac{m_d}{m_s} = \frac{m_T \cdot E}{m} \text{ (kg/kg)} \quad [6.8.9]$$

Ο βαθμός απόληψης καθορίζει την οικονομία του ατμού στις μεθόδους εξάτμισης πολλαπλών βαθμίδων. Η αριθμητική τιμή του είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη από τον αριθμό των βαθμίδων και διαφέρει ελάχιστα από εγκατάσταση σε εγκατάσταση με τον ίδιο αριθμό βαθμίδων. Πρακτικά θεωρείται ότι ο βαθμός απόληψης είναι το 0.8 των βαθμίδων του εξάτμιση. Π.χ εγκατάσταση εξάτμισης με 12 βαθμίδες έχει βαθμό απόληψης:  $GOR=12 \cdot 0.8=9.6$ .

Ο ορισμός του βαθμού απόδοσης  $R$  είναι από θερμοδυναμικής απόψεως σωστότερος, γιατί αναφέρεται στην ενθαλπία του ατμού, ενώ ο GOR αναφέρεται στη μάζα του ατμού, χωρίς να περιλαμβάνει την πίεση ή την θερμοκρασία του. Ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται από την εξίσωση:

$$R = \frac{m_d}{2326kJ} \text{ (kg/2326Kj)} \quad [6.8.10]$$

Όταν στην εγκατάσταση αφυδάτωσης, εκτός από τον ατμό θέρμανσης χρησιμοποιείται και ατμός για την κίνηση των αντλιών, τόσο η οικονομία του ατμού όσο και ο βαθμός απόληψης αλλάζουν. Εάν η ποσότητα του ατμού που χρησιμοποιείται για την κίνηση των αντλιών είναι  $m_{sa}$ , τότε η εξίσωση [4.9] γίνεται:

$$GOR = \frac{m_d}{\left(1 + \frac{m_{sa}}{m_s}\right) \cdot m_s} \text{ (kg/kg)} \quad [6.8.11]$$

Ο ατμός κίνησης μετά από κατάλληλη εκτόνωση, επαναχρησιμοποιείται μαζί με τον ατμό θέρμανσης.

Παροχή (output) μιας εγκατάστασης αφυδάτωσης είναι το παραγόμενο αφυδατωμένο νερό ανά μονάδα χρόνου και έχει μονάδες :kg/d ή kg/h.

Χωρητικότητα (capacity) είναι η ικανότητα την οποία έχει μια εγκατάσταση αφυδάτωσης να παρέχει μια ορισμένη ποσότητα αφυδατωμένου νερού.

Η χωρητικότητα ενός εξάτμιση, ορίζεται από την ταχύτητα παραγωγής των ατμών και είναι συνάρτηση της ολικής θερμικής επιφάνειας  $A_o$ , της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta t$  και της ολικής αντίστασης στην ροή της θερμότητας  $R_o$ .

$$C = \frac{A_o \cdot \Delta t_o}{R_o \cdot h_{fg}} = \frac{h \cdot A_o \cdot \Delta t_o}{h_{fg}} = \frac{Q}{h_{fg}} \text{ (kg/h)} \quad [6.8.12]$$

Οικονομία επιφάνειας είναι το ποσό του παραγόμενου αφυδατωμένου νερού ανά μονάδα θερμικής επιφάνειας εναλλαγής της θερμότητας στο σύστημα:

$$\frac{m_d}{A_o} \text{ (kg/h m}^2\text{)} \quad [6.8.13]$$

## 6.9 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

### 6.9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

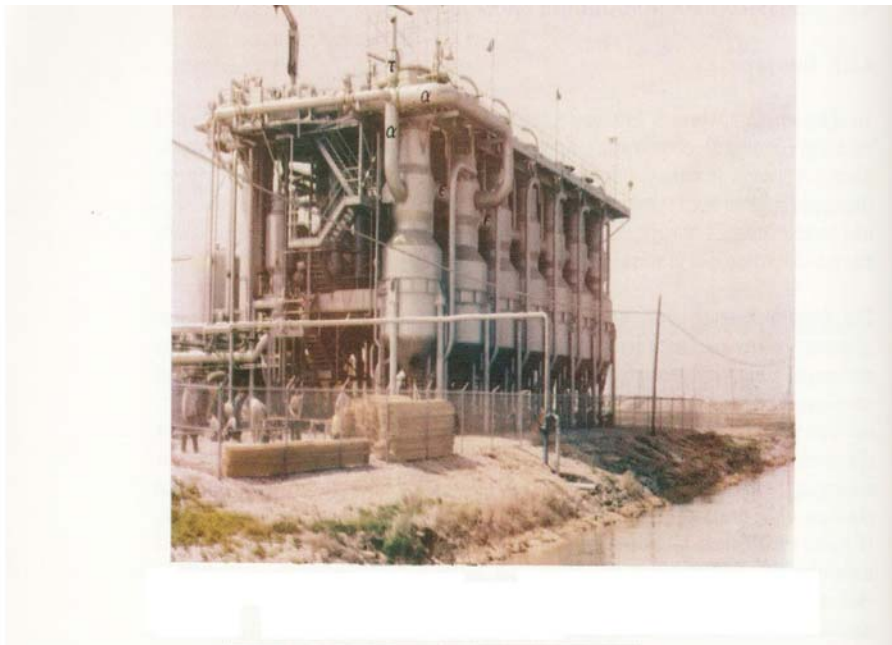
Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμιδών χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία σχεδόν από την εποχή που ανακαλύφθηκε ο ατμός. Στην αρχή, η χρήση τους περιοριζόταν στην ανάκτηση της άλμης στη βιομηχανία κατεργασίας ορυκτών αλάτων και κυρίως στη βιομηχανία της ζάχαρης. Περιορισμένη χρήση είχαν επίσης στη βιομηχανία του πετρελαίου για τον καθαρισμό του νερού από το πετρέλαιο. Σε περιοχές όπου δεν υπήρχε άφθονο νερό, το απόσταγμα χρησιμοποιούταν και για πόσιμο, παρ' όλη τη γεύση του πετρελαίου και την άσχημη οσμή του.

Στη βιομηχανία παραγωγής αφαλατωμένου νερού για κοινοτική και οικιακή χρήση, χρησιμοποιήθηκαν, για πρώτη φορά πριν από περίπου 85 χρόνια, κυρίως σε μεγάλα εμπορικά ποντοπόρα πλοία, απ' όπου πήραν το όνομα «βραστήρες τύπου θάλασσας». Χρησίμευαν για τον ανεφοδιασμό με αφαλατωμένο νερό τόσο των καζανιών για την παραγωγή ατμού, όσο και σαν νερό χρήσης. Η όλη εγκατάσταση αφαλάτωσης αποτελούταν από ένα λέβητα θέρμανσης, ένα εξατμιστήριο ή όπως ονομαζόταν έναν αποστακτήρα, έναν συμπυκνωτή ατμών και ένα διαχωριστή απ' όπου ο ατμός περνούσε ελεύθερα, ενώ οι λεπτές σταγόνες άλμης παγιδεύονταν σε αυτόν. Η πρώτη εγκατάσταση σε έδαφος έγινε από την εταιρία Weir της Γλασκώβης.

Οι πρώτες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης ήταν βελτίωση των βραστήρων θαλάσσης, του τύπου βυθιζόμενων σωλήνων.

Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμιδών αποτελούνται από μια δέσμη σωλήνων ή θύσανο σωλήνων με οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη και από ένα περίβλημα ή κέλυφος που περιβάλλει τους σωλήνες. Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμιδών προσφέρονται στο εμπόριο σε μια μεγάλη ποικιλία κατασκευών και ανάλογα με την διάταξη των σωλήνων κατατάσσονται σε:

- Εξατμιστήρια μακρών σωλήνων (Long-Tube-Vertical-Evaporator ή LTV)
- Εξατμιστήρια κατακόρυφων σωλήνων με αναρριχόμενο υμένα (Vertical-Tube-climbing film Evaporator ή Hvte)
- Εξατμιστήρια κατακόρυφων σωλήνων με κατερχόμενο υμένα (Vertical-Tube-falling film Evaporator ή VTE)
- Εξατμιστήρια με βυθισμένους σωλήνες (Submerged-Tube-falling film Evaporator ή STE)
- Εξατμιστήρια με οριζόντιους σωλήνες (Horizontal-Tube Evaporator ή HTME)
- Εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμιδών (Multiple-effect-Evaporators ή ME) χαμηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.9.1 Γενική άποψη της εγκατάστασης LTV, του OSW στο Freeport του Texas, παραγωγής αφαλατωμένου νερού περίπου 3800m<sup>3</sup>/day.

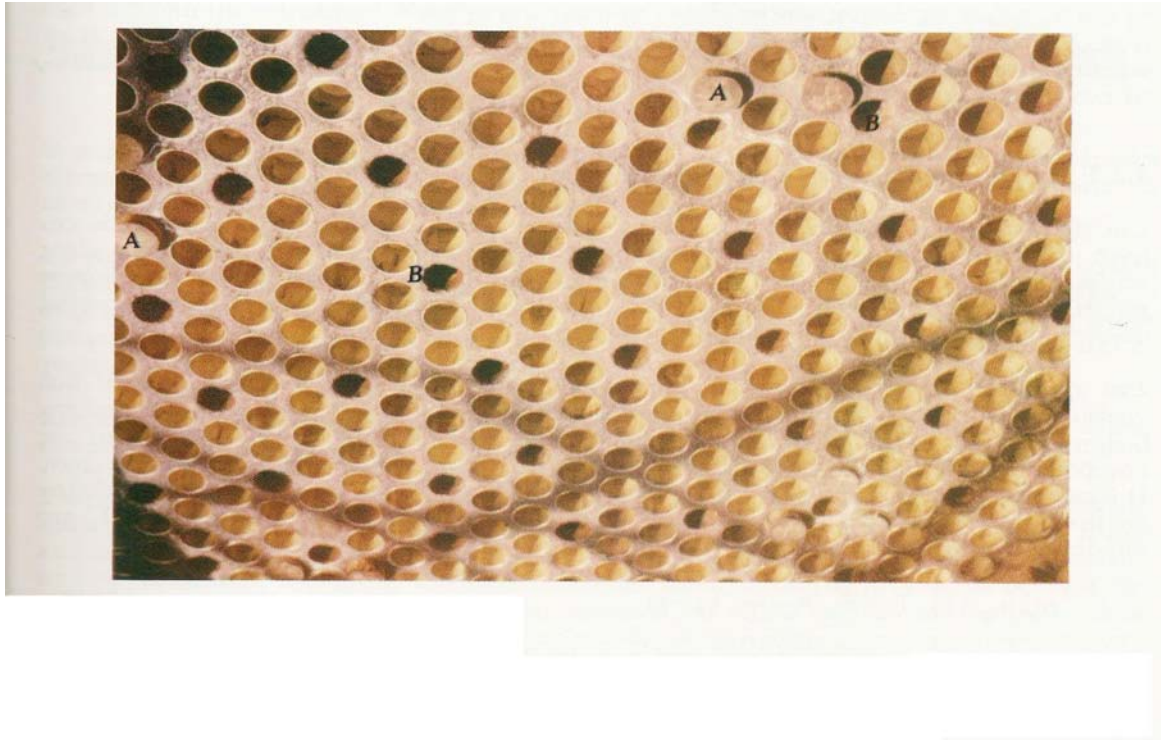


Σχήμα 6.9.2 Λεπτομέρεια μιας βαθμίδας, της πρώτης του παραπάνω σχήματος.



Σχήμα 6.9.3 Δέσμη μακρών κάθετων σωληνών στο εσωτερικό του περιβλήματος μιας βαθμίδας Εξατμιστηρίου.





**Σχήμα 6.9.4** Το ανώτερο τμήμα της δέσμης των σωληνών, όπου εισάγεται η άλμη μέσα στους σωλήνες. Α είναι ο κατανομέας του διαλύματος, ενώ τα μαύρα στίγματα δείχνουν τα σημεία όπου σχηματίστηκε λεβητόλιθος.

## 6.10 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΙΑ ΜΑΚΡΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ, LTV

Τα εξατμιστήρια μακρών σωλήνων είναι τα πρώτα από τη νέα γενιά που σχεδιάστηκαν ειδικά για την αφαλάτωση. Αποτελούνται από μακρούς κατακόρυφους σωλήνες, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί η άλμη που βράζει, ενώ ο ατμός θέρμανσης παρέχει την θερμότητά του και συμπυκνώνεται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Η μέθοδος αυτή μελετήθηκε εντατικά από το Γραφείο Αλμυρών Νερών (Office of Saline Water ή OSW) το οποίο ιδρύθηκε από το Υπουργείο των Εσωτερικών των ΗΠΑ, ειδικά για την μελέτη και την προώθηση της αφαλάτωσης, κατά τη δεκαετία του 1960.

Η μέθοδος LTV μελετήθηκε σε μια πειραματική εγκατάσταση, παροχής περίπου 3790m<sup>3</sup>/day, που τοποθετήθηκε στο Freeport του Texas. Η εγκατάσταση αρχικά είχε 12 βαθμίδες που αργότερα, μετά από ορισμένες τροποποιήσεις προστέθηκαν άλλες 5 βαθμίδες. Τα εξατμιστήρια ήταν κατασκευασμένα σχεδόν αποκλειστικά από χάλυβα και χυτοσίδηρο. Επειδή ήταν παράμετροι που επηρέαζαν την μέθοδο. Οι σωλήνες της κάθε βαθμίδας ήταν κατασκευασμένοι από διαφορετικά υλικά, ώστε να μελετηθεί η γενική συμπεριφορά των υλικών κατασκευής στο θαλάσσιο νερό και την άλμη καθώς και η συμπεριφορά τους στη διάβρωση και η διάρκεια ζωής τους.

Η μέθοδος χρησιμοποιούσε την τεχνική του εμβολιασμού με κρυστάλλους για τον καθαρισμό του θαλάσσιου νερού, στη μέθοδο L.M.C. Χρησιμοποιήθηκαν κρύσταλλοι ανθρακικού ασβεστίου και υδροξειδίου του μαγνησίου με αποτέλεσμα ο σχηματισμός λεβητόλιθου να μειωθεί σημαντικά.

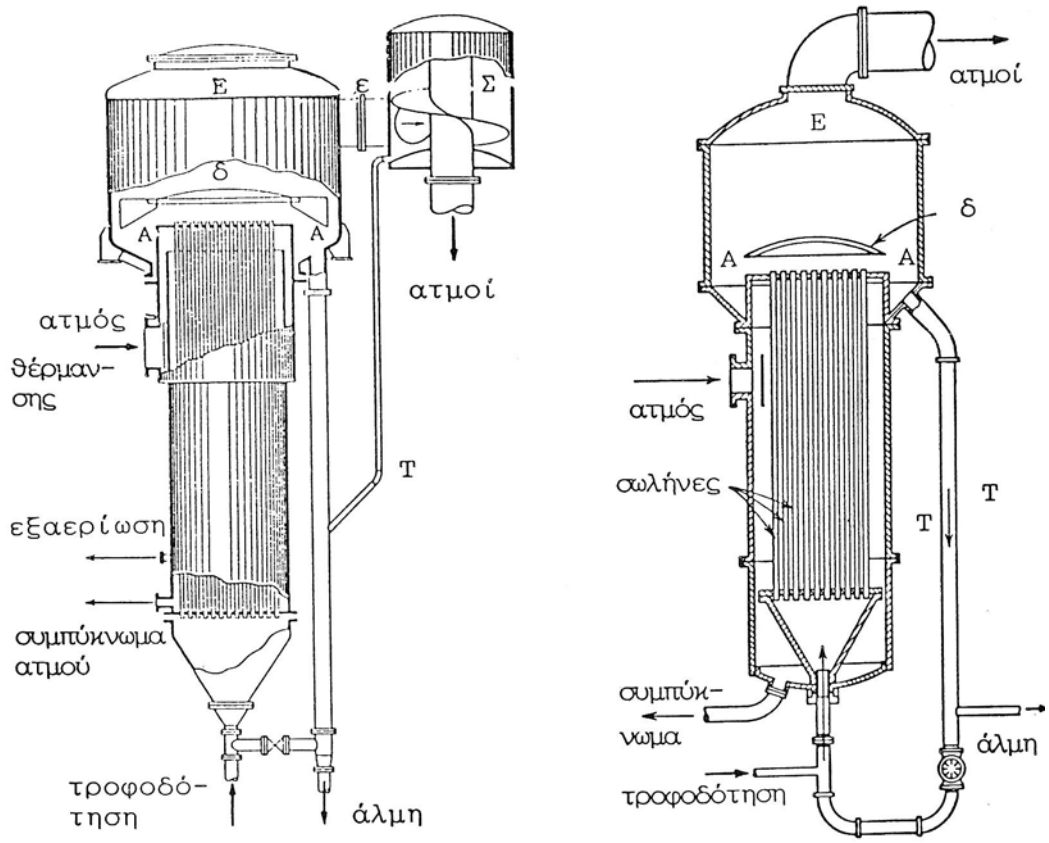
Από την μελέτη αυτής της πειραματικής εγκατάστασης, έχουν κατασκευαστεί οι διάφορες παραλλαγές των εξατμιστηρίων μακρών, κατακόρυφων σωλήνων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού.

Οι φωτογραφίες των **σχημάτων 6.10.1 ως 6.10.4** δείχνουν την πειραματική εγκατάσταση στο Freeport του Texas. Η φωτογραφία 4.3 είναι η γενική όψη της εγκατάστασης με μια σειρά από 7 βαθμίδες στην πρώτη γραμμή. Στους σωλήνες α κυκλοφορεί ο ατμός θέρμανσης στην πρώτη βαθμίδα και με δυνατότητα πρόσδοσης θερμότητας και στη δεύτερη βαθμίδα. Οι παραγόμενοι ατμοί κυκλοφορούν από βαθμίδα σε βαθμίδα μέσα από τους σωλήνες ε. Στο σχήμα **6.10.2** δίνεται η φωτογραφία της πρώτης βαθμίδας του εξατμιστηρίου. Η τομή παρόμοιου εξατμιστηρίου δίνεται στο **σχήμα 6.10.5**. Η φωτογραφία **6.10.3** δείχνει το εσωτερικό του εξατμιστηρίου, όπου είναι τοποθετημένοι οι μακροί κατακόρυφοι σωλήνες Α, σε δέσμη. Οι σωλήνες είναι ορειχάλκινοι. Β είναι το μανόμετρο μέτρησης της πίεσης στο εσωτερικό του εξατμιστηρίου. Το σχήμα **6.10.4** δείχνει το επάνω τμήμα της δέσμης των σωλήνων, το οποίο στο **σχήμα 6.10.5** παριστάνεται από την τομή Α-Α. Στη φωτογραφία του **σχήματος 6.10.4**, Α είναι οι τάπες κατανομής της άλμης και Β τα σημεία της εσωτερικής επιφάνειας των σωλήνων, όπου παρατηρείται σχηματισμός λεβητόλιθου.

## 6.11 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΙΑ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ

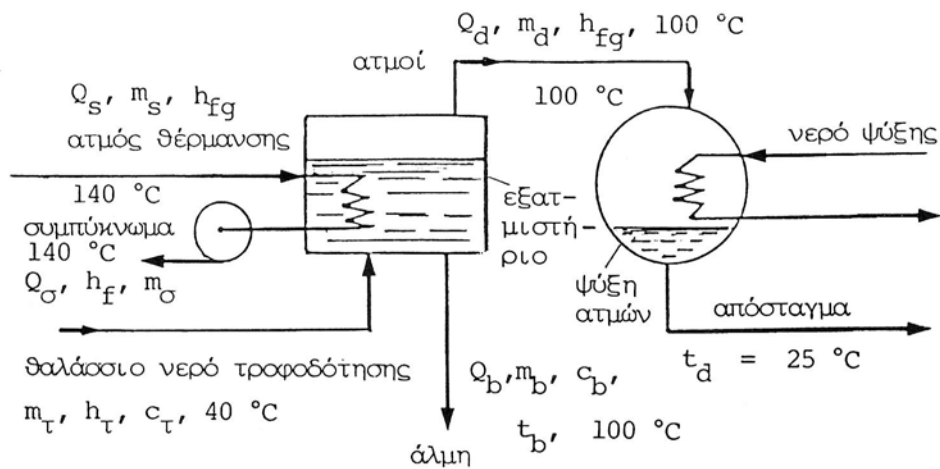
Στα εξατμιστήρια με κατακόρυφους σωλήνες ανήκουν αυτά με αναρριχώμενο υμένα νερού και αυτά με κατερχόμενο υμένα. Στα πρώτα η τροφοδότηση της άλμης γίνεται από το κάτω μέρος του εξατμιστηρίου στο εσωτερικό της δέσμης των σωλήνων. Στα δεύτερα η τροφοδότηση γίνεται από το επάνω τμήμα, στο εσωτερικό των σωλήνων. Τα εξατμιστήρια με κατακόρυφους σωλήνες είναι βελτίωση αυτών με μακρούς σωλήνες.

Στο **σχήμα 6.11.1** δίνεται η τομή ενός εξατμιστηρίου μακρών σωλήνων, από τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν στην αφαλάτωση θαλάσσιου νερού και τα οποία προέρχονται από την βιομηχανία της ζάχαρης.



Σχήμα 6.11.1 Εξαμιστήριο με μακρούς κάθετους σωλήνες LTV, με τροφοδότηση από το κάτω μέρος των σωλήνων.

Όταν τα εξαμιστήρια αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ως μονοβάθμια, η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντική. Η θεωρητική ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για να λειτουργεί το σύστημα χωρίς καθόλου εξωτερικές απώλειες, βρίσκεται από τον ισολογισμό της θερμότητας στο **σχήμα 6.10.1**.



Σχήμα 6.10.1 Ισολογισμός θερμότητας σε εξαμιστήριο μιας βαθμίδας.



Η ποσότητα πρακτικά δίνεται από την γενική εξίσωση:

$$m_s \cdot h_{fg} = m_d \cdot h_d + m_b \cdot h_b - m_T \cdot h_T + Q_{απωλ} \text{ (kJ/kg)} \quad [6.8.14]$$

Ως θερμοκρασία βρασμού θεωρείται αυτή των 100°C επιπλέον της θερμοκρασίας ανύψωσης του σημείου βρασμού  $t_{av}$ , δηλαδή:  $100 + t_{av}$  (°C).

Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας στα εξατμιστήρια μιας βαθμίδας, οδήγησε στην κατασκευή εξατμιστηρίων με περισσότερες βαθμίδες, δηλαδή πολλά εξατμιστήρια στη σειρά, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας του όλου συστήματος.

Σε μια εγκατάσταση με πολλές βαθμίδες ο ατμός θέρμανσης εισάγεται μόνο στην 1<sup>η</sup> βαθμίδα, όπου θερμαίνει την άλμη ως τη θερμοκρασία βρασμού. Οι ατμοί που σχηματίζονται στην 1<sup>η</sup> βαθμίδα χρησιμοποιούνται σαν ατμός θέρμανσης στη 2<sup>η</sup> βαθμίδα, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από την 1<sup>η</sup>, ώστε το διάλυμα της άλμης να βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Στις περισσότερες εγκαταστάσεις εξατμιστηρίων πολλαπλών βαθμίδων, η κυκλοφορία της άλμης και των ατμών γίνεται κατ'ομοροή.

Στο **σχήμα 6.10.6** δίνεται η διάταξη μιας μονάδας εξατμιστηρίων με  $n$  βαθμίδες και με κυκλοφορία του ατμού και της άλμης κατ'ομοροή. Οι διακεκομμένες γραμμές δίνουν την πορεία των ατμών και του αφραλατωμένου νερού, ενώ οι συνεχείς γραμμές δίνουν την πορεία του διαλύματος της άλμης. Ένα ποσοστό από το θαλάσσιο νερό ψύξης του αφραλατωμένου νερού, προκατεργάζεται με οξύ για την απομάκρυνση των αλάτων της σκληρότητας και μετά την έξοδό του από τον απαιρεωτή, όπου απομακρύνονται τα μη συμπυκνούμενα αέρια, αναμιγνύεται με το θαλάσσιο νερό τροφοδότησης. Η ανάμιξη γίνεται ε υπολογισμένη αναλογία των δύο διαλυμάτων, ώστε η περιεκτικότητα των αλάτων της σκληρότητας να βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα και να μην υπάρχει κίνδυνος σχηματισμού λεβητόλιθου. Το μίγμα που αποτελεί το θαλάσσιο νερό τροφοδότησης, προθερμαίνεται στους εναλλάκτες θερμότητας Θ από αφραλατωμένο νερό. Μετά την έξοδο του από τον τελευταίο εναλλάκτη, καταιονίζεται από την κορυφή του εξατμιστηρίου μέσα στους κατακόρυφους σωλήνες, όπου ρέει με την βαρύτητα προς τα κάτω. Για την ομοιόμορφη κατανομή του υγρού το πάνω τμήμα των σωληνών είναι εφοδιασμένο με κατανομείς, σημείο Α φωτογραφίας **σχήματος 6.10.4**.

Ο ατμός θέρμανσης εισάγεται στο πάνω τμήμα της δέσμης, των κατακόρυφων σωληνών στο περίβλημα, όπου συμπυκνώνεται στην εξωτερική επιφάνεια των σωληνών, θερμαίνοντας την άλμη μέχρι σημείου βρασμού της. Κατά την συμπύκνωση σχηματίζεται ένας λεπτός υμένας από αντίσταση στη ροή της θερμότητας. Το πάχος του εξαρτάται από την περιδίνιση του ατμού και από την ταχύτητα σχηματισμού του συμπυκνώματος, δηλαδή από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ατμού και διαλύματος τροφοδότησης. Στο εσωτερικό των σωληνών σχηματίζεται επίσης ένας λεπτός υμένας από διάλυμα άλμης, ο οποίος στο επάνω μέρος του σωλήνα είναι λεπτότερος, ενώ καθώς κατακλύδα στην εσωτερική επιφάνεια, παρασύρει νέα ποσότητα από το διάλυμα με αποτέλεσμα το πάχος του να αυξάνει (λεπτομέρεια Α και Β στο **σχήμα 6.10.6**). Το διάλυμα της άλμης θερμαινόμενο από τον ατμό φτάνει στο σημείο βρασμού και στο κατώτερο τμήμα της δέσμης των σωληνών, Β, καθώς καταιονίζεται από τους σωλήνες στον ελεύθερο χώρο της δεξαμενής Δ, σχηματίζει ατμούς που γεμίζουν όλο τον χώρο, ενώ η άλμη που δεν εξατμίστηκε συγκεντρώνεται στο κωνικό τμήμα του εξατμιστηρίου. Οι ατμοί αφού περάσουν από τον διαχωριστή Τ, όπου συγκρατούνται τα σταγονίδια του διαλύματος που παρασύρονται από τον ατμό, οδηγούνται στη δεύτερη βαθμίδα όπου θερμαίνουν την άλμη η οποία αντλείται από το κάτω μέρος της δεξαμενής Δ στο πάνω μέρος των σωληνών.

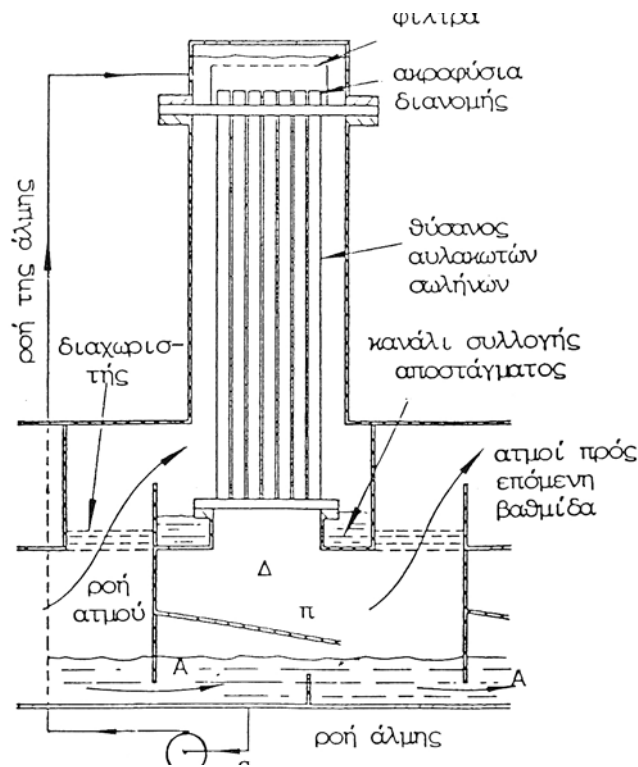
Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται ως την νιοστή βαθμίδα. Από την νιοστή βαθμίδα η άλμη αντλείται και απορρίπτεται χωρίς να επανακυκλοφορήσει. Εάν η θερμοκρασία της είναι επικίνδυνη για το περιβάλλον, ψύχεται ως την επιτρεπόμενη θερμοκρασία απόρριψης. Οι ατμοί που παράγονται στην νιοστή βαθμίδα ψύχονται στον συμπυκνωτή Σ από το θαλάσσιο νερό ψύξης, μέρος του οποίου χρησιμοποιείται ως τροφοδότηση.

Το σημείο βρασμού της άλμης ελατώνεται προοδευτικά σε κάθε επόμενη βαθμίδα. Αυτό επιτυγχάνεται με προοδευτική ελάτπωση της πίεσης στα εξατμιστήρια από την δεύτερη ως την νιοστή.

Η ολική διαφορά θερμοκρασίας από την πρώτη ως την νιοστή βαθμίδα είναι γύρω στους 40°C, και επιτρέπει ανάλογα με

τον αριθμό των βαθμίδων, μια διαφορά θερμοκρασίας ανά βαθμίδα  $\Delta t = 1.2$  ως  $1.6$  °C. Η πρώτη βαθμίδα συνήθως λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση, επομένως ο απαιτούμενος ατμός θέρμανσης είναι χαμηλής πίεσης.

Στο **σχήμα 6.10.7** δίνεται σε μεγέθυνση το κάτω τμήμα από ένα εξατμιστήριο με κατακόρυφους σωλήνες κατερχόμενου υμένα. Η ροή των διαλυμάτων και των ατμών διαγράφεται καθαρά. Το σημείο A είναι το άνοιγμα απ' όπου η άλμη μεταφέρεται στην επόμενη βαθμίδα και π είναι ένα προστατευτικό κάλυμμα που παρεμποδίζει την εκτίναξη άλμης στην δεξαμενή Δ, κατά την στροβιλώδη ροή από βαθμίδα σε βαθμίδα. Το εξατμιστήριο έχει δυνατότητα αυτοτροφοδότησης με αναρρόφηση άλμης από την δεξαμενή Δ και τροφοδότηση στην κορυφή του εξατμιστηρίου με την βοήθεια της αντλίας α.



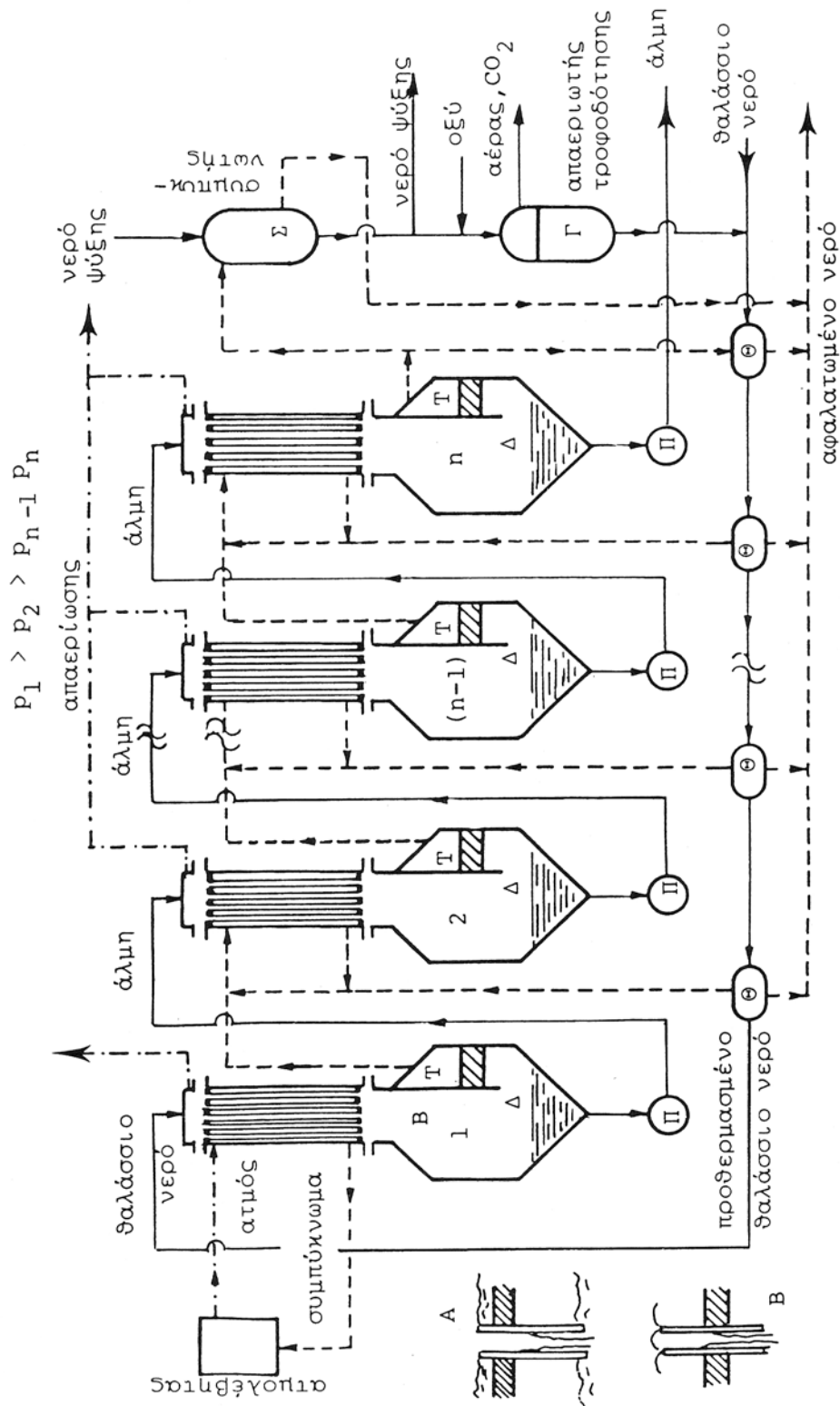
**Σχήμα 6.10.7** Λεπτομέρεια της ροής του ατμού και της άλμης στο κάτω τμήμα εξατμιστηρίου με κατακόρυφους σωλήνες και με κατερχόμενο υμένα.

Τα εξατμιστήρια με αναρριχόμενο υμένα είναι παρόμοια με αυτά με κατερχόμενο υμένα, η τροφοδότηση όμως της άλμης γίνεται από το κάτω τμήμα της δεξαμενής Δ, σχήμα 4.7. Η άλμη με τη βοήθεια αντλίας, προωθείται μέσα από το εσωτερικό των σωλήνων, ως το πάνω τμήμα της δέσμης A-A, όπου σχηματίζονται οι ατμοί, οι οποίοι συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή Σ, ενώ η άλμη που δεν εξατμίζεται προωθείται στον σωλήνα Τα με την βοήθεια του διανομέα δ, ο οποίος εμποδίζει την άλμη να εισχωρήσει στους σωλήνες.

Τα εξατμιστήρια με ανερχόμενο υμένα έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής από αυτά με κατερχόμενο υμένα, για την ίδια παροχή αφραλατωμένου νερού, και αντλίες με μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την ανύψωση της άλμης μέσα από τους σωλήνες, όπου λόγω της μικρής εσωτερικής διαμέτρου, οι τριβές είναι μεγάλες. Επιπλέον απαιτείται αυξημένη πίεση, ώστε να παραμένει η άλμη στον θάλαμο E. Αντίθετα στα εξατμιστήρια με κατερχόμενο υμένα, η κατανάλωση ενέργειας στις αντλίες είναι κατά πολύ μικρότερη, εφ' όσον προωθούν το διάλυμα ως το ανώτερο τμήμα στην κορυφή του εξατμιστηρίου, απ' όπου ρέει με την βαρύτητα στο εσωτερικό των σωληνών.

Στη μέθοδο εξάτμισης με κατερχόμενο υμένα, ο ατμός εισάγεται στο πάνω μέρος του εξατμιστηρίου, στο σημείο όπου το διάλυμα της άλμης έχει την χαμηλότερη θερμοκρασία  $t_s$ . Η σχετικά μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta t = t_s - t_e$  προκαλεί έντονο βρασμό στο πάνω μέρος της δέσμης του διαλύματος στο εσωτερικό των σωληνών. Αντίθετα στα εξατμιστήρια με αναρριχόμενο υμένα, ο ατμός εισάγεται μεν στο πάνω μέρος των σωληνών, το διάλυμα όμως της άλμης στο σημείο εισαγωγής του, έχει φτάσει ήδη σε θερμοκρασία βρασμού, επομένως η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta t$  είναι μικρότερη και η εξάτμιση ομαλότερη.

Παρ' όλα τα μειονεκτήματα των εξαπμοστηρίων με αναρριχόμενο υμένα, το κεφάλαιο εγκατάστασης τους είναι κατά μέσο όρο μικρότερο κατά 60% από αυτό με κατερχόμενο υμένα. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με την μέθοδο κατακόρυφων σωλήνων είναι με κατερχόμενο υμένα.



Σχήμα 6.10.6 Διάταξη εξαπμοστηρίων πολλαπλών βαθμίδων (ME) με κατακόρυφους μακρούς σωλήνες, και κατερχόμενο υμένα υγρού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 7: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Η απόσταξη νερού με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο αρχαιότερος και απλούστερος τρόπος εφαρμογής της. Έχει αποδειχτεί ότι οι ηλιακοί αποστακτήρες παραγωγής πόσιμου νερού, λειτουργούν φθηνότερα απ' όλα τα άλλα συστήματα, επειδή δεν απαιτούν δαπάνες ηλεκτρικού ρεύματος.

Η πρώτη μεγάλη εγκατάσταση ηλιακής απόσταξης, κατασκευάστηκε το 1872 από τον Σουηδό μηχανικό Carlow Wilson στο Las Salinas της Χιλής, για να εφοδιαστούν οι ανθρακωρύχοι με πόσιμο νερό (Σχήμα-7.1).



**Σχήμα 7.1. Πειραματική εγκατάσταση αφαλάτωσης στο Las Salinas της χιλής.Καθημερινή απόδοση 22,500lt πόσιμου νερού.**

Η έλλειψη πόσιμου νερού ήταν ιδιαίτερα έντονη σε ύψος 1400m και σε απόσταση 120km από το λιμάνι Antofagasta. Υπήρχε νερό με περιεκτικότητα άλατος μόνο 14%. Έτσι κατασκευάστηκε ένας ηλιακός αποστακτήρας με 60 δοχεία, που το καθένα τους είχε διαστάσεις 1,20m\*60cm, με τον οποίο επιτεύχθηκε μέση απόδοση 22.500 λίτρων αποσταγμένου νερού την ημέρα. Σε επιφάνεια 1m<sup>2</sup> αντιστοιχούσε μέση απόδοση 4,6 λίτρων. Η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια σε αυτό το υψόμετρο υπολογίστηκε σε 8000cal (33.500 Joule) ανά m<sup>2</sup> και ημέρα. Μ' αυτό τον τρόπο ο αποστακτήρας είχε βαθμό απόδοσης 35%. Δυστυχώς ο αέρας είχε θερμοκρασία 60°C, όταν ο ήλιος βρισκόταν στο Ζενίθ, πράγμα που μείωνε πολύ την απόδοση (Σχήμα-7.1).

- Στο Coya Sur (του νομού Antofagasta) της Χιλής το 1951, κατασκευάστηκε μεγαλύτερη εγκατάσταση αποτελούμενη από 10 δοχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα επιφάνειας 44.000m<sup>2</sup> για την Compañia Salitrera Anglo Lautaro. Σ' αυτή την εγκατάσταση εξατμίζονται κατά μέσο όρο 236.000 λίτρα νερού την ημέρα για να συμπυκνωθούν διαλύματα νιτρικού οξέως.

- Μια παρόμοια αλλά μικρότερη εγκατάσταση κατασκευάστηκε στο νησί St. John, που βρίσκεται στο 18<sup>ο</sup> βόρειο γεωγραφικό πλάτος. Εκεί 125 ηλιακοί αποστακτήρες με ολική επιφάνεια 375 m<sup>2</sup> παράγουν πόσιμο νερό για τους 750 κατοίκους του νησιού.
- Στο Abhu Dhabi στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, κατασκευάστηκε μία μονάδα ηλιακής αφαλάτωσης για παραγωγή πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό. Εγκαταστάθηκε το 1984, σχεδιασμένο για παραγωγή 85m<sup>3</sup>/day φρέσκου νερού από θαλασσινό νερό με περιεκτικότητα σε άλατα 55,000ppm.
- Στη Νότια Αυστραλία, κοντά στο Port Augusta πρόκειται να εγκατασταθεί η πρώτη εγκατάσταση ηλιακής αφαλάτωσης. Το πεδίο των συλλεκτών θα τοποθετηθεί σε μια έκταση 2 τετραγωνικών χιλιομέτρων και κάθε ηλιακός καθρέπτης θα έχει ύψος 3 μέτρα. Θα παράγει 5.5gigalitres νερού τον χρόνο.
- Στην Μάλτα αποφασίστηκε το 1960 να κατασκευαστεί μία μονάδα ηλιακής απόσταξης για αφαλάτωση, που θα παρήγαγε 27,280m<sup>3</sup>/day. Η πρώτη μονάδα των 4,546m<sup>3</sup>/day ξεκίνησε τον Αύγουστο του 1966 και μέχρι το τέλος του 1969 η συνολική δυνατότητα παραγωγής αφαλατωμένου νερού της μονάδας ήταν 18,180m<sup>3</sup>/day.
- Στην Κρήτη και στο ξενοδοχείο Candia Maris εφαρμόστηκε ένα έργο εξοικονόμησης ενέργειας με την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών, συστήματος ψύξης από θάλασσα και παραγωγή νερού από θαλασσινό νερό. Το έργο συνοδεύτηκε από την κατασκευή ενός νέου μηχανοστασίου 300 m<sup>2</sup> και πλήρη ανακατασκευή των κεντρικών μηχανοστασίων του συγκροτήματος.  
 Στην ξενοδοχειακή μονάδα πραγματοποιήθηκαν οι κάτωθι εγκαταστάσεις:  
 Εγκατάσταση ηλιακού πεδίου συνολικής επιφάνειας 2400 m<sup>2</sup> από επιλεκτικούς άθραυστους συλλέκτες υψηλής απόδοσης και ισχύος 1,6 MW.  
 Εγκατάσταση αφαλάτωσης θάλασσας τρίτης γενιάς δυναμικότητας 120 m<sup>3</sup>/ημέρα με ειδικό εναλλάκτη πίεσης που διασφαλίζει την παραγωγή νερού με την χρήση 70 % λιγότερης ενέργειας σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες.  
 Εγκατάσταση εναλλακτών θερμότητας τιτανίου και συστήματος αναρρόφησης νερού από την θάλασσα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αποβολή θερμότητας των κεντρικών ψυκτικών συγκροτημάτων.  
 Στο νέο συγκρότημα του Creta Maris ολοκληρώθηκε ένα ακόμη πρωτοποριακό έργο εξοικονόμησης ενέργειας με την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών και αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού. Η νέα εγκατάσταση τροφοδοτεί με θερμό νερό το νέο συγκρότημα και το σύνολο των bungalows του υφιστάμενου συγκροτήματος, ενώ η νέα μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτεί όλο το νέο συγκρότημα, το θερμό νερό των bungalows του υφιστάμενου συγκροτήματος αλλά και το σύνολο της κατανάλωσης της κουζίνας του υφιστάμενου συγκροτήματος.  
 Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν οι κάτωθι εγκαταστάσεις:  
 Εγκατάσταση ηλιακού πεδίου συνολικής επιφάνειας 1.100 m<sup>2</sup> από 390 επιλεκτικούς άθραυστους συλλέκτες υψηλής απόδοσης και ισχύος 1,3 MW  
 Εγκατάσταση θερμικών αποθηκών γλυκού νερού συνολικής χωρητικότητας 40 m<sup>3</sup>  
 Εγκατάσταση αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού τελευταίας γενιάς δυναμικότητας 200 m<sup>3</sup>/ημέρα  
 Και στα δυο συγκροτήματα το παραγόμενο νερό από την αφαλάτωση μετά την εξισορρόπηση του διαθέτει ιδανικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Το νερό αυτό τροφοδοτεί όλο το σύστημα παραγωγής θερμού νερού καθώς και όλες τις συσκευές κουζίνας, διασφαλίζοντας την υψηλή ποιότητα των αφεψημάτων και ποτών καθώς και την απόλυτη καθαρότητα και διαύγεια σε ποτήρια και πιάτα με παράλληλη σημαντική μείωση χρήσης απορρυπαντικών.

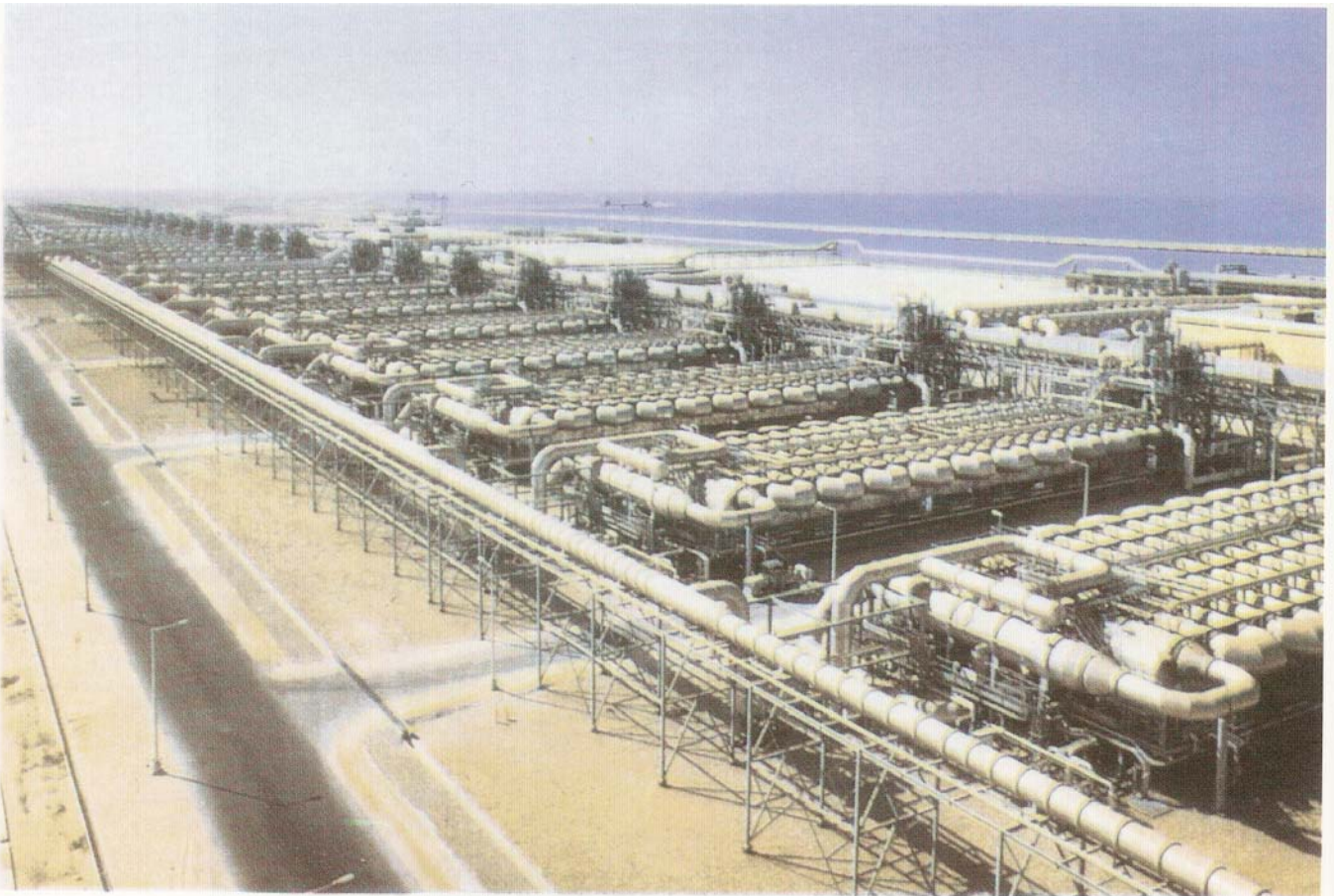


Το ηλιακό πεδίο του Candia Maris είναι ένα από τα μεγαλύτερα στην Ευρώπη για την παραγωγή θερμού νερού και ενδεικτικά αναφέρουμε ότι τον μήνα Αύγουστο, που το ξενοδοχείο ήταν υπερπλήρες, τόσο το ξενοδοχειακό συγκρότημα όσο και το κέντρο θαλασσοθεραπείας κάλυψαν πλήρως τις απαιτήσεις τους σε θερμό νερό αλλά και σε θερμό θαλασσινό νερό με μηδενική κατανάλωση καυσίμου. Το έργο στο Candia Maris ολοκληρώθηκε με τη χρήση θαλασσινού νερού ως μέσο ψύξης των κεντρικών ψυκτικών συγκροτημάτων, που θα εξοικονομήσουν το 30% της κατανάλωσης ρεύματος για κλιματισμό, του οποίου η ποιότητα θα αναβαθμιστεί σε όλα τα τμήματα του ξενοδοχείου.

Παράλληλα, για να μην υπάρξει η παραμικρή αισθητική ή άλλη όχληση στους λουόμενους η αναρρόφηση της θάλασσας και η επιστροφή της έγινε χωρίς υποθαλάσσιους αγωγούς αλλά με πρωτοποριακή τεχνική κάτω από την παραλία.

Όλες οι εγκαταστάσεις και στα δύο ξενοδοχεία ελέγχονται από ένα υπερσύγχρονο ηλεκτρονικό σύστημα, το οποίο διαθέτει γραφική απεικόνιση και χειρισμό από ηλεκτρονικό υπολογιστή, παρέχοντας την δυνατότητα εκκίνησης ή διακοπής λειτουργίας οποιουδήποτε συστήματος, διάγνωσης και ειδοποίησης τυχόν βλαβών καθώς και δυνατότητα συστηματικής παρακολούθησης όλων των λειτουργικών παραμέτρων του μηχανολογικού εξοπλισμού συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων στατιστικών μεγεθών όπως η παραγόμενη ενέργεια από το ηλιακό πεδίο, παραγωγή νερού, κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, διακύμανση θερμοκρασιών κ.α.

Στη συνέχεια στα **Σχήματα 7.2 ως 7.12** απεικονίζονται εγκαταστάσεις αφαλάτωσης ανά τον κόσμο.



Η μεγαλύτερη εγκατάσταση αφαλάτωσης στον κόσμο, η οποία λειτουργεί με την μέθοδο της εκρηκτικής εξάτμισης. Είναι αυτή στο Al-Jubail της Σαουδικής Αραβίας. Στη φωτογραφία είναι η φάση II και αποτελείται από 20 μονάδες με χωρητικότητα  $20 \times 23500.2 = 470000 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $5.2 \text{ MIGPD} \times 20 = \text{Mega-Imperial-gallons per day}$ ).

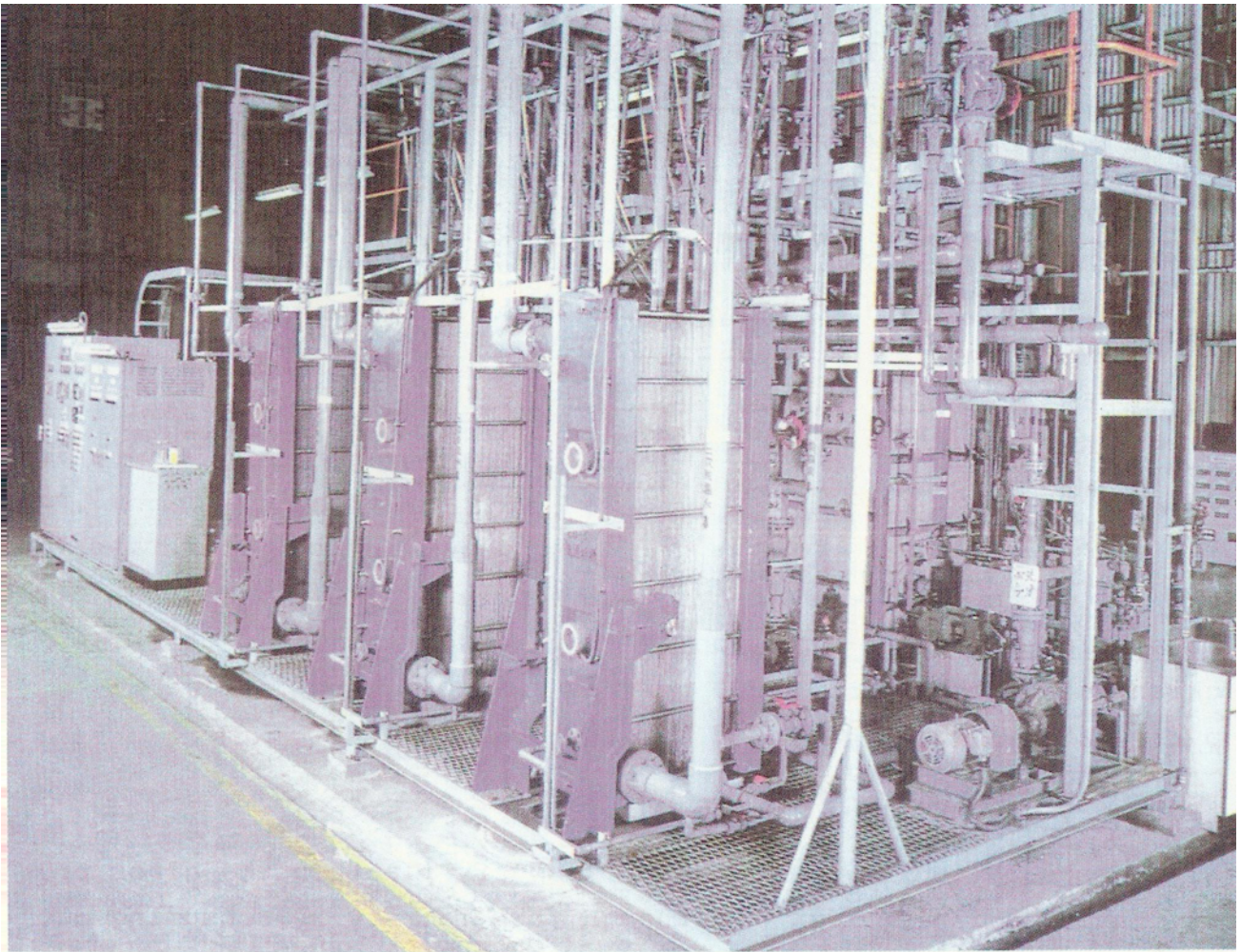
**Σχήμα 7.2 AL-Jubail στη Σαουδική Αραβία.Εκρηκτική Εξάτμιση.**





**Σχήμα 7.3.Εγκατάσταση αφαλάτωσης με τη μέθοδο της μηχανικής επανασυμπίεσης ατμών. Τα εξατμιστήρια είναι πολλαπλών βαθμίδων με οριζόντιους σωλήνες κατερχόμενου υμένα. (I.D.E. TECHNOLOGIES Ltd)**





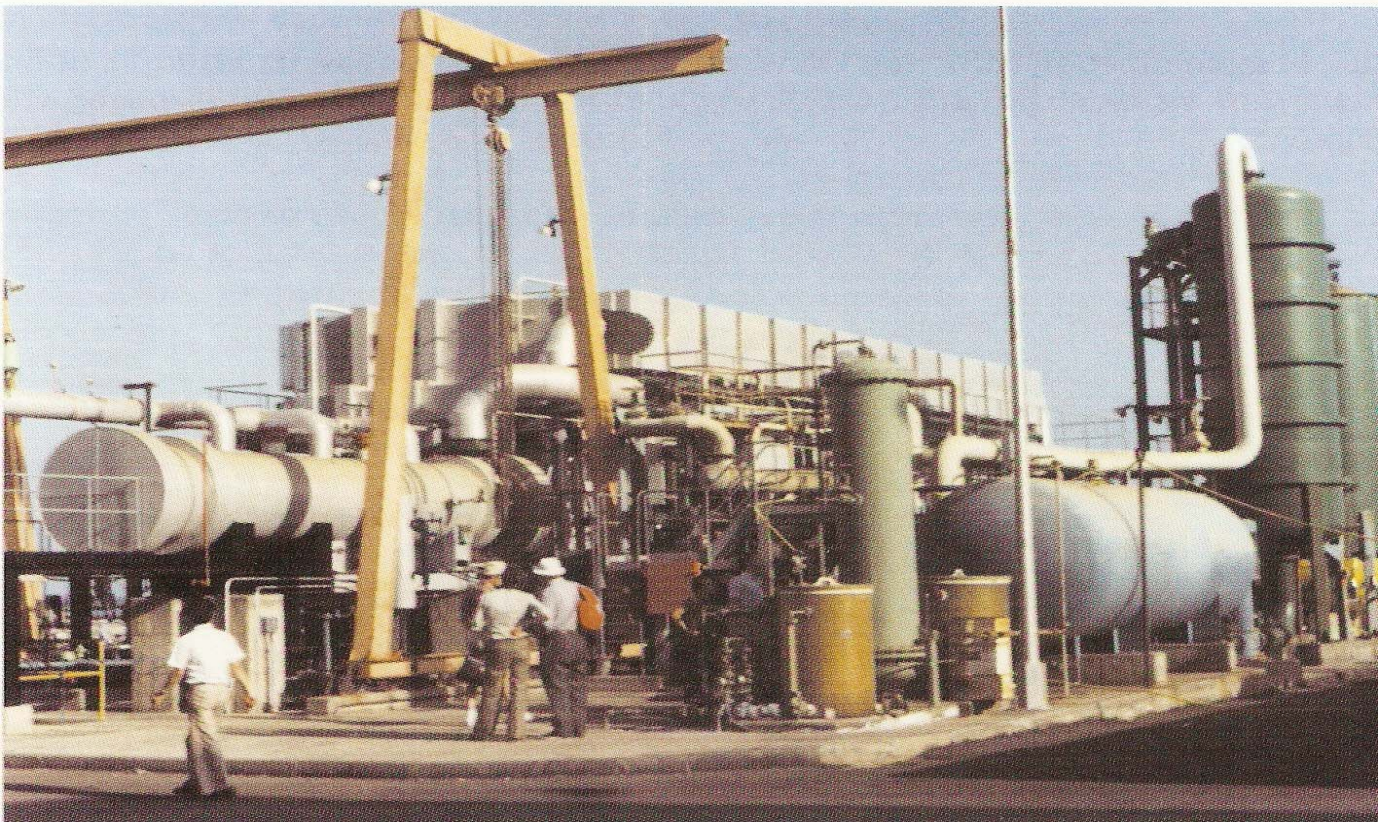
**Σχήμα 7.4.Εγκατάσταση ηλεκτροδιάλυσης με νερό τροφοδότησης <math>750\text{ppm}</math> και κατανάλωση ρεύματος <math>1\text{kWh/m}^3</math> (η εγκατάσταση είναι της Ιαπωνικής εταιρίας Asahi Glass Co., Ltd και χρησιμοποιεί μεμβράνες selemission).**





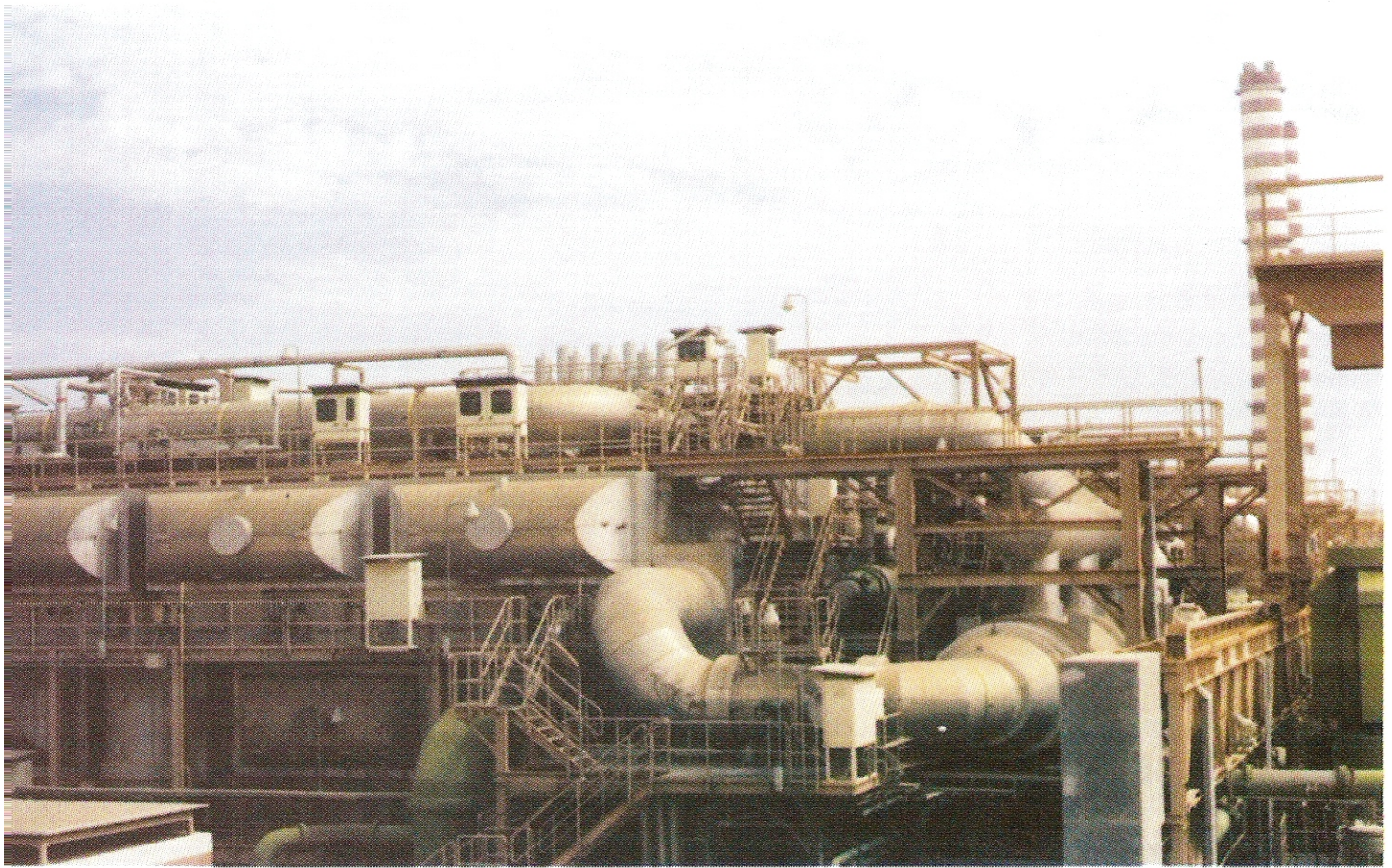
**Σχήμα 7.5. Εγκατάσταση παραγωγής αφαλατωμένου νερού με ηλεκτροδιάλυση. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τα φωτοβολταϊκά κελιά (Φωτογραφία της New Energy Development Organization, NEDO), στο νησί Oshima, Ιαπωνία.**



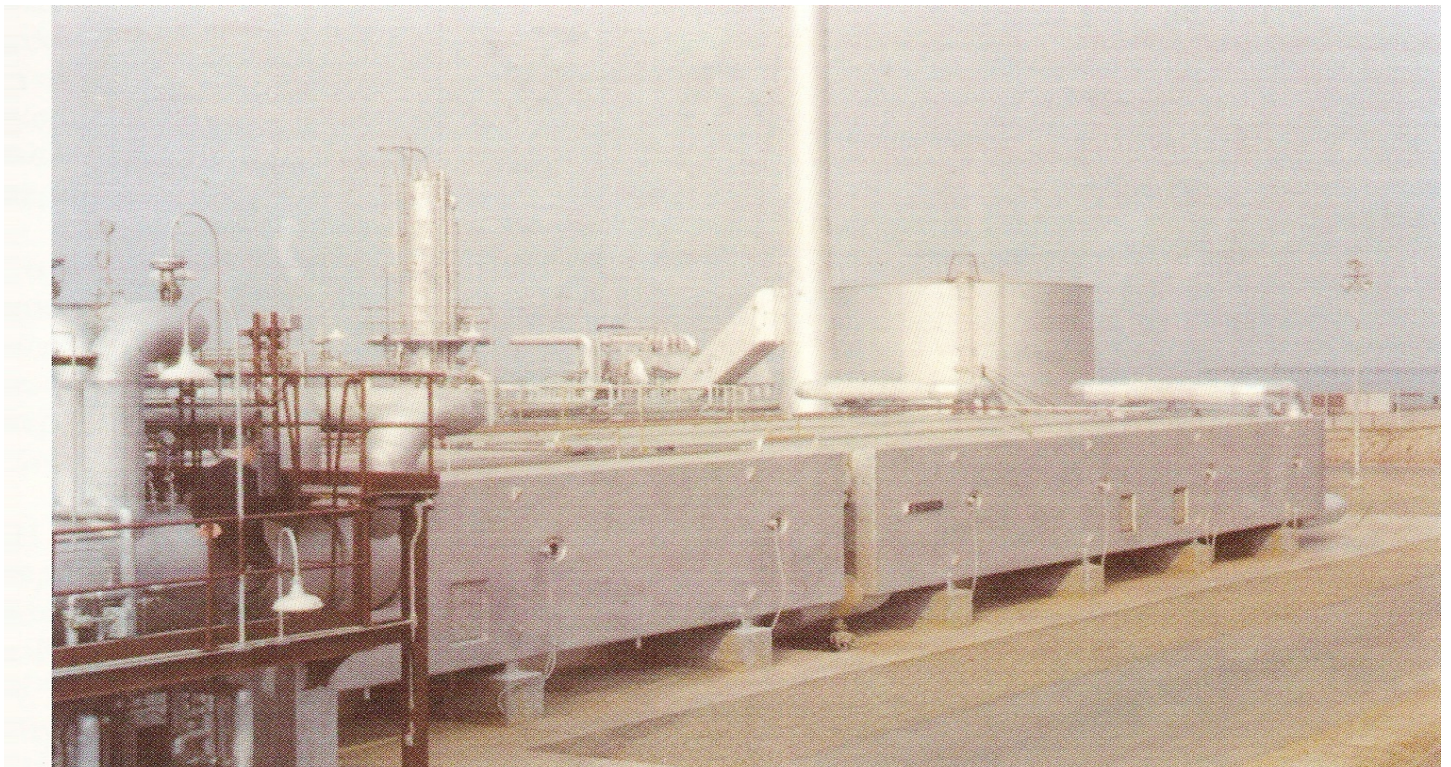


Σχήμα 7.6.Εγκατάσταση αφαλάτωσης με την μέθοδο MSF και σταυρωτό θύσανο κυκλοφορίας της άλμης. Η εγκατάσταση παρέχει  $18,000\text{m}^3/\text{day}$  αφαλατωμένο νερό στην πρωτεύουσα της Gran Canaria, Las Palmas. Η εγκατάσταση είναι κοινοτική και έχει κατασκευαστεί από την Ισπανική Babcock-Wilcox, Pridesa, S.A. Στην δεύτερη φωτογραφία φαίνεται ο θερμαντής της άλμης και τα σιλό των χημικών για την αποθήκευση των χημικών ουσιών προκατεργασίας του αφαλατωμένου νερού.



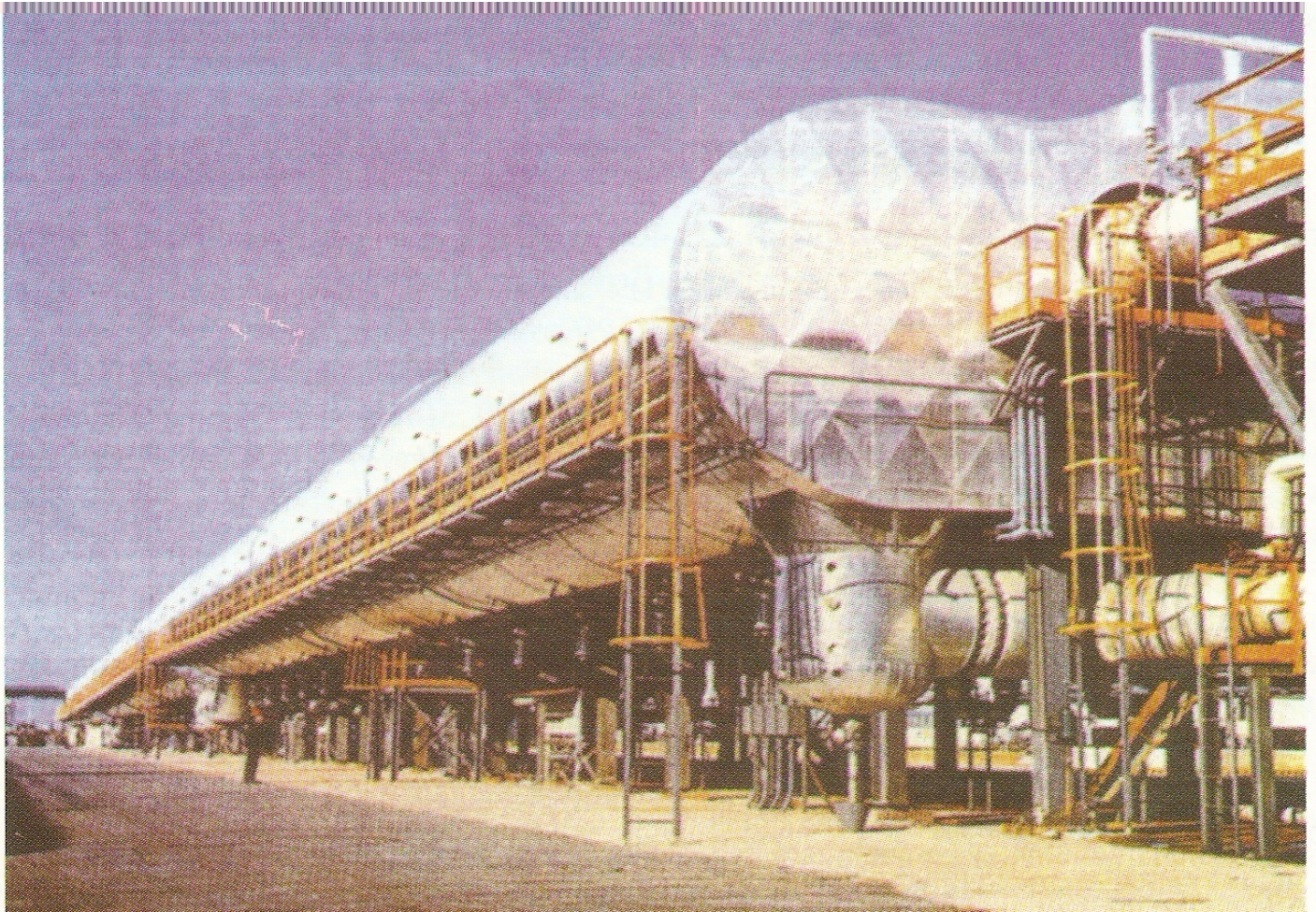


**Σχήμα 7.7.Εγκατάσταση αφαλάτωσης στηνDoha του Kuwait, σε σταυρωτή διάταξη των σωλήνων του συμπυκνωτή.Εγκατάσταση 1988.**



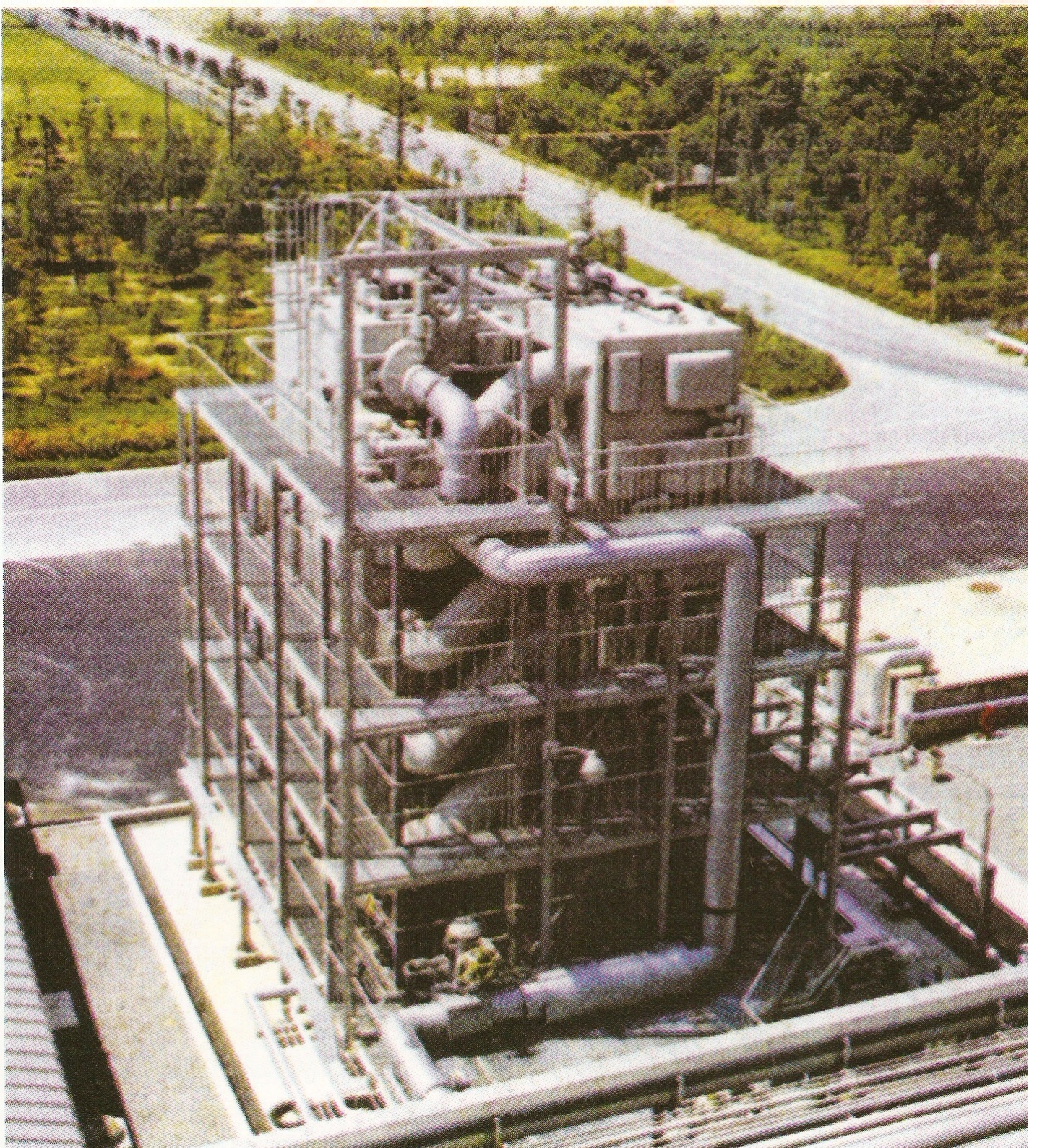
**Σχήμα 7.8. Η εγκατάσταση MSF του OSW του Point Loma.Φαίνονται καθαρά οι δύο σειρές οι οποίες περιέχουν τις οκτώ βαθμίδες θέρμανσης ανά σειρά, με τα όργανα μέτρησης στις μικρές κυκλικές θυρίδες.**





**Σχήμα 7.9** Η μεγαλύτερη μοναδιαία σειρά αφαλάτωσης με την μέθοδο MSF στο Porto-Torres της Σαρδηνίας.(Η μονάδα αυτή τη στιγμή είναι εκτός λειτουργίας)





**Σχήμα 7.10 Η εξωτερική όψη μιας μονάδας αφαλάτωσης με το σύστημα MES. Είναι μονάδα παραγωγής 2000m<sup>3</sup>/h.**





**Σχήμα 7.11** Εγκατάσταση αφαλάτωσης με ανάστροφη ηλεκτροδιάλυση στην Σαρασότα της Φλώριδας, U.S.A. Αποτελείται από 10 μονάδες χωρητικότητας  $45420\text{m}^3/\text{day}$ . Στην φωτογραφία φαίνονται μόνο οι 4 μονάδες της εγκατάστασης.





Σχήμα 7.12 Η εγκατάσταση του OSW, στο Roswell του Νέου Μεξικού με την μέθοδο της μηχανικής επανασυμπίεσης των ατμών.Υπήρξε η μοναδική μεγάλης χωρητικότητας εγκατάσταση στον κόσμο, παροχής  $3785\text{m}^3/\text{day}$ .



**8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Επειδή στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας πρόκειται να γίνει μια εφαρμογή αφαλάτωσης με ηλιακή απόσταξη για την νήσο Νάξο, αναφέρονται τα κλιματολογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά του νησιού παρακάτω.

**8.2 ΚΛΙΜΑ**

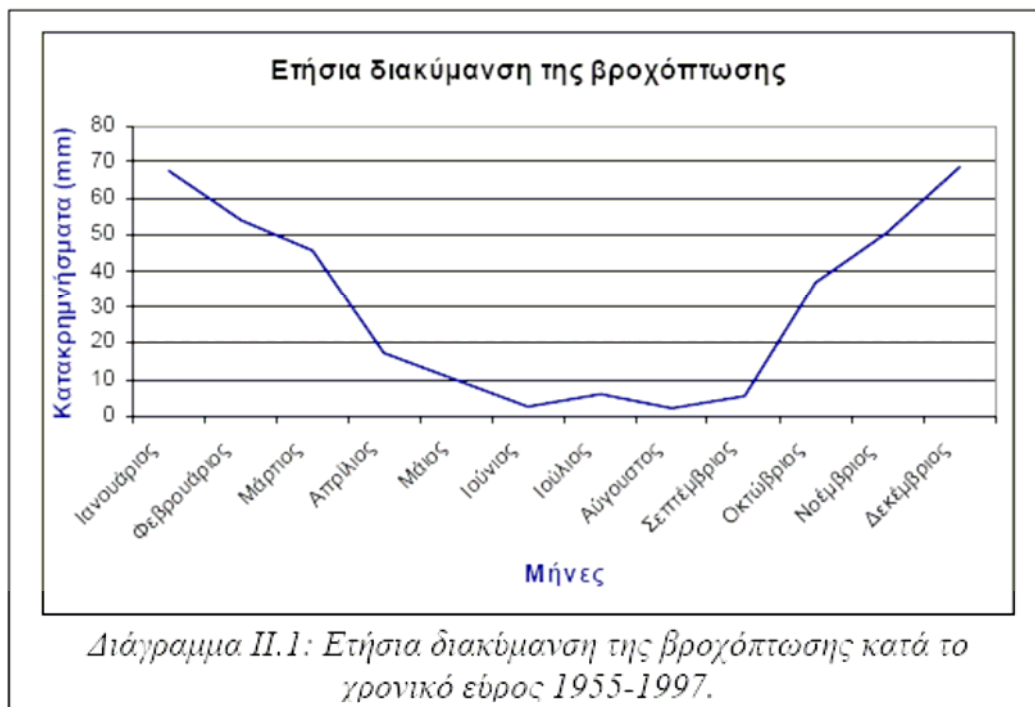
Η Νάξος, όπως και οι υπόλοιπες Κυκλάδες, έχει σχετικά ξηρό κλίμα (Theocharatos, G., 1978). Οι βροχοπτώσεις στις Κυκλάδες είναι από τις χαμηλότερες της Ελλάδας. Οι μήνες κατά τους οποίους σημειώνονται τα μεγαλύτερα ύψη βροχής είναι ο Δεκέμβριος (68,7mm) και ο Ιανουάριος (67,6mm) (Διάγραμμα 8.1). Η Νάξος είναι μία από τις ξηρότερες περιοχές της Ελλάδας με μέσο ετήσιο ύψος βροχής 366,8mm.

Ο χειμώνας στις Κυκλάδες είναι ιδιαίτερα ήπιος. Στις ορεινές περιοχές της Νάξου οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες κατά 2-3°C. Το καλοκαίρι οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες από τις επικρατούσες άλλων περιοχών της Ελλάδας και πάντοτε μικρότερες των 26°C. Αυτό οφείλεται στην επίδραση της θάλασσας, αλλά και στους ανέμους που παρουσιάζουν μεγάλη συχνότητα και ένταση με αποτέλεσμα την ελάττωση της θερμοκρασίας. Η εξάτμιση λόγω αυξημένης θερμοκρασίας, χαμηλού ποσοστού υγρασίας στον αέρα, μέτριας υγρασίας του εδάφους, μεγάλης ηλιοφάνειας και ισχυρών ανέμων, γίνεται εντονότατη ιδίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Στατιστικά, η μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζεται τον Ιούλιο και η μικρότερη τον Δεκέμβριο. Στον **πίνακα 8.1** φαίνονται τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής που προέρχονται από το αρχείο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) και αφορούν στο χρονικό εύρος 1955 έως και 1997.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1.ΜΕΣΑ ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ**

| <i>Πίνακας II.1</i> |                        |
|---------------------|------------------------|
| <i>Μήνας</i>        | <i>Βροχόπτωση (mm)</i> |
| Ιανουάριος          | 67,6                   |
| Φεβρουάριος         | 54,2                   |
| Μάρτιος             | 45,8                   |
| Απρίλιος            | 17,4                   |
| Μάιος               | 9,8                    |
| Ιούνιος             | 2,6                    |
| Ιούλιος             | 6                      |
| Αύγουστος           | 2                      |
| Σεπτέμβριος         | 5,5                    |
| Οκτώβριος           | 36,6                   |
| Νοέμβριος           | 50,6                   |
| Δεκέμβριος          | 68,7                   |





### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.1. ΕΤΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ 1955-1997

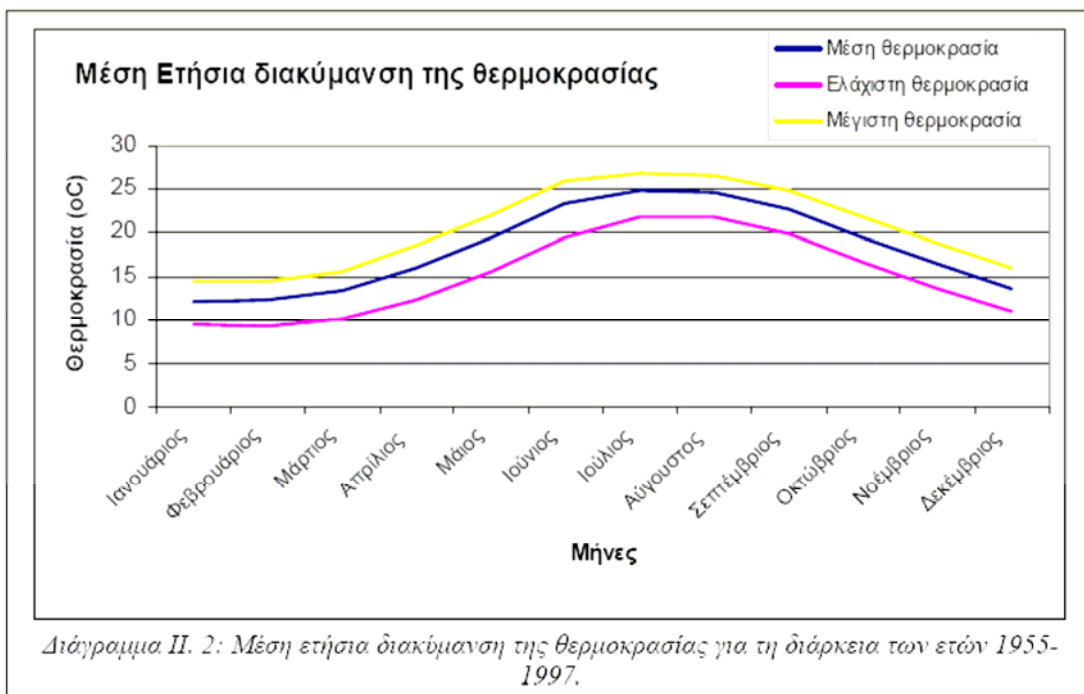
Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 366,8mm, αλλά δεδομένου ότι ο σταθμός βρίσκεται στη Νάξο, αναμένεται να είναι λίγο μεγαλύτερο στο όρος Ζεύς.

Στον **Πίνακα 8.2** που ακολουθεί αναγράφονται οι μέσες, ελάχιστες και μέγιστες μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας για το χρονικό εύρος 1955-1997.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 8.2. ΜΕΣΕΣ, ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ, ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ 1955-1997

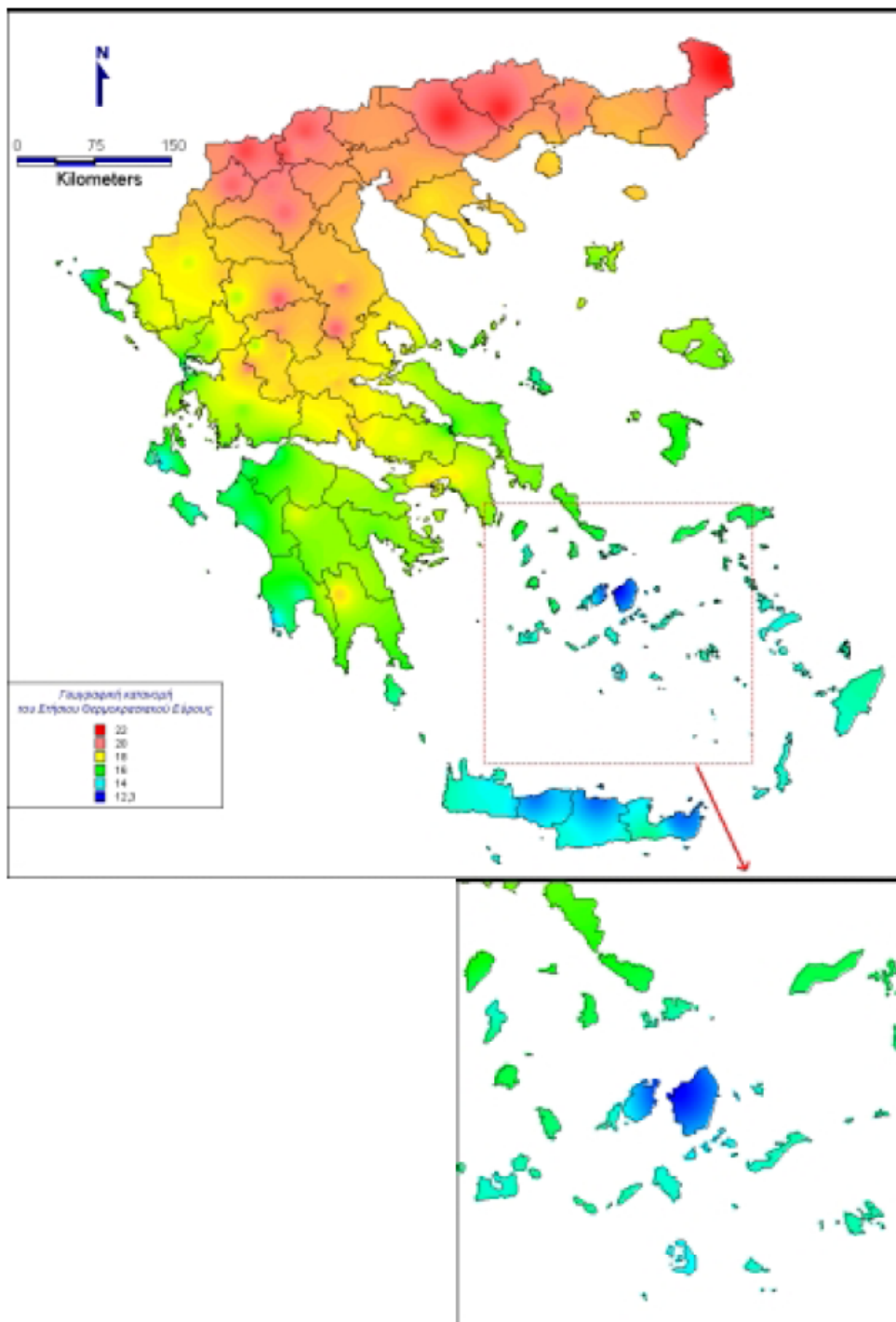
| Μήνας       | Θερμοκρασία |               |              |
|-------------|-------------|---------------|--------------|
|             | Μέση        | Μέση ελάχιστη | Μέση μέγιστη |
| Ιανουάριος  | 12,1        | 9,4           | 14,4         |
| Φεβρουάριος | 12,2        | 9,3           | 14,5         |
| Μάρτιος     | 13,3        | 10,2          | 15,6         |
| Απρίλιος    | 16          | 12,4          | 18,6         |
| Μάιος       | 19,5        | 15,5          | 22           |
| Ιούνιος     | 23,3        | 19,4          | 25,8         |
| Ιούλιος     | 24,8        | 21,7          | 26,8         |
| Αύγουστος   | 24,7        | 21,8          | 26,6         |
| Σεπτέμβριος | 22,7        | 19,8          | 24,8         |
| Οκτώβριος   | 19,5        | 16,7          | 21,8         |
| Νοέμβριος   | 16,3        | 13,5          | 18,7         |
| Δεκέμβριος  | 13,7        | 10,9          | 15,9         |

μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,18°C. Όπως φαίνεται ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση μέγιστη θερμοκρασία 26,8°C και ο ψυχρότερος ο Φεβρουάριος με μέση ελάχιστη θερμοκρασία 9,3°C. Το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος είναι 12,7°C (**Σχήμα 8.1**). Στο **διάγραμμα 8.2** φαίνονται οι μεταβολές της μέσης, μέσης ελάχιστης και μέσης μέγιστης θερμοκρασίας στη Νάξο για το χρονικό διάστημα των 42 ετών (1955 έως 1997) να ακολουθούν παράλληλη πορεία.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.2. ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, 1955-1997.**

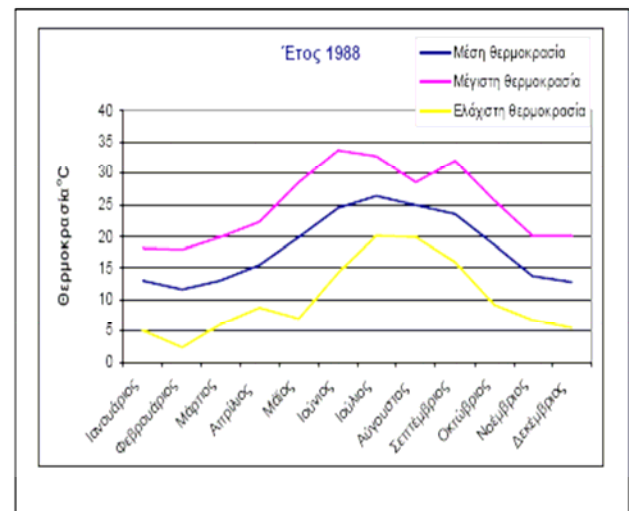
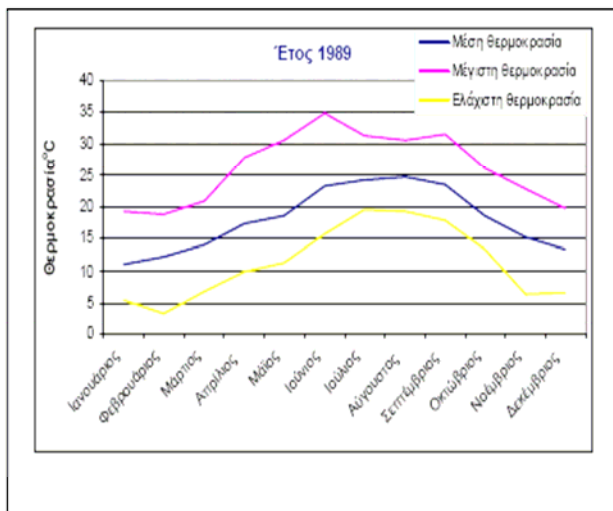
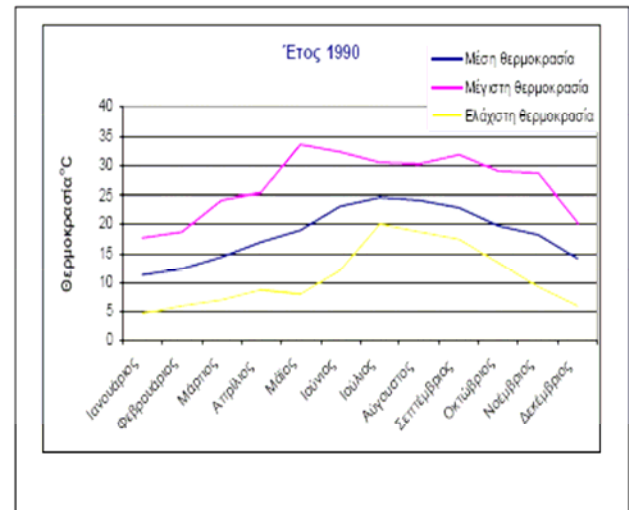
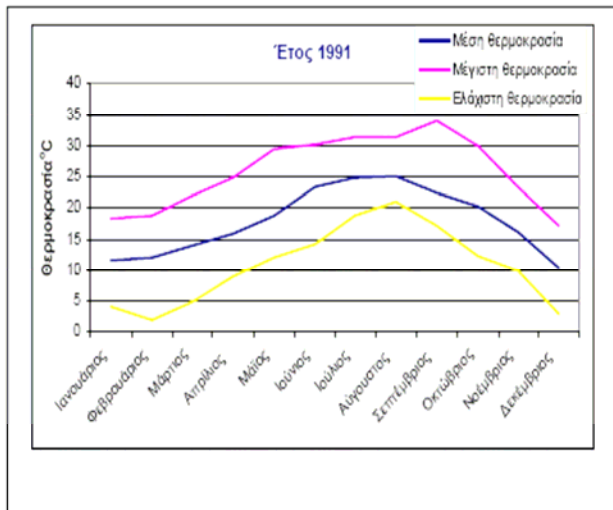
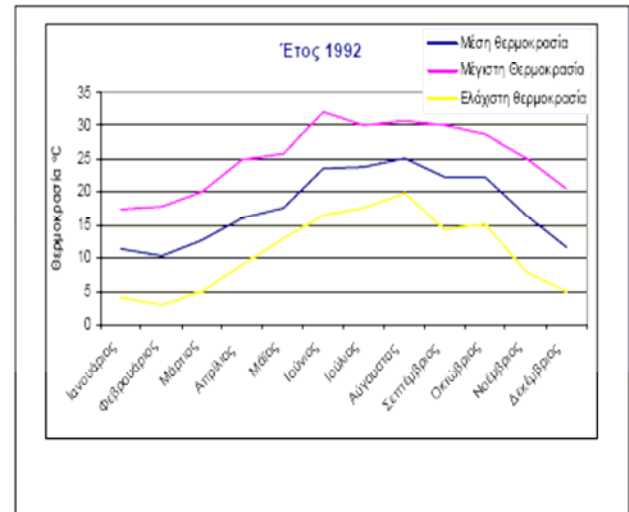
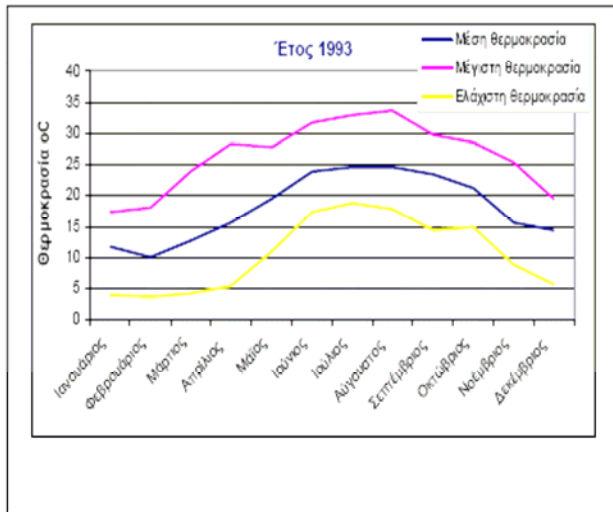
Η πορεία της μέσης, μέγιστης & ελάχιστης θερμοκρασίας κατά έτος φαίνεται στα **διαγράμματα 8.3** που ακολουθούν.



Εικ. Π.3: Κατανομή του ετήσιου θερμοκρασιακού εύρους

**ΣΧΗΜΑ 8.1. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΕΤΗΣΙΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΕΥΡΟΥΣ**

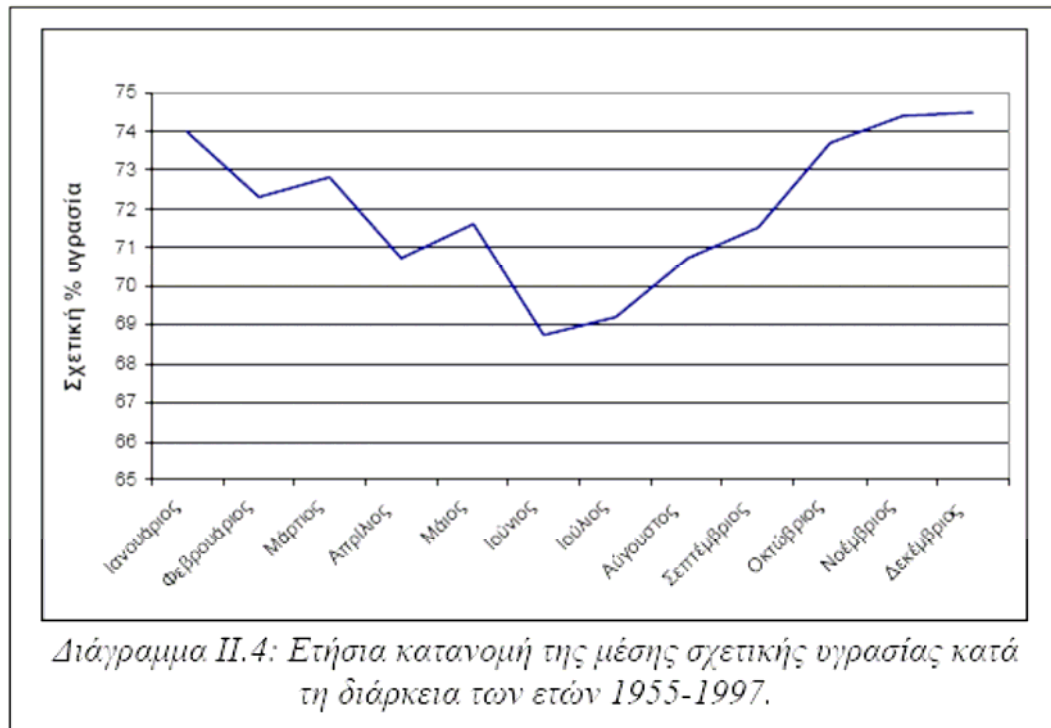
Διαγράμματα II.3: Πορεία της μέσης, μέγιστης & ελάχιστης θερμοκρασίας κατά έτος  
(από στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας Ελλάδος για 10 έτη)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.3.ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ, ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΕΤΟΣ**

Η διεύθυνση του επικρατούντος ανέμου καθόλη τη διάρκεια του έτους είναι από βορρά προς νότο. Εξάλλου το ίδιο το κλίμα της νήσου και του κεντρικού Αιγαίου γενικότερα, είναι αντιπροσωπευτικό των ετησίων ανέμων, που πνέουν από βόρειες διευθύνσεις κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το όνομα των ετησίων ανέμων προέρχεται από τη λέξη 'έτος' και είναι ενδεικτική της κανονικότητας που χαρακτηρίζει την εμφάνισή τους. Επικρατούν στην περιοχή του Αιγαίου από τα μέσα Μαΐου έως και τα μέσα Σεπτεμβρίου. Η έντασή τους λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της τις πρώτες απογευματινές ώρες, ενώ μπορεί να μηδενιστεί κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η γένεσή τους οφείλεται στην παρουσία εκτεταμένου βαρομετρικού χαμηλού που συνήθως εντοπίζεται το καλοκαίρι στη βορειοδυτική Ινδία.

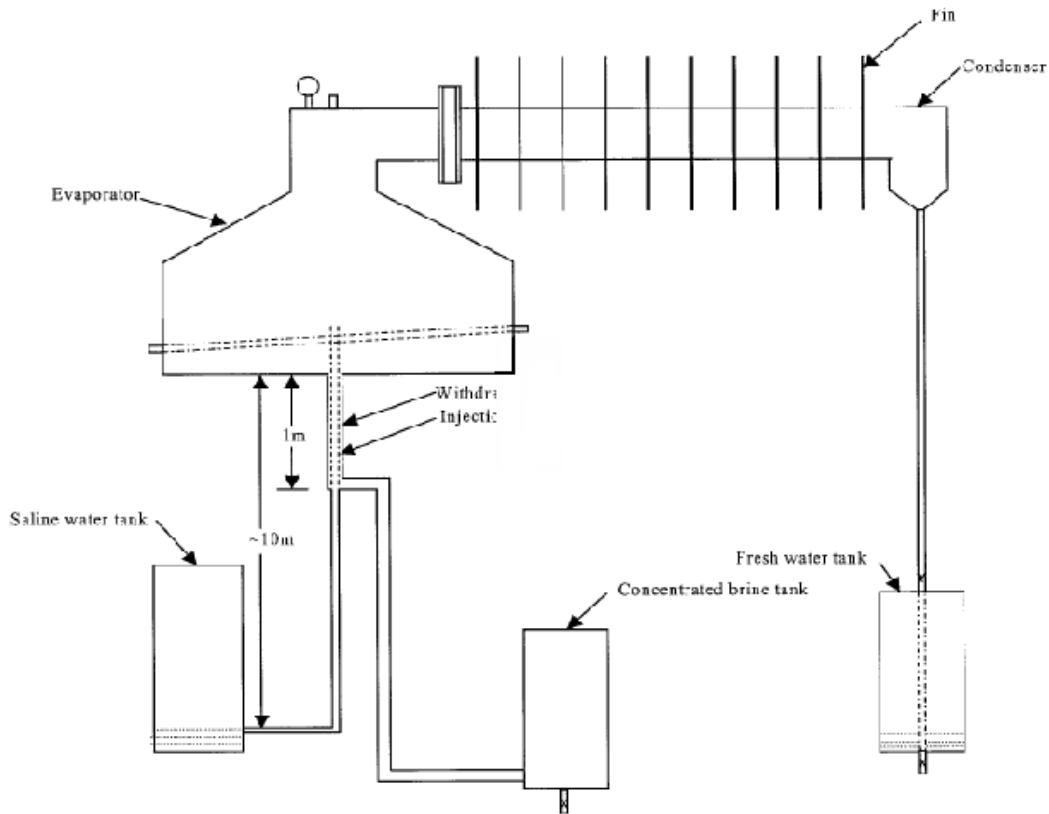
Η μέση ετήσια τιμή της σχετικής υγρασίας της Νάξου, όπως αυτή υπολογίστηκε από το αρχείο των 42 ετών είναι 72%. Οι πιο υγροί μήνες είναι οι Νοέμβριος, Δεκέμβριος και Ιανουάριος με μικρές μεταξύ τους διαφορές, ενώ η διαφορά μεταξύ του ξηρότερου και του υγρότερου μήνα δεν ξεπερνά το 5,8% (Διάγραμμα 8.4).



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.4. ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ, 1955-1997**

## 9. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

### 9.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΥΔΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ (low grade)



**Σχήμα 9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΥΔΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ**

Στην εφαρμογή αυτή παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση ενός συστήματος αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια, που χρησιμοποιεί φυσικές δυνάμεις όπως η ατμοσφαιρική πίεση και η βαρύτητα για τη δημιουργία κενού αέρος. Η ατμοσφαιρική πίεση είναι αντίστοιχη με την υδροστατική πίεση που αναπτύσσεται από μια στήλη νερού ύψους περίπου 10 μέτρων. Έτσι, λοιπόν αν μια στήλη με ύψος πλέον των 10 μέτρων και κλειστή στο επάνω μέρος γεμίσει με νερό και το νερό αφεθεί να πέσει εξαιτίας της βαρύτητας, θα πέσει σε ένα ύψος 10 μέτρων δημιουργώντας κενό αέρος στην περιοχή πάνω από αυτό. Το σύστημα αφαλάτωσης το οποίο εξετάζεται κάνει χρήση αυτού του φαινομένου.

Στο σύστημα περιλαμβάνονται ένας ηλιακός συλλέκτης κλειστού κυκλώματος θέρμανσης, ένας ατμοποιητής και ένας υγροποιητής τοποθετημένα σε απόσταση 10 μέτρων από το έδαφος και συνδεδεμένα μέσω σωληνών με την παροχή αλμυρού νερού, την αποβολή της άλμης και μια δεξαμενή φρέσκου νερού, όλα τοποθετημένα στο επίπεδο του εδάφους. Έτσι κενό δημιουργείται με την εξισορρόπηση των υδροστατικών και ατμοσφαιρικών πιέσεων στους σωλήνες ανεφοδιασμού και απαλλαγής.

Ο ατμοποιητής έχει μια παροχή που του προσδίδει ηλιακή ή άλλου είδους θερμική ενέργεια χαμηλής βαθμίδας μέσω ενός κλειστού εναλλάκτη θερμότητας τύπου βρόγχου. Το τροφοδοτικό νερό και η συγκεντρωμένη άλμη περνάνε μέσα από ένα εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό να εξαχθεί το μεγαλύτερο δυνατό ποσό θερμότητας από την καυτή άλμη. Ο εξατμιστής είναι συνδεδεμένος και με έναν συμπυκνωτή που διαχέει τη θερμότητα συμπύκνωσης στο περιβάλλον.

Αν δύο δεξαμενές νερού συνδεθούν μεταξύ τους, η απόσταση του νερού θα γίνεται από την πλευρά όπου εμφανίζεται η υψηλότερη πίεση ατμών προς την άλλη. Η πίεση ατμών του θαλάσσιου νερού είναι περίπου 1.84% μικρότερη από την αντίστοιχη του φρέσκου νερού. Αυτό σημαίνει ότι αν ο ατμοποιητής (αλμυρό νερό) και ο υγροποιητής (φρέσκο νερό) συνδεθούν από πάνω, ενώ η θερμοκρασία είναι η ίδια, η απόσταση θα πραγματοποιηθεί από την πλευρά του φρέσκου νερού προς αυτήν του αλμυρού νερού. Για να επιτύχουμε την απόσταση κατά την αντίστροφη διαδρομή, το αλμυρό νερό θα πρέπει να διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Εδώ αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλιακής ενέργειας. Άλλωστε σε συνθήκες κενού το νερό μπορεί να εξατμιστεί σε μικρότερη θερμοκρασία, άρα θα απαιτείται και μικρότερο ποσό ενέργειας. Αυτή η ενέργεια μπορεί να αποδίδεται από απλούς ηλιακούς συσσωρευτές flat plate, που θα λειτουργεί και με καλύτερο βαθμό απόδοσης λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας.

Η εξάτμιση του αλμυρού νερού αυξάνει την αλατότητα στον ατμοποιητή, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος να μειωθεί ο ρυθμός εξάτμισης. Έτσι είναι απαραίτητο να απορριφθεί η συγκεντρωμένη άλμη με συγκεκριμένο ρυθμό και παράλληλα να ψεκάζεται αλμυρό νερό με ρυθμό αντίστοιχο με το άθροισμα των ρυθμών απόρριψης άλμης και εξάτμισης.

Η αποβαλλόμενη άλμη θα βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, έτσι είναι σημαντικό να ανακτηθεί θερμότητα από αυτή. Ένας εναλλακτικής θερμότητας με σωλήνες θα χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό, έτσι που το τροφοδοτικό νερό θα ρέει στον εσωτερικό σωλήνα και η αποβαλλόμενη άλμη σε δέσμη σωληνών με μορφή δακτυλίου γύρω από τον εσωτερικό με αντίθετη κατεύθυνση. Τέλος, επειδή επικρατούν συνθήκες κενού στην επιφάνεια του αλμυρού νερού στον εξατμιστή, το τροφοδοτικό νερό μπορεί να ψεκαστεί με ατμοσφαιρική πίεση, κάνοντας περιττή την όποια χρήση αντλιών και άρα εξοικονομώντας την αντίστοιχη ενέργεια.

Για να προσομοιωθεί η απόδοση του συστήματος, απαιτούνται οι ισολογισμοί μάζας ενέργειας και αλατού. Κατά την εφαρμογή αυτών των ισολογισμών υποτίθεται ότι καμιά στρωματοποίηση της θερμοκρασίας δεν λαμβάνει χώρα στο σύστημα. Οι ισολογισμοί της διατήρησης της μάζας, της διατήρησης της διαλυόμενης ουσίας και της διατήρησης της ενέργειας μας οδηγούν στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{- Διατήρηση της μάζας: } \rho_i \dot{V}_i = \rho_w \dot{V}_w + \rho_g \dot{V}_g \quad (9.1)$$

- Διατήρηση της συγκέντρωσης της διαλυόμενης ουσίας:

$$\frac{d}{dt}(\rho C V)_s = (\rho C)_F V_f - (\rho C)_s \dot{V}_w \quad (9.2)$$

- Διατήρηση της ενέργειας:

$$\frac{d}{dt}(\rho C_p V T)_s + \frac{d}{dt}(\rho C_p V T)_{evaporator} = Q_{input} + (\rho C_p T)_i \dot{V}_i - (\rho C_p T)_s \dot{V}_w - Q_e - Q_{loss} \quad (9.3)$$

Η είσοδος θερμότητας στο σύστημα, θεωρείται ότι πραγματοποιείται μέσω του θερμού νερού το οποίο με τη σειρά του θερμαίνεται μέσω ενός ηλιακού συλλέκτη. Η θερμότητα της εξάτμισης θα απορριφθεί κυρίως στο περιβάλλον μέσω του υγροποιητή κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης του ατμού και η υπόλοιπη θα απομακρυνθεί μέσω του παραγόμενου φρέσκου νερού. Έτσι ο υγροποιητής θα αποβάλλει το ποσό ενέργειας που δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c = m \dot{h}_{fg}^* \quad (9.4), \text{ όπου } h_{fg}^* \text{ δίνεται από τη σχέση:}$$

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68 C_{pf} (T_s - T_{ci}) \quad (9.5)$$

Αυτό το ποσό θερμότητας άγεται μέσω του τείχους υγροποίησης και τελικά μεταφέρεται στο περιβάλλον λόγω συναγωγής (αγνοούμε τη μεταφορά λόγω ακτινοβολίας). Για την αγωγή θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων έχουμε:

$$m \dot{h}_{fg}^* = \frac{2\pi l_c k_c (T_{ci} - T_{co})}{\ln(r_{co} / r_{ci})} \quad (9.6)$$

Όσον αφορά τη συναγωγή προς το περιβάλλον, ο συμπυκνωτής θεωρείται ως ένας οριζόντιος αγωγός με πτερύγια. Ο ρυθμός μεταφοράς με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί ως :

$$Q_c = (h_{co,tip} NA_{f,tip} \eta_f + h_{co} NA_{f,sides} \eta_f + h_{co} A_b)(T_{co} - T_{ci}) \quad (9.7)$$

Η πίεση λειτουργίας στην προτεινόμενη μονάδα μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα της πίεσης στην περιοχή του ατμού, στο σημείο συμπύκνωσης και την πτώση πίεσης που λαμβάνει χώρα στη στήλη. Αυτή η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί, εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας πίεσης και ενέργειας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της στήλης.

$$(\rho AV)_{in} = (\rho AV)_{out} \quad (9.8)$$

$$\frac{P_{out}}{\gamma} + \frac{v_{out}^2}{2g} + z_{out} = \frac{P_{in}}{\gamma} + \frac{v_{in}^2}{2g} + z_{in} - h_L \quad (9.9)$$

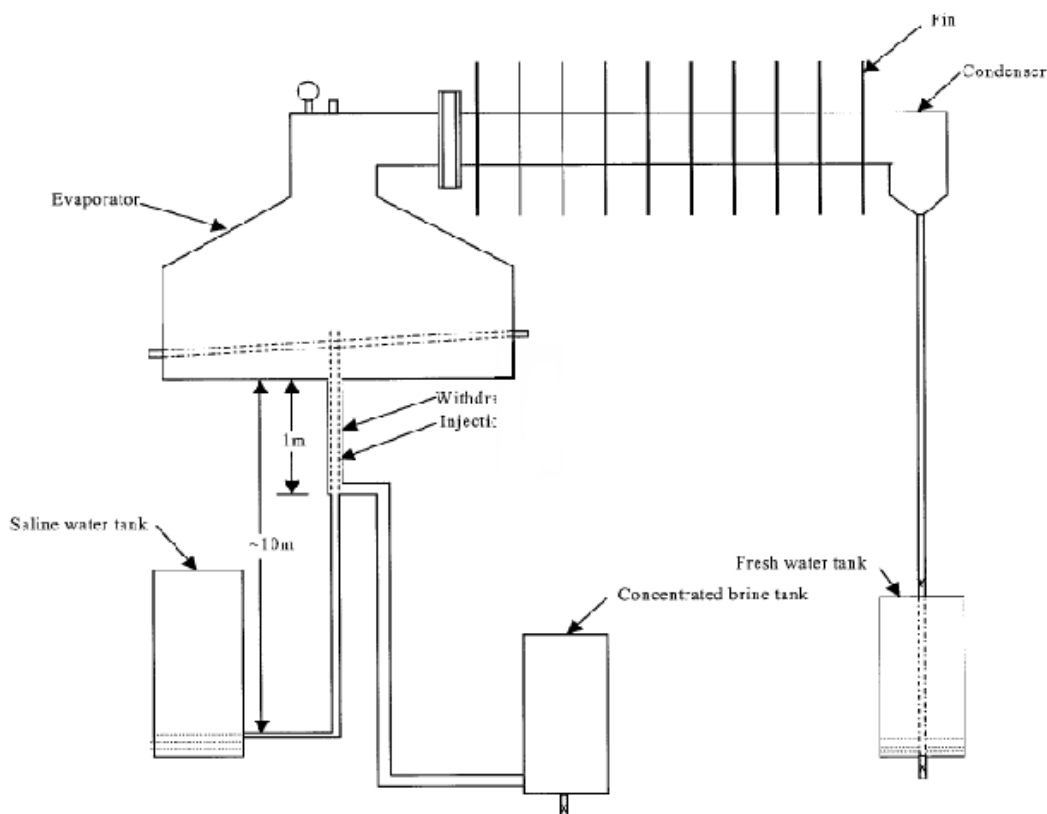
Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε δίνεται από την σχέση:

$$\eta = 0.72 - 3.4 \frac{\Delta T}{G_T} \quad (9.10)$$



## 9.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

.Στο **σχήμα 9.2** που ακολουθεί βλέπουμε τη εγκατάσταση αφαλάτωσης χαμηλής βαθμίδας σε μεγέθυνση.



**Σχήμα 9.2. Σύστημα αφαλάτωσης χαμηλής βαθμίδας**

Η σχεδίαση αυτού του συστήματος βασίζεται στην δημιουργία κενού αέρος με φυσικό τρόπο.Επιδιώκουμε δημιουργία κενού, γιατί το νερό μπορεί να εξατμιστεί σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες και με πολύ λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές.Έτσι επιτρέπει η χρήση πηγών θερμότητας χαμηλής βαθμίδας, όπως ηλιακοί συλλέκτες και απορριπτόμενη θερμότητα.Η σπουδαιότητα αυτής της ιδέας,στηρίζεται στο γεγονός ότι οι φυσικές δυνάμεις (βαρύτητα, ατμοσφαιρική πίεση) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνθηκών κενού και στην ενσωμάτωση σε ένα σχέδιο μονού συστήματος, όπου η εξάτμιση και η συμπύκνωση πραγματοποιούνται σε κατάλληλες θέσεις χωρίς καμία είσοδο άλλης εξωτερικής ενέργειας, άλλης από τη θερμότητα χαμηλής βαθμίδας.Αυτό βοηθάει και στη μείωση της θερμικής ενέργειας που εισέρχεται στη διαδικασία μια και στις συμβατικές διεργασίες για τη μείωση της πίεσης απαιτούνται αντλίες κενού, εκτοξευτές ατμού κ.λ.π.

Το σύστημα αποτελείται από ένα έναν ηλιακό συλλέκτη κλειστού κυκλώματος, έναν θάλαμο ατμοποίησης, όπου υπάρχει πρόβλεψη να τροφοδοτείται το κρύο υγρό απευθείας στον θάλαμο και να παρέχεται ηλιακή ή άλλη ενέργεια χαμηλής βαθμίδας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας κλειστού βρόγχου.Επιπλέον πάρχει πρόβλεψη για την αποβολή συγκέντρωσης άλμης.Ο θάλαμος εξάτμισης

είναι συνδεδεμένος με έναν υγροποιητή, ο οποίος και διαχέει την θερμότητα της συμπύκνωσης στο περιβάλλον. Ο υγροποιητής είναι συνδεδεμένος με έναν σωλήνα αποβολής, ύψους περίπου 10m. Το εισερχόμενο κρύο υγρό και η αποβαλλόμενη άλμη, περνάνε μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα, με σκοπό να αξιοποιηθεί το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας από την καυτή άλμη.

Για να εκκινήσουμε την εγκατάσταση, αρχικά τη γεμίζουμε πλήρως με νερό. Το νερό τότε αφήνεται να πέσει υπό την επίδραση της βαρύτητας, δημιουργώντας κενό πάνω από το επίπεδο της στάθμης του. Εξαρτώμενο από τη βαρομετρική πίεση, το νερό θα πέσει σε ένα επίπεδο περίπου 10m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, αφήνοντας πίσω του κενό. Το κενό δημιουργείται εξισώνοντας την ατμοσφαιρική και την υδροστατική πίεση στους σωλήνες παροχής και αποβολής, χωρίς την χρήση εξωτερικής μηχανικής ενέργειας.

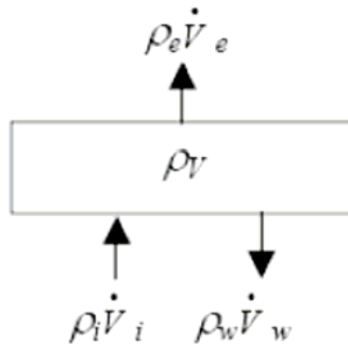
Η πίεση ατμών του θαλασσινού νερού είναι κατά 1.84% μικρότερη σε σχέση με αυτή του φρέσκου νερού στο θερμοκρασιακό εύρος 0-100°C. Αυτό σημαίνει ότι αν οι κορυφές των δύο θαλάμων του ατμοποιητή (θαλασσινό νερό) και του υγροποιητή (φρέσκο νερό) συνδεθούν ενώ βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, το νερό θα αποσταχθεί από τη μεριά του φρέσκου προς αυτή του θαλασσινού. Αν θέλουμε να επιτύχουμε την αντίστροφη διαδικασία, η πίεση ατμών του θαλασσινού νερού πρέπει να βρίσκεται υψηλότερα σε σχέση με την αντίστοιχη του φρέσκου νερού. Στο εν λόγω σύστημα αυτό επιτυγχάνεται, θερμαίνοντας το θαλασσινό νερό με χρήση ηλιακής ενέργειας. Άρα η εξάτμιση από την πλευρά του θαλασσινού νερού προς αυτή του φρέσκου νερού γίνεται λόγω της διαφοράς πίεσης ατμών στα δύο μέρη. Όπως προναφέρθηκε, το κενό επιτρέπει την απόσταξη του νερού σε χαμηλό θερμοκρασιακό επίπεδο, απαιτώντας έτσι λιγότερη θερμική ενέργεια. Αυτή θα δοθεί από τους ηλιακούς συλλέκτες, που θα λειτουργούν και με υψηλότερη απόδοση, ακριβώς επειδή έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες στον συλλέκτη. Έτσι ελαττώνουμε τις απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον. Απλοί flat plate συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση του θαλασσινού νερού στον ατμοποιητή. Έτσι η μονάδα είναι κατάλληλη για περιοχές με πρόσβαση σε θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Καθώς το αλμυρό νερό στον ατμοποιητή αρχίζει να ατμοποιείται η αλατότητα αυξάνει. Σαν αποτέλεσμα η μοριακή δραστηριότητα του νερού ελαττώνεται επειδή τα διαλυμένα άλατα εμπλέκονται στην κίνηση των μορίων του νερού. Εξάλλου ο μέσος αριθμός μορίων στην επιφάνεια ελαττώνεται και αυτό τείνει να μειώσει και τον ρυθμό ατμοποίησης. Ο ρυθμός ελαττώνεται κατά 1% περίπου για κάθε ποσοστιαία αύξηση της αλατότητας. Επιπλέον η αύξηση της αλατότητας οδηγεί το σύστημα σε κατάσταση υπερκορεσμού. Έτσι είναι απαραίτητο να αποβάλλουμε τη συγκεντρωμένη άλμη με ένα σταθερό ρυθμό ροής, έτσι ώστε να εξισορροπείται η μείωση του ρυθμού ατμοποίησης και η απώλεια θερμότητας της καυτής άλμης καθώς και να αποφεύγονται καταστάσεις υπερκορεσμού του συστήματος. Ακόμη θα πρέπει το αλμυρό νερό να εκτοξεύεται με έναν ρυθμό αντίστοιχο με το άθροισμα των ρυθμών αποβολής και ατμοποίησης.

Το αποβαλλόμενο νερό θα έχει θερμοκρασία αντίστοιχη με αυτή του ατμοποιητή, οπότε είναι απαραίτητο να λάβουμε το μέγιστο δυνατό ποσό θερμότητας απ' αυτό. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε και έναν εναλλάκτη διπλού σωλήνα, όπου το νερό που ψεκάζεται στον ατμοποιητή ρέει στον εσωτερικό σωλήνα και το αποβαλλόμενο στον εξωτερικό με κατεύθυνση αντίθετη του πρώτου.

Λόγω της ύπαρξης κενού στην επιφάνεια του αλμυρού νερού στον ατμοποιητή, ο ψεκασμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό ατμοσφαιρική πίεση και έτσι δεν είναι απαραίτητη η κατανάλωση ενέργειας για λειτουργία αντλιών.

### 9.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αυτό το τμήμα θα παρουσιαστούν οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία κάθε επιμέρους συστήματος της εγκατάστασης. Μάζα, συγκέντρωση άλατος και ενεργειακή ισορροπία. Μια πλήρης μαθηματική ανάλυση της εγκατάστασης απαιτεί εξισώσεις μάζας, ενέργειας και συγκέντρωσης άλατος. Υποθέσαμε ότι η θερμοχωρητικότητα του υλικού του ατμοποιητή είναι αμελητέα. Αναφερόμενοι στην **εικόνα 1** έχουμε:



**Εικόνα 1.** Διατήρηση μάζας στον αμμοποιητή

Η διατήρηση της μάζας δίνει :

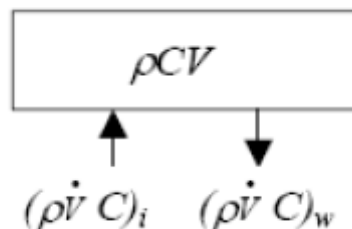
$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \rho_i \dot{V}_i - \rho_w \dot{V}_w - \rho_e \dot{V}_e \dots\dots\dots(1)$$

Με αρχική συνθήκη :

$$(\rho V) (0) = \rho_0 V \left| \dots\dots\dots(2) \right.$$

Οι δείκτες i,w,e αναφέρονται στην είσοδο του αλμυρού νερού, στην αποβολή της συγκεντρωμένης άλμης και στην μάζα που αμμοποιείται αντίστοιχα. Ο δείκτης ο αναφέρεται στην κατάσταση αναφοράς του αλμυρού νερού στους 25°C. Αν θεωρήσουμε ότι ο ατμός που παράγεται θα συμπυκνωθεί πλήρως στον υγροποιητή, τότε η ποσότητα του φρέσκου νερού που παράγεται, θα είναι ίση με την ποσότητα που αμμοποιείται :

$$\rho_f \dot{V}_f = \rho_e \dot{V}_e \left| \dots\dots\dots(3) \right.$$



**Εικόνα 2 .** Ισορροπία άλατος στο νερό του αμμοποιητή.

Η εφαρμογή της διατήρησης του άλατος (Εικόνα 2), δίνει :

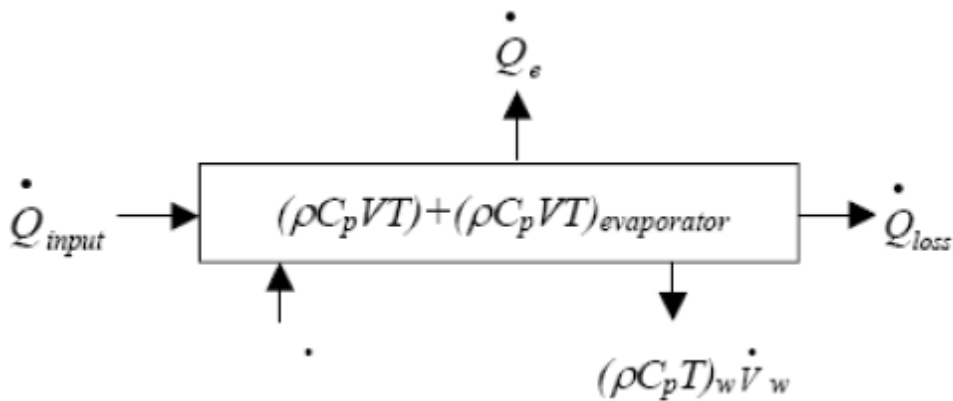
$$\frac{d}{dt}(\rho C V) = (\rho C)_i \dot{V}_i - (\rho C)_s \dot{V}_w \quad \dots\dots\dots(4)$$

Με αρχική συνθήκη :

$$(\rho C V) (0) = \rho_0 C_0 V \quad \dots\dots\dots(5)$$

Όπου C είναι η συγκέντρωση σε αλάτι.

Στην επιφάνεια του νερού, οι θερμοκρασίες του υγρού και του ατμού θεωρούνται ίσες, οπότε τα φαινόμενα ακτινοβολίας θεωρούνται αμελητέα. Από τη στιγμή που ο θάλαμος θεωρείται και κενός, τα φαινόμενα συναγωγής θεωρούνται επίσης αμελητέα. Εφαρμογή της εξίσωσης της ενέργειας δίνει η **Εικόνα 3**.



**Εικόνα 3.** Ενεργειακή ισορροπία στο νερό στον ατμοποιητή.

$$\frac{d}{dt}(\rho C_p V T) + \frac{d}{dt}(\rho C_p V T)_{evaporator} = \dot{Q}_{input} + (\rho C_p T)_i \dot{V}_i - (\rho C_p T)_w \dot{V}_w - \dot{Q}_e - \dot{Q}_{loss} \quad \dots\dots(6)$$

Με αρχική συνθήκη :

$$(\rho C_p VT) (0) = \rho_0 C_{p,0} VT_0, \text{ and}$$

$$(\rho C_p VT)_{\text{evaporator}} (0) = (\rho C_p V)_{\text{evaporator}} T_0 \dots \dots \dots (7)$$

- **Μεταφορά μάζας (mass transfer)**

Οι μέθοδοι της απόσταξης σε κενό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον τρόπο που σχηματίζεται ο ατμός σε τρεις κατηγορίες :

1. Απόσταξη με ατμοποίηση (evaporative distillation), που πραγματοποιείται όταν η πίεση κορεσμού του ατμού είναι μικρότερη απ' αυτήν του περιβάλλοντος αερίου.
2. Απόσταξη με έκρηξη (ebullition), που πραγματοποιείται όταν η πίεση κορεσμού του ατμού είναι μεγαλύτερη απ' αυτήν του περιβάλλοντος αερίου.
3. Μοριακή απόσταξη (molecular distillation), που είναι η διαδικασία της ατμοποίησης σ' ένα χώρο κενό.
4. Η μεταφορά μάζας στην προτεινόμενη μονάδα είναι παρόμοια με την μοριακή απόσταξη. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής κατά την μοριακή απόσταξη δίνεται από τη σχέση Langmuir-Knudsen που πραγματοποιείται όταν η πίεση κορεσμού του ατμού είναι μικρότερη απ' αυτήν του περιβάλλοντος αερίου.

$$\dot{m} = \frac{P_s A}{\sqrt{2\pi MRT_s}} \dots \dots \dots (8)$$

όπου A, P, R, M, T είναι η επιφάνεια του ατμοποιητή, η πίεση ατμών, η σταθερά αερίων, το μοριακό βάρος και η θερμοκρασία του υγρού μέσα στον ατμοποιητή.

Η σχέση σε αυτή τη μορφή ισχύει αν πληρούνται κάποιες προδιαγραφές, όπως :

- Μεγάλο εύρος των τμημάτων που βρίσκονται σε κενό αέρος ώστε να αποφεύγονται διαφορές πίεσης
- Το υγρό να είναι κατανεμημένο στη μορφή ενός πολύ λεπτού στρώματος
- Η θερμοκρασία της συμπύκνωσης να είναι κατά 50-100°C κάτω απ' τη θερμοκρασία ατμοποίησης
- Η προς απόσταξη ουσία να υφίσταται απαέρωση.

Όπως είναι προφανές, η εγκατάστασή μας δεν ικανοποιεί πλήρως τις παραπάνω προϋποθέσεις, οπότε η σχέση (8) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακριβώς σε αυτή τη μορφή. Έτσι ο καθαρός ρυθμός μεταφοράς μάζας είναι το άθροισμα των ρυθμών της ατμοποίησης και της υγροποίησης, οι οποίοι μπορούν να υπολογισθούν βάσει της ανάλυσης του Schrage ως εξής :

**Ρυθμός ατμοποίησης :**

$$\dot{m}_+ = \rho \sqrt{\frac{RT_s}{2\pi}} = p_s \sqrt{\frac{1}{2\pi RT_s}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

όπου  $m_+$  είναι ο ρυθμός ατμοποίησης ανά μονάδα επιφάνειας.

**Ρυθμός υγροποίησης :**

$$\dot{m}_- = - \left( \frac{\rho_{gi}}{\rho_{gs}} \right) \left( \frac{T_{gi}}{T_s} \right)^{1/2} \Gamma \dot{m}_+ \quad \dots\dots\dots(10)$$

Όπου  $\Gamma$  ένας διορθωτικός παράγοντας, που δίνεται από τη σχέση :

$$\Gamma = \exp(-\beta_{gi}^2 U_{gi}^2) - \beta_{gi} U_{gi} \pi^{1/2} (1 - \Phi \beta_{gi} U_{gi}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$\Phi$  είναι ένας συντελεστής πιθανότητας, ενώ ο δείκτης  $g$  αναφέρεται στο αέριο και ο  $i$  στη διεπαφή.

Άρα, συνολικά θα έχουμε :

$$\dot{m} = \sigma \left[ \dot{m}_+ - \left( \frac{\rho_{gi}}{\rho_{gs}} \right) \left( \frac{T_{gi}}{T_s} \right)^{1/2} \Gamma \dot{m}_+ \right]$$

$$\dot{m} = \frac{\sigma}{(2\pi R)^{1/2}} \left( \frac{p_s}{T_s^{1/2}} - \Gamma \frac{p_{gi}}{T_{gi}^{1/2}} \right) \quad \dots\dots\dots(12)$$

όπου  $\sigma$  είναι ένας συντελεστής για την ατμοποίηση ή την συμπύκνωση.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση ο Bernorad υπολόγισε τον ρυθμό ατμοποίησης από το θάλαμο του θαλασσινού νερού προς τον θάλαμο του φρέσκου νερού ως :

$$\dot{V}_e = \frac{\alpha_m}{\rho_f} \left[ f(C) \frac{p(T_s)}{(T_s + 273)^{0.5}} - \frac{p(T_f)}{(T_f + 273)^{0.5}} \right] \dots\dots\dots(13)$$

όπου :

$$f(C) = 1 - \alpha_1 C \dots\dots\dots(14)$$

διορθωτικός παράγοντας,  $\alpha_m$ , εμπειρικοί συντελεστές,  $\rho_f$  η πικνότητα του φρέσκου νερού και  $T_s$ ,  $T_f$  η θερμοκρασία του θαλάσσιου και του φρέσκου νερού αντίστοιχα σε °C.

Σε περίπτωση που δεν θεωρήσουμε αμελητέα την πτώση πίεσης μεταξύ ατμοποιητή και υγροποιητή, τότε η (13) γράφεται:

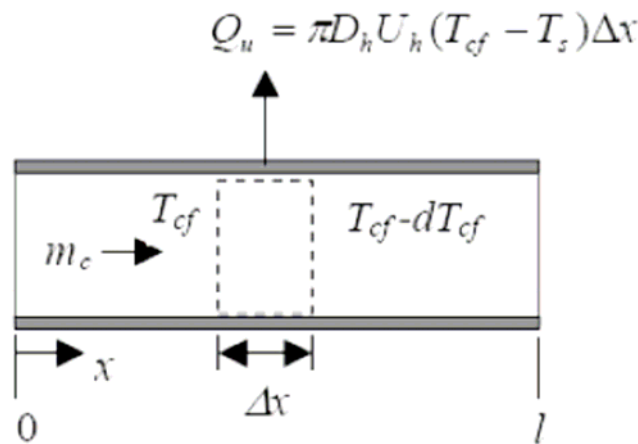
$$\dot{V}_e = \frac{\alpha_m}{\rho_f} \left[ f(C) \frac{p(T_s)}{(T_s + 273)^{0.5}} - \frac{p(T_f) + \Delta p}{(T_f + 273)^{0.5}} \right] \dots\dots\dots(15)$$

Η ενέργεια της ατμοποίησης δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{Q}_e = \rho_f h_{fg}(T_s) \dot{V}_e \dots\dots\dots(16)$$

- Ο ατμοποιητής ως εναλλάκτης θερμότητας

Η ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα από την πηγή θερμότητας, θεωρείται ότι είναι στη μορφή θερμού νερού, μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον ατμοποιητή, είναι μια συνάρτηση της διαθέσιμης διαφοράς θερμοκρασίας. Είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία του υγρού σε όλες τις θέσεις της θερμαινόμενης επιφάνειας, αλλά μία μέση τιμή μπορεί να υπολογισθεί όπως φαίνεται παρακάτω :



**Εικόνα 4.** Όγκος ελέγχου για τη ροή διαμέσου του ατμοποιητή

Για ένα στοιχειώδες στοιχείο μήκους  $\Delta X$ , η εξίσωση της ενέργειας δίνει :

$$\dot{m}_c C_{p,cf} \frac{dT_{cf}(x)}{dx} \Delta x = -\pi D_h U_h (T_{cf} - T_s) \Delta x \dots\dots\dots(17)$$

όπου  $D_h$  και  $U_h$  είναι η διάμετρος και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη ατμοποίησης, ενώ ο δείκτης  $cf$  αναφέρεται στο υγρό που ρέει από τον συλλέκτη προς τον ατμοποιητή.

Με οριακή συνθήκη :

$$T_{cf}(x) = T_{co} \text{ at } x=0 \dots\dots\dots(18)$$

όπου ο δείκτης  $co$  αφορά το υγρό στην έξοδο του συλλέκτη.

Με επίλυση της (17) προκύπτει :

$$T_{cf}(x) = T_s + (T_{co} - T_s) \exp \left[ \frac{-\pi D_h U_h x}{\dot{m}_c C_{p,cf}} \right] \dots\dots\dots(19)$$



Η καθαρή ποσότητα της θερμότητας που παρέχεται στο νερό είναι :

$$\dot{Q}_u = \pi D_h U_h l_h (\bar{T}_{cf} - T_s) \dots\dots\dots(20)$$

όπου  $l_h$  είναι το μήκος του ατμοποιητή και  $T_{cf}$  είναι η θερμοκρασία του υγρού που δίνεται μέσω της σχέσης :

$$\bar{T}_{cf} = \frac{1}{l_h} \int_0^{l_h} T_{cf}(x) dx \dots\dots\dots(21)$$

Συνδυάζοντας τις (19) και (21) και αντικαθιστώντας στην (20), βρίσκουμε :

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_{p,cf} (T_{co} - T_s) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\pi D_h U_h l_h}{\dot{m}_c C_{p,cf}}\right) \right] \dots\dots\dots(22)$$

Από την εξίσωση (19), η θερμοκρασία του υγρού στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας, γράφεται ως :

$$T_{cf, outlet} = T_s + (T_{co} - T_s) \exp\left[\frac{-\pi D_h U_h l_h}{\dot{m}_c C_{p,cf}}\right] \dots\dots\dots(23)$$

Θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες θερμότητας στους σωλήνες, η θερμοκρασία του υγρού που εισέρχεται στον συλλέκτη  $T_{ci}$ , δίνεται από την ισότητα :

$$T_{ci} = T_{cf, outlet} \dots\dots\dots(24)$$

όπου  $T_{c, outlet}$  είναι η θερμοκρασία του υγρού του συλλέκτη στην έξοδο του ατμοποιητή.

Ο συντελεστής θερμότητας  $U_h$  δίνεται από τη σχέση :

$$U_h = \frac{1}{\frac{1}{h_f} + FT} \dots\dots\dots(25)$$

Με το FT να παίρνει τιμές από 0.0005 για καθαρούς σωλήνες, ως 0.001 [W/m<sup>20</sup>C].

Το h<sub>f</sub> υπολογίζεται ως εξής :

Αν η ροή είναι στρωτή, δηλαδή :

$$Re_D = \frac{4\rho_0 \dot{V}_h}{\pi D_h \mu} \leq 2300 \dots\dots\dots(26)$$

Τότε :

$$Nu_D = 3.66 \dots\dots\dots(27)$$

Αν η ροή είναι τυρβώδης, δηλαδή :

$$Re_D > 2300 \dots\dots\dots(28)$$

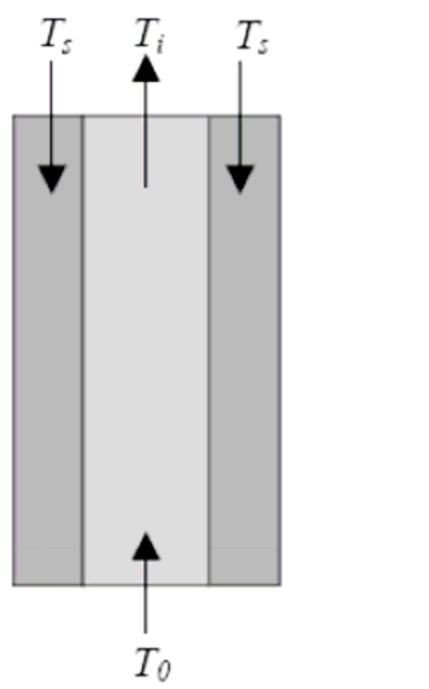
Τότε :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} \dots\dots\dots(29)$$

- Ο εναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνα :

Ο σωλήνας ψεκασμού που μεταφέρει το θαλασσινό νερό στον ατμοποιητή, είναι ομοαξονικός και εσωτερικός στον σωλήνα αποβολής της άλμης, οπότε ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας του νερού που αποβάλλεται μπορεί να ανακτηθεί. Η θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στον ατμοποιητή μπορεί να υπολογισθεί ως :

$$T_i = \frac{\dot{Q}_h}{\rho_0 \dot{V}_i C_{p0}} + T_0 \dots\dots\dots(30)$$



**Εικόνα 5.** Σχηματικό διάγραμμα του εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα.

Ο  $\dot{Q}_h$  είναι ο πραγματικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, που δίνεται μέσω της σχέσης :

$$\dot{Q}_h = \varepsilon \dot{Q}_{\max} \dots\dots\dots(31)$$

όπου  $\dot{Q}_{\max}$  είναι ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, που δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min} (T_s - T_0) \dots\dots\dots(32)$$

και  $\varepsilon$  είναι συντελεστής που προκύπτει από τη σχέση :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \dots\dots\dots(33)$$

Στην σχέση (33) το NTU δίνεται από τη σχέση :

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \dots\dots\dots(34)$$

και

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \dots\dots\dots(35)$$

όπου  $C_{\min}$  και  $C_{\max}$  το ελάχιστο και το μέγιστο αντίστοιχα των  $C_c$  και  $C_h$  που δίνονται από τις σχέσεις :

$$C_c = \rho_0 \dot{V}_i C_{p0} \dots\dots\dots(36)$$

$$C_h = \rho_s \dot{V}_w C_{ps} \dots\dots\dots(37)$$

Η παραγωγή UA δίνεται ως :

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{2\pi r_i l h_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k l} + \frac{1}{2\pi r_o l h_o}} \dots\dots\dots(38)$$

Ο συντελεστής  $h_i$  υπολογίζεται από τις σχέσεις (26)-(29). Ο συντελεστής  $h_o$  αν η ροή είναι στρωτή , υπολογίζεται ως :

$$Re_D = \frac{\rho(D_o - D_i)}{\mu} \frac{\rho_s \dot{V}_w}{0.25 \rho \pi (D_o^2 - D_i^2)} \leq 2300 \dots\dots\dots(39)$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα :

**Πίνακας 1, Υπολογισμός αριθμού Nusselt**

| $L_p/D_p$ | $Nu_i$ |
|-----------|--------|
| 0         | -      |
| 0.05      | 17.46  |
| 0.1       | 11.56  |
| 0.25      | 7.51   |
| 0.5       | 5.74   |
| 1         | 4.86   |

Αν η ροή είναι τυρβώδης, χρησιμοποιούμε τη σχέση (29).

- **Ανάλυση του υγροποιητή :**

Η ατμοποίηση του νερού από θαλασσινό νερό έχει την τάση να το ψύχει, ενώ η συμπύκνωση του ατμού έχει την τάση να θερμαίνει το φρέσκο νερό. Άρα για να είναι συνεχής η διαδικασία της απόσταξης, θα πρέπει να παρέχεται συνεχώς θερμότητα στον ατμοποιητή και να απορρίπτεται από τον υγροποιητή.

Έτσι ο υγροποιητής θα πρέπει να μπορεί να διαχέει στο περιβάλλον θερμότητα που δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_{fg} + 0.68C_p(T_s - T_{if})) \dots\dots\dots(40)$$

Στην παρακάτω σχέση  $h_{fg}$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης.

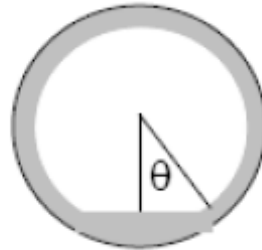
Αυτό το ποσό θερμότητας μεταφέρεται μέσω του στρώματος του συμπυκνώματος, άγεται μέσω του τοιχώματος του υγροποιητή και τελικά απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω συναγωγής, θεωρώντας την ακτινοβολία αμελητέα.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της συμπύκνωσης, αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή για ελεύθερη συναγωγή από την εξωτερική επιφάνεια του υγροποιητή.

Για ροή με  $Re < 30000$ , ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του στρώματος του συμπυκνώματος, θα δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{h}_c = 0.725 \left[ 1 - \frac{\theta}{\pi} \right] \left[ \frac{h_{fg}^* g k_c^3 (\rho_l - \rho_v)}{\gamma_l D (T_s - T_{if})} \right]^{1/4} \dots\dots\dots(41)$$

Με τη γωνία θ να φαίνεται στην **Εικόνα 6** :



**Εικόνα 6.** Η γωνία θ.

Τα μεγέθη του στρώματος του συμπυκνώματος που παρουσιάζονται, εξετάζονται για μια θερμοκρασία ενδιάμεση μεταξύ της ενδιάμεσης επιφάνειας  $T_i$  και της εσωτερικής επιφάνειας του υγροποιητή  $T_{ci}$ , έτσι που το θερμοκρασιακό άλμα υπολογίζεται ως :

$$T_{film} = T_{ci} + 0.25(T_i - T_{ci}) \dots\dots\dots(42)$$

Όπου  $T_i$  όπως προαναφέραμε είναι η θερμοκρασία της ενδιάμεσης επιφάνειας ατμοποιητή-υγροποιητή που υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλη η θερμότητα που προσφέρεται απ' τον ατμό στην ενδιάμεση επιφάνεια  $Q_{s-i}$  άγεται μέσω του υγρού στρώματος στην επιφάνεια του συμπυκνωτή,  $Q_{c-i}$ .

Έτσι :

$$\dot{Q}_{s-i} = \dot{Q}_{i-ci} \dots\dots\dots(43)$$

ή

$$\dot{Q}_c = \bar{h}_c A_i (T_i - T_{ci}) \dots\dots\dots(44)$$

Όπου  $A_i$  είναι η επιφάνεια του υγρού στρώματος στην ενδιάμεση επιφάνεια.

Για την αγωγή θερμότητας μέσω του τοιχώματος του υγροποιητή :

$$\dot{Q}_c = \frac{2\pi l_c k_c (T_{ci} - T_{co})}{\ln(r_{co} / r_{ci})} = \frac{T_i - T_{co}}{\frac{1}{2\pi r_{ci} l_c \bar{h}_c} + \frac{\ln(r_{co} / r_{ci})}{2\pi l_c k_c}} \dots\dots\dots(45)$$

Όπου:  $T_{co}, r_{ci}, r_{co}, l_c, k_c$  είναι η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του υγροποιητή, η εσωτερική και εξωτερική καμπυλότητα, το μήκος και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα.

Ο υγροποιητής θεωρείται ότι είναι ένας οριζόντιος αγωγός με κυκλικά πτερύγια. Η μέση μεταφορά θερμότητας από τα άκρα των πτερυγίων είναι :

$$Nu_s = cRa_s^b \dots\dots\dots(46)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει όταν :

$$2 \leq Ra_s \leq 10^4 \dots\dots\dots(47)$$

και :

$$1.36 < 1/\xi < 3.73 \dots\dots\dots(48)$$

όπου :

$$\xi = \frac{D_{co}}{D_{fin}} \dots\dots\dots(49)$$

$$Ra_s = \frac{g\beta(T_{co} - T_a)S^3}{\alpha\gamma} \frac{S}{D_{fin}} \dots\dots\dots(50)$$

$$b = 0.29$$

$$c = 0.44 + 0.12/\xi \dots\dots\dots(51)$$

Και S η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων.

Αντίστοιχα η μεταφορά θερμότητας από τον κύλινδρο και τις επιφάνειες των πτερυγίων είναι :

$$Nu_s = \frac{Ra_s}{12\pi} \left\{ 2 - \exp \left[ - \left( \frac{cl}{Ra_s} \right)^{3/4} \right] - \exp \left[ - \beta \left( \frac{cl}{Ra_s} \right)^{3/4} \right] \right\} \dots\dots\dots(52)$$

Όπου :

$$\left. \begin{aligned} 1.67 < 1/\xi < \infty \\ \beta &= 0.17\xi + \exp(-4.8\xi) \\ cl &= \left[ \frac{23.7 - 1.1(1 + 152\xi^2)^{1/2}}{1 + \beta} \right]^{4/3} \end{aligned} \right|$$

Συνολικά η θερμότητα που μεταφέρεται από τον συμπυκνωτή δίνεται από τη σχέση :

$$Q_c = [h_{co,nip} NA_{f,nip} \eta_f + h_{co} NA_{f,sides} \eta_f + h_{co} A_b] (T_{co} - T_a) \dots\dots\dots(53)$$

Όπου N ο αριθμός των πτερυγίων και :

$$\eta_f = C \frac{K_1(mr_{co})I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_{co})K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_{co})K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_{co})I_1(mr_{2c})} \dots\dots\dots(54)$$

Με :

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{2r_{co} / m}{r_{2c}^2 - r_{co}^2} \\ r_{2c} &= r_{fm} + t / 2 \\ m &= \left( \frac{2h_{co}}{k_c t_{fm}} \right)^{1/2} \end{aligned} \right|$$



Και  $I_0, I_1, K_0, K_1$  συναρτήσεις Bessel πρώτης και δεύτερης τάξης.

- Πηγή θερμότητας

Για την εκκίνηση αλλά και την διατήρηση της λειτουργίας της εγκατάστασης, απαιτείται η συνεχής παροχή θερμότητας, η οποία καλύπτει τις ανάγκες προθέρμανσης του τροφοδοτικού νερού, ατμοποίησης του νερού και κάλυψης των απωλειών προς το περιβάλλον. Αυτή η θερμότητα μπορεί να αποδοθεί από ηλιακούς συλλέκτες flat plate. Η ωφέλιμη ενέργεια που συλλέγεται από τον συλλέκτη δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_c C_{p,cf} (T_{co} - T_{ci}) \dots\dots\dots(56)$$

η οποία γράφεται και :

$$\dot{Q}_u = F_R A_c [I_c(\tau\alpha) - U_L(T_{ci} - T_a)] \dots\dots\dots(57)$$

Από τις εξισώσεις (56) και (57) είναι προφανές ότι η θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη, δίνεται από τη σχέση :

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{ZF_R A_c}{\dot{m}_c C_{p,cf}} \dots\dots\dots(58)$$

όπου :

$$Z = I_c(\tau\alpha) - U_L(T_{ci} - T_a) \dots\dots\dots(59)$$

Αν ο ηλιακός συλλέκτης λειτουργεί ως θερμοσίφοντας, η ροή μάζας μπορεί να υπολογισθεί ως :

$$\dot{m}_c = \left[ A_c Z \frac{\pi N_c D_c^4 g \beta_f \rho_f f'}{128 L_1 \gamma C_{p,cf} (1 + r_p)} \left( \frac{L_c}{2} \sin \beta + H_c \right) \right]^{0.5} \dots\dots\dots(60)$$

- **Θερμική απόδοση**

Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ορίζεται ως :

$$\eta_t = \frac{\dot{m}_f \cdot h_{fg}}{\dot{Q}_u} \quad \dots\dots\dots(61)$$

όπου ο παρονομαστής αντιστοιχεί στην αποδιδόμενη θερμότητα και ο αριθμητής στο ποσοστό αυτής που χρησιμοποιείται για ατμοποίηση του αλμυρού νερού και απόδοση φρέσκου.

Ο ημερήσιος βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta_{daily} = \frac{\int \dot{m} h_{fg} dt}{\int \dot{Q}_u dt} \cong \frac{m_{day} h_{fg} (av.)}{\Delta t \Sigma \dot{Q}_u} \quad \dots\dots\dots(62)$$

## 9.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

Τα θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά 35 ελληνικών πόλεων, σύμφωνα με τους καθηγητές του Ε.Μ.Π. κυρίου Αντωνόπουλου και κυρίου Κουρεμένου, δίνονται από τον Πίνακα-4, που στην παρούσα εργασία ονομάζεται **Πίνακας 9-1** και παρατίθεται παρακάτω:

**Πίνακας 9-1: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ**

18

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΟΙ ΣΤΑΘΕΡΕΣ  $A_i$  (ΣΕ °C),  $B_i$  (ΣΕ °C) ΚΑΙ  $F_i$  (ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ) ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ  $T_i(D)=A_i+B_i \sin\left(\frac{360}{365}D-F_i\right)$  ΓΙΑ ΤΙΣ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΟΛΕΙΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ.

| A/A | ΠΟΛΗ           |       | min-min | mean-min | mean    | mean-max | max-max |
|-----|----------------|-------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 1   | ΑΓΡΙΝΙΟ        | $A_i$ | 5.608   | 11.031   | 17.196  | 23.301   | 29.398  |
|     |                | $B_i$ | - 9.036 | - 7.399  | - 8.920 | -10.588  | -10.640 |
|     |                | $F_i$ | -67.264 | -63.225  | -64.484 | -65.130  | -68.915 |
| 2   | ΑΘΗΝΑ          | $A_i$ | 7.023   | 12.527   | 17.521  | 22.503   | 28.675  |
|     |                | $B_i$ | - 9.193 | - 7.993  | - 9.107 | -10.241  | -10.050 |
|     |                | $F_i$ | -64.663 | -61.174  | -63.611 | -65.395  | -68.224 |
| 3   | ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ | $A_i$ |         | 9.482    | 14.404  | 19.331   |         |
|     |                | $B_i$ |         | - 8.182  | - 9.564 | -10.935  |         |
|     |                | $F_i$ |         | -62.428  | -63.751 | -64.752  |         |
| 4   | ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ      | $A_i$ | 9.232   | 14.035   | 18.178  | 22.263   | 27.383  |
|     |                | $B_i$ | - 7.456 | - 6.933  | - 7.544 | - 8.108  | - 8.747 |
|     |                | $F_i$ | -61.750 | -58.224  | -59.009 | -59.726  | -65.517 |
| 5   | ΑΡΤΑ           | $A_i$ | 6.899   | 11.875   | 17.457  | 22.935   | 28.301  |
|     |                | $B_i$ | - 8.644 | - 7.640  | - 8.765 | - 9.823  | - 9.657 |
|     |                | $F_i$ | -67.021 | -63.186  | -64.297 | -65.016  | -68.547 |
| 6   | ΒΟΛΟΣ          | $A_i$ |         | 12.837   | 16.872  | 20.913   |         |
|     |                | $B_i$ |         | - 8.306  | - 8.696 | - 9.081  |         |
|     |                | $F_i$ |         | -64.770  | -64.778 | -64.822  |         |
| 7   | ΖΑΚΥΝΘΟΣ       | $A_i$ | 11.051  | 14.797   | 18.290  | 21.761   | 25.542  |
|     |                | $B_i$ | - 7.385 | - 6.793  | - 7.519 | - 8.262  | - 8.768 |
|     |                | $F_i$ | -56.030 | -55.464  | -58.283 | -60.851  | -62.094 |
| 8   | ΗΡΑΚΛΕΙΟ       | $A_i$ | 10.253  | 14.698   | 18.406  | 22.111   | 29.174  |
|     |                | $B_i$ | - 7.336 | - 6.578  | - 6.746 | - 6.926  | - 6.821 |
|     |                | $F_i$ | -56.429 | -54.719  | -57.732 | -60.546  | -69.303 |
| 9   | ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ    | $A_i$ |         | 10.366   | 15.730  | 21.063   |         |
|     |                | $B_i$ |         | - 8.734  | - 9.892 | -11.116  |         |
|     |                | $F_i$ |         | -65.206  | -67.750 | -69.645  |         |
| 10  | ΘΗΡΑ           | $A_i$ | 10.801  | 14.816   | 17.590  | 20.390   | 25.418  |
|     |                | $B_i$ | - 8.160 | - 6.742  | - 7.163 | - 7.597  | - 7.298 |
|     |                | $F_i$ | -59.018 | -57.048  | -58.907 | -60.882  | -62.632 |
| 11  | ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ      | $A_i$ |         | 15.182   | 19.374  | 23.569   |         |
|     |                | $B_i$ |         | - 7.219  | - 7.600 | - 7.995  |         |
|     |                | $F_i$ |         | -55.159  | -57.733 | -60.025  |         |
| 12  | ΙΩΑΝΝΙΝΑ       | $A_i$ |         | 7.879    | 13.859  | 19.827   |         |
|     |                | $B_i$ |         | - 7.173  | - 8.960 | -10.755  |         |
|     |                | $F_i$ |         | -66.094  | -67.092 | -67.765  |         |

Πίνακας 9-1: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ  
(συνέχεια)

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

19

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. (Συνέχεια)

| A/A | ΠΟΛΗ     |       | min-min | mean-min | mean    | mean-max | max-max |
|-----|----------|-------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 13  | ΚΑΒΑΛΑ   | $A_i$ | 1.042   | 7.824    | 13.401  | 19.071   | 25.210  |
|     |          | $B_i$ | -10.903 | - 8.355  | - 9.558 | -10.802  | - 9.421 |
|     |          | $F_i$ | -72.952 | -67.748  | -66.978 | -66.357  | -67.461 |
| 14  | ΚΑΛΑΜΑΤΑ | $A_i$ | 8.138   | 12.165   | 17.842  | 23.521   | 27.701  |
|     |          | $B_i$ | - 7.314 | - 6.440  | - 7.221 | - 7.995  | - 7.984 |
|     |          | $F_i$ | -62.663 | -58.261  | -57.686 | -57.225  | -60.873 |
| 15  | ΚΑΡΠΑΘΟΣ | $A_i$ | 12.993  | 16.377   | 20.033  | 23.668   | 27.217  |
|     |          | $B_i$ | - 8.172 | - 7.294  | - 7.395 | - 7.555  | - 8.228 |
|     |          | $F_i$ | -60.020 | -57.693  | -58.336 | -58.482  | -62.871 |
| 16  | ΚΕΡΚΥΡΑ  | $A_i$ | 5.712   | 11.568   | 16.722  | 21.872   | 26.534  |
|     |          | $B_i$ | - 8.425 | - 6.796  | - 7.853 | - 8.912  | - 9.470 |
|     |          | $F_i$ | -62.687 | -58.489  | -60.469 | -61.981  | -65.382 |
| 17  | ΚΟΖΑΝΗ   | $A_i$ | 0.190   | 6.922    | 12.345  | 17.845   | 25.595  |
|     |          | $B_i$ | -10.518 | - 8.732  | -10.161 | -11.781  | -10.534 |
|     |          | $F_i$ | -69.340 | -65.634  | -67.482 | -68.784  | -70.689 |
| 18  | ΚΟΡΙΝΘΟΣ | $A_i$ |         | 13.836   | 18.133  | 22.424   |         |
|     |          | $B_i$ |         | - 7.914  | - 8.540 | - 9.176  |         |
|     |          | $F_i$ |         | -61.168  | -63.054 | -64.841  |         |
| 19  | ΚΥΘΗΡΑ   | $A_i$ | 10.736  | 15.375   | 17.834  | 20.399   | 25.816  |
|     |          | $B_i$ | - 8.402 | - 7.107  | - 7.568 | - 8.099  | - 8.814 |
|     |          | $F_i$ | -59.978 | -56.380  | -57.298 | -58.889  | -63.870 |
| 20  | ΚΥΜΗ     | $A_i$ | 8.408   | 13.239   | 16.547  | 19.842   | 26.013  |
|     |          | $B_i$ | - 8.399 | - 7.881  | - 8.194 | - 8.514  | - 7.538 |
|     |          | $F_i$ | -63.467 | -60.660  | -62.451 | -64.149  | -62.860 |
| 21  | ΛΑΡΙΣΑ   | $A_i$ | 2.416   | 8.931    | 15.312  | 21.693   | 29.260  |
|     |          | $B_i$ | -10.580 | - 8.610  | -10.272 | -11.969  | -11.380 |
|     |          | $F_i$ | -68.171 | -63.152  | -67.065 | -69.735  | -72.170 |
| 22  | ΛΗΜΝΟΣ   | $A_i$ | 7.763   | 13.317   | 16.636  | 19.962   | 25.200  |
|     |          | $B_i$ | - 9.770 | - 7.723  | - 8.509 | - 9.318  | - 8.740 |
|     |          | $F_i$ | -63.277 | -59.653  | -62.030 | -64.249  | -65.939 |
| 23  | ΜΕΘΩΝΗ   | $A_i$ | 9.688   | 14.304   | 17.916  | 21.543   | 25.752  |
|     |          | $B_i$ | - 8.272 | - 6.768  | - 6.959 | - 7.156  | - 7.270 |
|     |          | $F_i$ | -59.414 | -55.788  | -54.930 | -54.234  | -59.237 |
| 24  | ΜΥΤΙΛΗΝΗ | $A_i$ | 8.782   | 13.907   | 17.507  | 21.155   | 26.970  |
|     |          | $B_i$ | - 9.453 | - 7.508  | - 8.464 | - 9.457  | - 9.064 |
|     |          | $F_i$ | -64.958 | -60.230  | -63.164 | -65.688  | -68.336 |
| 25  | ΝΑΞΟΣ    | $A_i$ | 10.729  | 14.883   | 17.652  | 20.415   | 25.224  |
|     |          | $B_i$ | - 7.546 | - 6.422  | - 6.310 | - 6.197  | - 6.148 |
|     |          | $F_i$ | -57.474 | -55.245  | -57.260 | -59.443  | -60.851 |

Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος «EXCEL» και τη χρήση της σχέσης (Δ.5.2), του βιβλίου «ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ» του καθηγητή κυρίου Αντωνόπουλου, η οποία

υπολογίζει τη μέση θερμοκρασία εξωτερικού αέρος  $\bar{T}_o : \bar{T}_o = a + b \sin[360D/365 - f]$  (Δ.5.2)

όπου  $D(=1-365)$  είναι η ημέρα του έτους και  $a, b, f$  είναι συντελεστές οι οποίοι δίδονται για κάθε μια από τις 35 ελληνικές πόλεις στον Πίνακα-4, ακριβώς από πάνω, υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία εξωτερικού αέρος για την πόλη της Νάξου και για κάθε ημέρα του χρόνου.

Τα αποτελέσματα, μαζί με τα αντίστοιχα γραφήματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα -1.

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του Πίνακα Φ.6.2 του προαναφερθέντος βιβλίου, ο οποίος από εδώ και στο εξής θα ονομάζεται **Πίνακας-2**, στον οποίο φαίνονται τα ποσοστά της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας για κάθε ώρα, και της σχέσης:  $T_o = T_{\max} - \%D.R.$  (9.a), υπολογίζεται η ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας για την νήσο Νάξο.

Στην σχέση (9.a), όπου:

$T_o$ : η μέση εξωτερική θερμοκρασία για κάποια ώρα της ημέρας

D.R.: η μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας.

Από τον **Πίνακα 1.1** του **Παραρτήματος 1**, το D.R. υπολογίζεται ως η διαφορά:

$$T_{\text{mean-max}} - T_{\text{mean-min}} \quad (9.b)$$

για την ημέρα του μήνα που θέλουμε να εξετάσουμε.

Στον **Πίνακα 1.2** του **Παραρτήματος 1** βλέπουμε τα αποτελέσματα της  $T_o$  για κάθε 21<sup>η</sup> του κάθε μήνα.

**Πίνακας 9- 2: ΠΟΣΟΣΤΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ.**

| Time,h | %   | Time,h | %  | Time,h | %  | Time,h | %  |
|--------|-----|--------|----|--------|----|--------|----|
| 1      | 87  | 7      | 93 | 13     | 11 | 19     | 34 |
| 2      | 92  | 8      | 84 | 14     | 3  | 20     | 47 |
| 3      | 96  | 9      | 71 | 15     | 0  | 21     | 58 |
| 4      | 99  | 10     | 56 | 16     | 3  | 22     | 68 |
| 5      | 100 | 11     | 39 | 17     | 10 | 23     | 76 |
| 6      | 98  | 12     | 23 | 18     | 21 | 24     | 82 |

Τα νέα θερμοκρασιακά δεδομένα που προκύπτουν ανά ώρα, παρατίθενται στο **Παράρτημα - 2**.

## 9.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η ανάλυση του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται για την περιοχή της Νάξου (Γεωγραφικό πλάτος:  $\Phi=37.06^\circ$ ).

Η λειτουργία του ηλιακού συστήματος της εγκατάστασης προσομοιάζει προς αυτή του θερμοσίφωνα. Ουσιαστικά σε αυτό το τμήμα το νερό προθερμαίνεται και στη συνέχεια εισέρχόμενο στον θάλαμο ατμοποίησης ατμοποιείται.

Άρα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν απλό εμπορικό, ηλιακό συλλέκτη, ο οποίος όμως επειδή θα εγάζεται με θαλάσσιο νερό, θα πρέπει να παρουσιάζει αντοχή στην διάβρωση.

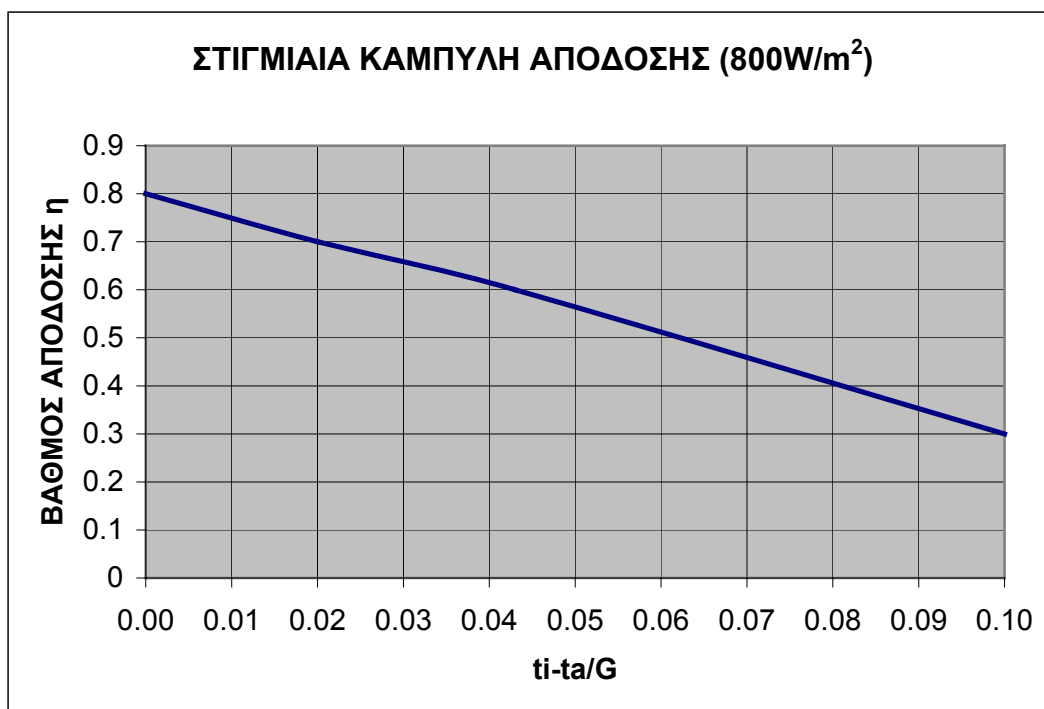
Επιλέγεται ο επιλεκτικός ηλιακός συλλέκτης από εννιαίο φύλλο χαλκού της εταιρίας «Helional Solar Systems», ο οποίος έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

|  |   |
|--|---|
| Συλλέκτης<br>Βάρος:42,5kg<br>Διαστάσεις:2000*1000*100mm<br>Εμβαδόν:1,98m <sup>2</sup><br>Εμβαδόν παραθύρου:1,78m <sup>2</sup><br>Εμβαδόν απορροφητή:1,81m <sup>2</sup><br>Αριθμός κυκλωμάτων:1<br>Υλικό καλύμματος: Mistlite tempered Glass<br>Διαπερατότητα καλύμματος:95%<br>Πάχος καλύμματος:4mm<br>Διαστάσεις καλύμματος:1960*960mm<br>Αριθμός σωληνών:12<br>Διάμετρος σωληνών:<br>Κύριες σωλήνες : $\varnothing 22$<br>Κάθετες: $\varnothing 10$<br>Απόσταση μεταξύ σωληνών:93mm<br>Υγρό μεταφοράς θερμότητας:Μίγμα νερού με μονοαιθυλενογλυκόλη<br>Απορροφητής | Μόνωση<br><br>Θερμική αγωγιμότητα:0,03kcal/mh <sup>o</sup> C<br>Υλικό:Πετροβάμβακας<br>Πάχος πλευρικής μόνωσης:30mm<br>Πάχος μόνωσης πλάτης:40mm<br><br>Πλαίσιο<br>Υλικό:Αλουμίνιο<br>Διαστάσεις:1992*996*98mm<br>Διαστάσεις παραθύρου:1919*925mm<br>Στεγανοποίηση:Διπλό EPDM |
| Υλικό:Χαλκός με επίστρωση οξειδίων τιτανίου<br>Επιφάνεια:Επιλεκτική $\varepsilon_p = 0.1$<br>Πάχος:0,2mm<br>Εμβαδόν:1,81m <sup>2</sup><br>Εκπομπή:5%<br>Απορρόφηση:95%<br>Σύνδεση μεταξύ των σωληνών:Υψίσυχη μοριακή συγκόλληση Ultrasonic Welding   | Περιορισμοί<br><br>Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας:150 <sup>o</sup> C<br>Μέγιστη πίεση λειτουργίας:8atm<br>Μέγιστη και ελάχιστη γωνία κλίσης:<br>Μέγιστη:90 <sup>o</sup><br>Ελάχιστη:0 <sup>o</sup>   |

Το υγρό μεταφοράς θερμότητας στην περίπτωση μας θα είναι το αλμυρό νερό.



Δίνεται η στιγμιαία καμπύλη της απόδοσης του συλλέκτη:



Σχήμα 9.2 Στιγμιαία καμπύλη απόδοσης συλλέκτη.

Σε σταθερές συνθήκες, η ωφέλιμη ισχύς η οποία αποδίδεται από έναν flat plate ηλιακό συλλέκτη ισούται με τη διαφορά της θερμότητας που απορροφάται από το υγρό μείον τις άμεσες και έμμεσες απώλειες από την επιφάνεια προς το περιβάλλον. Η ωφέλιμη ενέργεια που αποδίδεται από τον συλλέκτη, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_u = A_c q_u = A_c [G_T \tau \alpha - U_L (T_p - T_a)] = mc_p [T_o - T_i] \quad (9.1)$$

Αν αντικαταστήσουμε την μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης  $T_p$ , με την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη,  $T_i$ , η παραπάνω σχέση μπορεί να λάβει την μορφή:

$$Q_u = A_c q_u = A_c F_R [G_T (\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (9.2.)$$

όπου:

|               |   |
|---------------|---|
| $Q_u$         | = ωφέλιμη ενέργεια που παρέχεται από τον συλλέκτη [ W ]           |
| $A_c$         | = συνολική επιφάνεια του συλλέκτη [ m <sup>2</sup> ]              |
| $G_T$         | = ολική στιγμιαία τιμή της ακτινοβολίας [ W/m <sup>2</sup> ]      |
| $\tau \alpha$ | = γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας                       |
| $U_L$         | = συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών [ W/m <sup>2</sup> °C ] |
| $T_p$         | = μέση θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης [ °C ]              |
| $T_a$         | = θερμοκρασία περιβάλλοντος [ °C ]                                |

$T_o$  = θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη [°C]  
 $T_i$  = θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη [°C]  
 $\dot{m}$  = ροή μάζας [kg/s]  
 $c_p$  = ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση [J/kgK]  
 $F_R$  = παράγων θερμικής απολαβής του συλλέκτη

Προκειμένου να προσδιορίσουμε την ωφέλιμη ενέργεια που παρέχει ο συλλέκτης, πρέπει πρωτίστως να προσδιορίσουμε το μέγεθος  $G_T$ , δηλαδή την ολική στιγμιαία τιμή της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον συλλέκτη.

Από το βιβλίο «ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ», Κ. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2004 και τη σχέση:

$$I_t = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (9.3)$$

η οποία δίνει την ωριαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $I_t$ , όπου:

$I_t$  = ωριαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]  
 $\beta$  = η γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου ως προς το οριζόντιο (degrees)  
 $\rho$  = ανακλαστικότητα του εδάφους (0.2 για συνηθισμένο ως 0.7 για χιονισμένο)  
 $R_b = \frac{I_{bT}}{I_b}$  = λόγος άμεσης ακτινοβολίας, όπου:  $I_{bT}$  = ωριαία άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]  
 και  $I_b$  = ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]  
 $I_d$  = ωριαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [J/m<sup>2</sup>]

και τις σχέσεις:

$$G_b = \frac{I_b}{3600} \quad \text{και} \quad G_d = \frac{I_d}{3600} \quad (9.4),$$

όπου:

$G_b$  = στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [W/m<sup>2</sup>]  
 $G_d$  = στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [W/m<sup>2</sup>]

Προκύπτει η σχέση:

$$G_T = G_b R_b + G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (9.5)$$

Στην προκειμένη περίπτωση για τη νήσο Νάξο, το γεωγραφικό πλάτος είναι  $\varphi = 37.06^\circ$ . Για περιοχές με Βόρεια Γεωγραφικά Πλάτη, όπως η Ελλάδα, πρατηρείται ετήσια μεγιστοποίηση της ηλιακής

ακτινοβολίας για γωνία κλίσης του συλλέκτη ίση προς το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Δηλαδή για:

$$\beta = \phi = 37.06^\circ \quad (9.6)$$

Από το βιβλίο «ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ», Κ. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2004 και τις σχέσεις:

$$G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \quad (9.8)$$

$$G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365} D - p_t\right) \quad (9.9)$$

όπου οι συντελεστές  $M_t, A_t, P_t, m_t, a_t, p_t$  δίνονται για κάθε ώρα  $t$  στον πίνακα Α.15.1 του βιβλίου που θα ονομαστεί Πίνακας – 3 στην παρούσα εργασία και δίνεται παρακάτω.

Σημείωση: Αν και ο πίνακας αυτός αντιπροσωπεύει κυρίως την περιοχή των Αθηνών, στην προκειμένη εργασία θα χρησιμοποιηθεί, χωρίς να υπάρχει φόβος μεγάλου σφάλματος στους υπολογισμούς, αφού η Νάξος με την Αθήνα βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος.

**Πίνακας 9- 3: Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων (9.8) και (9.9).**

| Time t<br>[hrs] | $M_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $A_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $P_t$<br>[°] | $m_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $a_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $p_t$<br>[°] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|
| 08.00           | 0.057                         | 0.068                         | 87.31        | 0.134                         | 0.127                         | 82.45        |
| 09.00           | 0.119                         | 0.104                         | 87.94        | 0.208                         | 0.1333                        | 83.94        |
| 10.00           | 0.191                         | 0.129                         | 88.31        | 0.261                         | 0.129                         | 85.60        |
| 11.00           | 0.258                         | 0.153                         | 89.35        | 0.283                         | 0.117                         | 86.05        |
| 12.00           | 0.319                         | -0.181                        | -88.88       | 0.271                         | 0.095                         | 82.71        |
| 13.00           | 0.342                         | -0.194                        | -89.18       | 0.243                         | 0.081                         | 81.95        |
| 14.00           | 0.325                         | 0.183                         | 87.21        | 0.210                         | 0.083                         | 87.23        |
| 15.00           | 0.269                         | 0.166                         | 86.22        | 0.176                         | 0.087                         | 89.53        |
| 16.00           | 0.183                         | 0.147                         | 82.10        | 0.141                         | -0.085                        | -88.19       |
| 17.00           | 0.078                         | 0.131                         | 79.85        | 0.104                         | -0.079                        | -88.97       |

Με χρήση των παραπάνω συντελεστών, των σχέσεων (9.8) και (9.9) και του EXCEL, σχηματίζονται οι παρακάτω πίνακες:

**Πίνακας 9– 4 : Στιγμιαία άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για κάθε ώρα.**

| Time t<br>[hrs] | $M_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $A_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $P_t$<br>[°] | $G_b$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| 08.00           | 0.057                         | 0.068                         | 87.31        | 0.120                         |
| 09.00           | 0.119                         | 0.104                         | 87.94        | 0.216                         |
| 10.00           | 0.191                         | 0.129                         | 88.31        | 0.312                         |
| 11.00           | 0.258                         | 0.153                         | 89.35        | 0.402                         |
| 12.00           | 0.319                         | -0.181                        | -88.88       | 0.491                         |
| 13.00           | 0.342                         | -0.194                        | -89.18       | 0.526                         |
| 14.00           | 0.325                         | 0.183                         | 87.21        | 0.495                         |
| 15.00           | 0.269                         | 0.166                         | 86.22        | 0.422                         |
| 16.00           | 0.183                         | 0.147                         | 82.10        | 0.314                         |
| 17.00           | 0.078                         | 0.131                         | 79.85        | 0.192                         |

Οι μετρήσεις γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου, δηλαδή για:  $D=181+21=202^{\eta}$  ημέρα.

**Πίνακας 9– 5 : Στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για κάθε ώρα.**

| Time t<br>[hrs] | $m_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $a_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $p_t$<br>[°] | $G_d$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| 08.00           | 0.134                         | 0.127                         | 82.45        | 0.247                         |
| 09.00           | 0.208                         | 0.1333                        | 83.94        | 0.329                         |
| 10.00           | 0.261                         | 0.129                         | 85.60        | 0.379                         |
| 11.00           | 0.283                         | 0.117                         | 86.05        | 0.391                         |
| 12.00           | 0.271                         | 0.095                         | 82.71        | 0.356                         |
| 13.00           | 0.243                         | 0.081                         | 81.95        | 0.315                         |
| 14.00           | 0.210                         | 0.083                         | 87.23        | 0.287                         |
| 15.00           | 0.176                         | 0.087                         | 89.53        | 0.258                         |
| 16.00           | 0.141                         | -0.085                        | -88.19       | 0.222                         |
| 17.00           | 0.104                         | -0.079                        | -88.97       | 0.179                         |

Για να υπολογίσουμε την στιγμιαία ολική ακτινοβολία της ημέρας για κάθε ώρα της ημέρας, πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε τον λόγο άμεσης ακτινοβολίας  $R_b$ . Αυτός υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (9.10), \text{ όπου}$$

για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες προς τον Νότο ( $\gamma=0^\circ$ ), ισχύει:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad (9.11)$$

όπου:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (9.12)$$

ενώ το η δίνεται από τον πίνακα Α.1.1 του βιβλίου «ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ», Κ. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2004, ο οποίος από εδώ και στο εξής θα ονομάζεται Πίνακας – 6 και παρατίθεται στην συνέχεια:

**Πίνακας 9– 6 : Αύξων αριθμός ημέρας του έτους, η.Μέση ημέρα κάθε μήνα και αντίστοιχη τιμή της ηλιακής απόκλισης δ.**

| Month     | N for i <sup>th</sup> day of the month | For the average Day of the month |                |                |
|-----------|--|----------------------------------|----------------|----------------|
|           |  | Date                             | n, Day of Year | Δ, Declination |
| January   | i                                      | 17                               | 17             | -20.9          |
| February  | 31+i                                   | 16                               | 47             | -13.0          |
| March     | 59+i                                   | 16                               | 75             | -2.4           |
| April     | 90+i                                   | 15                               | 105            | 9.4            |
| May       | 120+i                                  | 15                               | 135            | 18.8           |
| June      | 151+i                                  | 11                               | 162            | 23.1           |
| July      | 181+i                                  | 17                               | 198            | 21.2           |
| August    | 212+i                                  | 16                               | 228            | 13.5           |
| September | 243+i                                  | 15                               | 258            | 2.2            |
| October   | 273+i                                  | 15                               | 288            | -9.6           |
| November  | 304+i                                  | 14                               | 318            | -18.9          |
| December  | 334+i                                  | 10                               | 344            | -23.0          |

Άρα, αφού μελετάμε για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου: n=181+21=202<sup>η</sup> ημέρα του μήνα. Τότε από τη σχέση (7.12) προκύπτει:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + 202)}{365}\right) = 20.44$$

Εν τω μεταξύ λαμβάνεται φ=β=37.06° για μέγιστη ετήσια ενέργεια, ενώ η γωνία ω δίνεται από την σχέση:

$$\omega = 0.25 * (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (9.13)$$

Λαμβάνεται ω>0 για μ.μ. και ω<0 για π.μ.

Έτσι για κάθε ώρα της ημέρας, προκύπτει ο Πίνακας- 7 που ακολουθεί:

**Πίνακας 9– 7 : Ωριαία γωνία ω για κάθε ώρα**

| Ωρα   | ω   |
|-------|-----|
| 08.00 | -60 |
| 09.00 | -45 |
| 10.00 | -30 |
| 11.00 | -15 |
| 12.00 | 0   |
| 13.00 | 15  |
| 14.00 | 30  |
| 15.00 | 45  |
| 16.00 | 60  |
| 17.00 | 75  |

Τότε η (9.11) δίνει:

$$\cos \theta = \sin 20.44 \sin 0 + \cos 20.44 \cos 0 \cos \omega = 0.937 \cos \omega \quad (9.12)$$

Έτσι σχηματίζεται ο Πίνακας 9– 8:

**Πίνακας 9– 8: Γωνία πρόσπτωσης της άμεσου ακτινοβολίας για κάθε ώρα**

| Ωρα   | $\omega$ | $\cos\omega$ | $\cos\theta$ | $\cos\theta_z$ |
|-------|----------|--------------|--------------|----------------|
| 08.00 | -60      | 0.500        | 0.469        | 0.584          |
| 09.00 | -45      | 0.707        | 0.663        | 0.739          |
| 10.00 | -30      | 0.866        | 0.812        | 0.858          |
| 11.00 | -15      | 0.966        | 0.905        | 0.933          |
| 12.00 | 0        | 1.000        | 0.937        | 0.958          |
| 13.00 | 15       | 0.966        | 0.905        | 0.933          |
| 14.00 | 30       | 0.866        | 0.812        | 0.858          |
| 15.00 | 45       | 0.707        | 0.663        | 0.739          |
| 16.00 | 60       | 0.500        | 0.469        | 0.584          |
| 17.00 | 75       | 0.259        | 0.243        | 0.404          |

Η γωνία ζενίθ  $\theta_z$  βρίσκεται από την σχέση:  $\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$  (9.13)

Ο λόγος  $R_b$ , της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου, δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (9.14)$$

όπου:  $G_{bT}$  = στιγμιαία άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [ $W/m^2$ ]. Έτσι προκύπτει ο Πίνακας 9– 9, όπως φαίνεται παρακάτω:

**Πίνακας 9 – 9 : Λόγος  $R_b$  συναρτήσει των γωνιών  $\theta, \theta_z$**

| Ωρα   | $\cos\theta$ | $\cos\theta_z$ | $R_b$ |
|-------|--------------|----------------|-------|
| 08.00 | 0.469        | 0.584          | 0.803 |
| 09.00 | 0.663        | 0.739          | 0.897 |
| 10.00 | 0.812        | 0.858          | 0.946 |
| 11.00 | 0.905        | 0.933          | 0.970 |
| 12.00 | 0.937        | 0.958          | 0.978 |
| 13.00 | 0.905        | 0.933          | 0.970 |
| 14.00 | 0.812        | 0.858          | 0.946 |
| 15.00 | 0.663        | 0.739          | 0.897 |
| 16.00 | 0.469        | 0.584          | 0.803 |
| 17.00 | 0.243        | 0.404          | 0.601 |

Για συνηθισμένο έδαφος έχουμε  $\rho=0.2$ . Τότε η σχέση (9.5) :

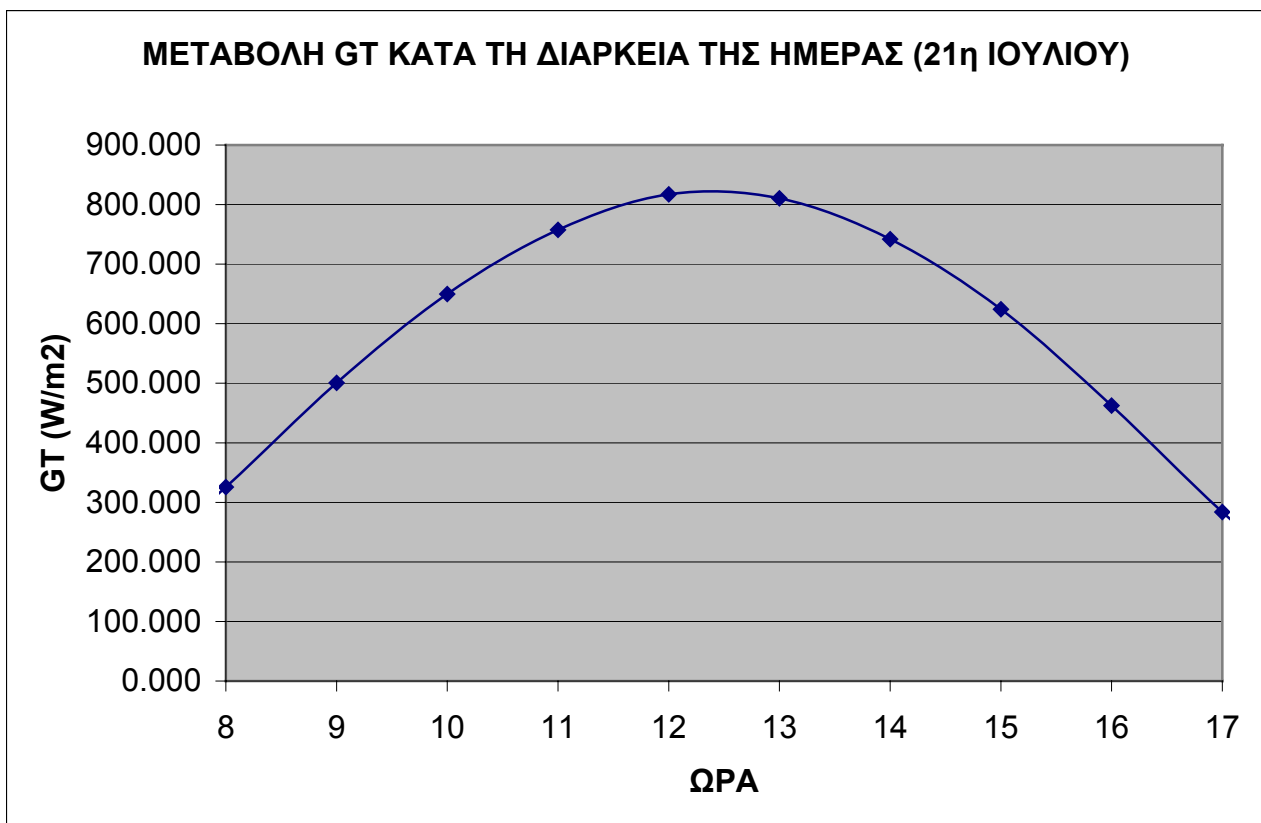


$$G_T = G_b R_b + G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (9.5)$$

σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των Πινάκων 4,5,9 δίνει τον τελικό Πίνακα 9–10, όπου υπολογίζεται η στιγμιαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$ .

**Πίνακας 9– 10 : Στιγμιαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$ .**

| Ωρα   | $G_b$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $G_d$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $R_b$ | $G_T$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------------|
| 08.00 | 0.120                         | 0.247                         | 0.803 | <b>0.326</b>                  |
| 09.00 | 0.216                         | 0.329                         | 0.897 | <b>0.501</b>                  |
| 10.00 | 0.312                         | 0.379                         | 0.946 | <b>0.650</b>                  |
| 11.00 | 0.402                         | 0.391                         | 0.970 | <b>0.757</b>                  |
| 12.00 | 0.491                         | 0.356                         | 0.978 | <b>0.817</b>                  |
| 13.00 | 0.526                         | 0.315                         | 0.970 | <b>0.810</b>                  |
| 14.00 | 0.495                         | 0.287                         | 0.946 | <b>0.742</b>                  |
| 15.00 | 0.422                         | 0.258                         | 0.897 | <b>0.624</b>                  |
| 16.00 | 0.314                         | 0.222                         | 0.803 | <b>0.463</b>                  |
| 17.00 | 0.192                         | 0.179                         | 0.601 | <b>0.284</b>                  |



**Διάγραμμα 9.1: Μεταβολή της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας  $G_T$**

Τώρα πλέον είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$Q_u = A_c q_u = A_c F_R [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (9.15)$$

$$q_u = F_R [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]$$

όπου:

$G_T$ : Η στιγμιαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [ $\text{kW/m}^2$ ], όπως προκύπτει από τον Πίνακα-10  
 $A_c$ : Η επιφάνεια του συλλέκτη, η οποία δίνεται  $1.98\text{m}^2$   
 $F_R U_L = 3.3 [\text{W/m}^2\text{K}]$  και  $F_R(\tau\alpha) = 0.72$  χαρακτηριστικά του συλλέκτη  
 $T_a$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και για κάθε ώρα προκύπτει από τους υπολογισμούς της παραγράφου 7.1 και παρατίθενται στον Πίνακα -11 που ακολουθεί.  
 $T_i$ : είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη, η οποία λαμβάνεται κάπου διπλάσια από την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος  $\bar{T}_a$

**Πίνακας 9– 11: Θερμοκρασία περιβάλλοντος για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και για κάθε ώρα**

| ΩΡΑ   | $T_a$  |
|-------|--------|
| 08.00 | 21.934 |
| 09.00 | 22.639 |
| 10.00 | 23.452 |
| 11.00 | 24.373 |
| 12.00 | 25.241 |
| 13.00 | 25.891 |
| 14.00 | 26.325 |
| 15.00 | 26.488 |
| 16.00 | 26.325 |
| 17.00 | 25.945 |

Απ' όπου προκύπτει ότι : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος γι' αυτές τις ώρες είναι:

$$\bar{T}_a = 24.61^\circ\text{C}.$$

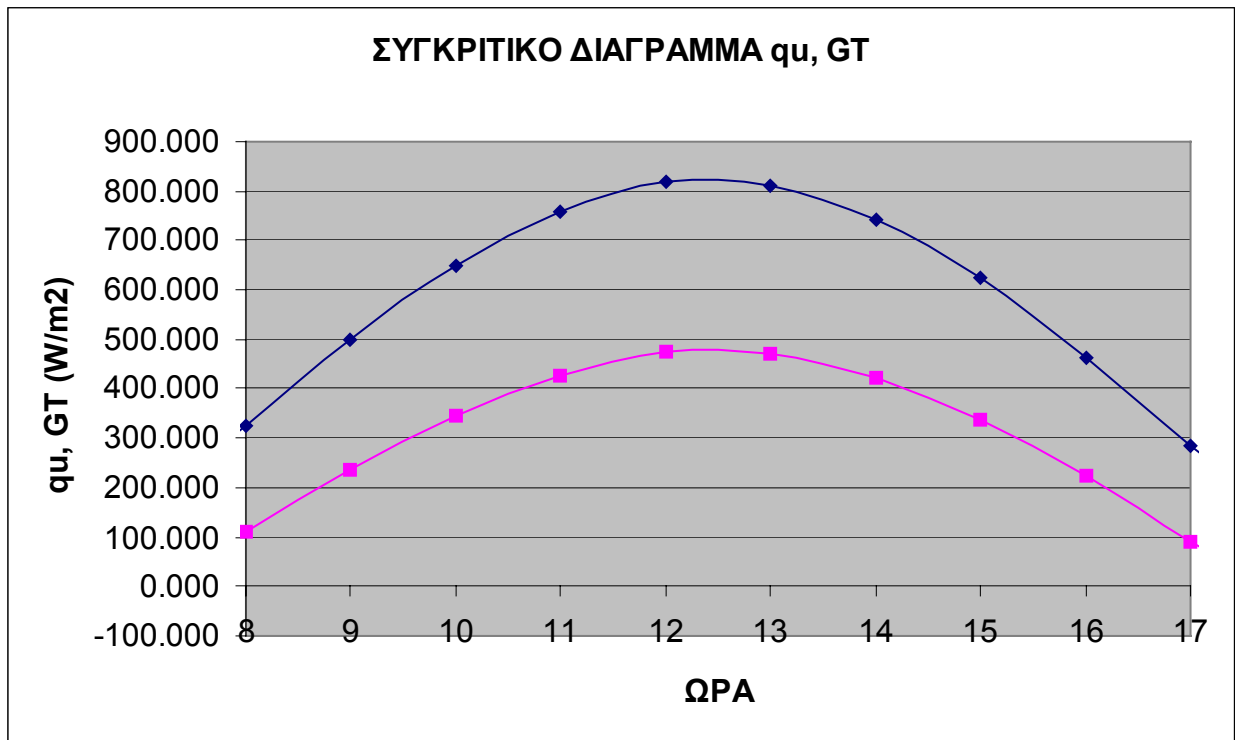
Άρα δέχομαι  $T_i = 60^\circ\text{C}$ , όπου  $T_i$  θεωρώ τη θερμοκρασία του νερού στο συλλέκτη.

Εφαρμόζοντας την σχέση (9.15), προκύπτει ο **Πίνακας 9- 12**, που ακολουθεί:

Πίνακας 9– 12 : Ωφέλιμη ισχύς συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

| ΩΡΑ   | $G_T$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $Q_u$<br>[w/m <sup>2</sup> ] | $q_u$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|-------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 08.00 | 0.326                         | 215.775                      | 108.977                      |
| 09.00 | 0.501                         | 469.442                      | 237.092                      |
| 10.00 | 0.650                         | 687.595                      | 347.270                      |
| 11.00 | 0.757                         | 847.059                      | 427.808                      |
| 12.00 | 0.817                         | 938.101                      | 473.788                      |
| 13.00 | 0.810                         | 932.428                      | 470.923                      |
| 14.00 | 0.742                         | 837.876                      | 423.170                      |
| 15.00 | 0.624                         | 670.909                      | 338.843                      |
| 16.00 | 0.463                         | 439.375                      | 221.906                      |
| 17.00 | 0.284                         | 182.080                      | 91.960                       |

Έτσι προκύπτει το παρακάτω Διάγραμμα 9-2 της ωφέλιμης ισχύος, όπου με μπλε χρώμα απεικονίζεται η μεταβολή της  $G_T$  και με ροζ χρώμα η μεταβολή της  $q_u$ .



Διάγραμμα 9.2: Μεταβολή της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας  $G_T$  και της ωφέλιμης ισχύος  $Q_u$  για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου.

Βασικό ρόλο στην εγκατάσταση έχει ο εναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνα. Αυτό γιατί το αλμυρό νερό προτού εισέλθει στον θάλαμο ατμοποίησης κυκλοφορώντας στον εσωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη, προθερμαίνεται από την αποβαλλόμενη άλμη που κυκλοφορεί στον εξωτερικό σωλήνα. Άρα η θερμοκρασία εισόδου του αλμυρού νερού στον θάλαμο ατμοποίησης, θα δίνεται από την σχέση:

$$T_i = \frac{\dot{Q}_h}{\rho_o \dot{V}_i C_{po}} + T_o \quad (9.16)$$

όπου:

$T_i$ : η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοποιητή

$\dot{Q}_h$ : ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

$$\dot{Q}_h = \varepsilon \dot{Q}_{\max} \quad (9.17)$$

και

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min} (T_s - T_o) \quad (9.18)$$

όπου:

$\dot{Q}_{\max}$ : ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

και:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \quad (9.19)$$

χαρακτηριστικό μέγεθος του εναλλάκτη.

$\rho_o, C_{po}, T_o$ : μεγέθη του αλμυρού νερού στην δεξαμενή τροφοδοσίας

$V_i$ : ροή όγκου [ $m^3/s$ ]

Με βάση στοιχεία της βιβλιογραφίας για μια εγκατάσταση παρόμοια με την εξεταζόμενη, η κατάσταση αναφοράς στον ατμοποιητή θα είναι:

Περιεκτικότητα άλατος: 3-5%

Πυκνότητα  $1025 kg/m^3$

Αν ο ηλιακός συλλέκτης λειτουργεί ως θερμοσίφωνα, η ροή μάζας μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$\dot{m}_c = \left[ A_c Z \frac{\pi N_c D_c^4 g \beta_f \rho_f f}{128 L_1 \gamma_{p,cf} (1 + r_p)} \left( \frac{L_c}{2} \sin \beta + H_c \right) \right]^{0.5} \quad (9.20)$$

όπου:

$A_c$  = συνολική επιφάνεια του συλλέκτη [ $1.98\text{m}^2$ ]

$Z$  = ανύψωση σε m (12m)

$N_c$  = αριθμός παράλληλων μετώπων στον συλλέκτη (1)

$D_c$  = διάμετρος του σωλήνα μετώπου του συλλέκτη (0.022m)

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9.81\text{m/s}^2$ )

$\beta_f$  = ογκομετρικός συντελεστής θερμικής επέκτασης ( $250 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$ )

$\rho_F$  = πυκνότητα ( $1021\text{kg/m}^3$ )

$L_1$  = μήκος του καναλιού του ρευστού στον συλλέκτη (1m)

$\gamma$  = κινηματική συνεκτικότητα ( $0.9 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ )

$C_{p,ef}$  = ειδική θερμότητα (J/Kkg)

$r_p$  = λόγος της πτώσης πίεσης στους συνδετικούς σωλήνες και στον ενελλάκτη προς αυτή του συλλέκτη ( $\approx 1$ )

$L_c$  = μήκος συλλέκτη (2.00m)

$H_c$  = κατακόρυφη απόσταση του πυθμένα του ατμοποιητή από την κορυφή του συλλέκτη (2m)

Το μέγεθος  $f$  είναι συντελεστής που δίδεται από την σχέση:

$$f = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091N_g) \quad (9.21)$$

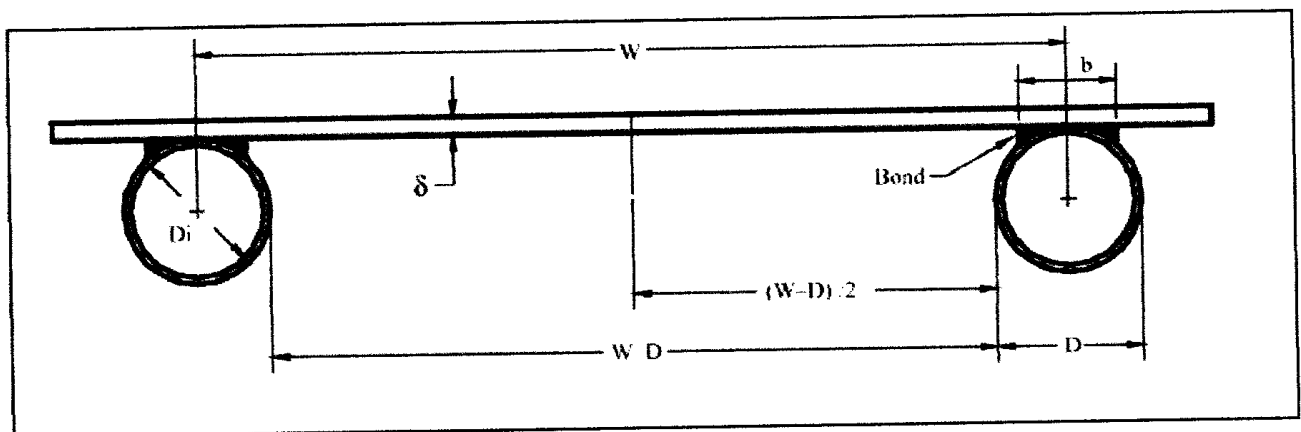
όπου:

$$h_w = 5.7 + 3.8W \quad (9.22)$$

και:

$N_g$  = ο αριθμός των γυάλινων περιβλημάτων του συλλέκτη.

$W$  = η απόσταση που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 9.2 Πλάκα απορρόφησης με σωλήνες σε τομή.

Για  $W = 0.093\text{m}$  προκύπτει:  $h_w = 5.7 + 3.8W = 6.05$  και:

$$f = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091N_g) = 0.847.$$

Με τα παραπάνω δεδομένα, η παροχή υπολογίζεται ως:

$$\dot{m}_c = [A_c Z \frac{\pi N_c D_c^4 g \beta_f \rho_f f}{128 L_1 \gamma_{p,cf} (1 + r_p)} (\frac{L_c}{2} \sin \beta + H_c)]^{0.5} = 36.855 (\text{kg/h})$$

Για αυτή την τιμή της παροχής μπορούμε να προσδιορίσουμε την θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη, που συμπίπτει με την θερμοκρασία εξόδου από τον ατμοποιητή.

Σύμφωνα με την σχέση (9.1):  $Q_u = m_c c_p [T_o - T_i] \Rightarrow T_o = T_i + \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}_c c_p}$ , όπου:

$$c_p = 4.19 \cdot 10^3 [J / \text{kg}^\circ C]$$

$$T_i = 60^\circ C$$

$$\dot{m}_c = \frac{36.855}{3600} = 0.0102 [kg / s]$$

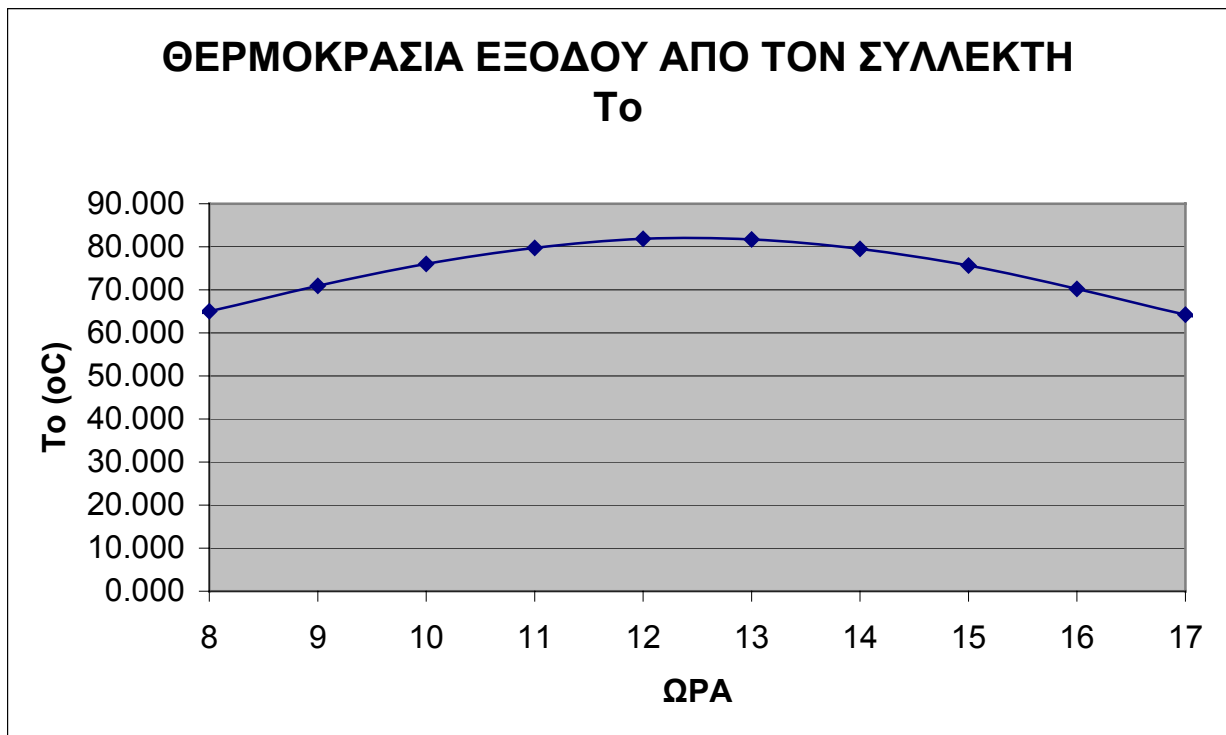
Με αντικατάσταση των παραπάνω τιμών και για κάθε  $Q_u$  όπως προκύπτει από τον Πίνακα 9– 12 για κάθε ώρα, προκύπτει η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9-13 που ακολουθεί:

**Πίνακας 9– 13 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον ατμοποιητή, συλλέκτη.**

| ΩΡΑ   | $Q_u$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $T_o$<br>[°C] |
|-------|------------------------------|---------------|
| 08.00 | 215.775                      | 65.028        |
| 09.00 | 469.442                      | 70.938        |
| 10.00 | 687.595                      | 76.021        |
| 11.00 | 847.059                      | 79.736        |
| 12.00 | 938.101                      | 81.858        |
| 13.00 | 932.428                      | 81.726        |
| 14.00 | 837.876                      | 79.523        |
| 15.00 | 670.909                      | 75.632        |
| 16.00 | 439.375                      | 70.237        |
| 17.00 | 182.080                      | 64.242        |

Έτσι προκύπτει το Διάγραμμα 3 όπως φαίνεται στην συνέχεια.





**Διάγραμμα 9.3: Θερμοκρασία νερού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη (21<sup>η</sup> Ιουλίου)**

Γνωρίζοντας για κάθε ώρα, την θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη  $T_o$ , την θερμοκρασία εισόδου στον συλλέκτη η οποία είναι σταθερή και ίση προς  $50^\circ\text{C}$  και την στιγμιαία καμπύλη απόδοσης του συλλέκτη η οποία παρέχεται από τον κατασκευαστή, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.

Αρκεί να υπολογίσουμε τη διαφορά θερμοκρασιών εισόδου και περιβάλλοντος στον συλλέκτη και να διαιρέσουμε με την στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία. Δηλαδή να σχηματίσουμε τον λόγο:

$$\frac{t_i - t_a}{G_T} \quad (9.23)$$

Στην συνέχεια πηγαίνουμε στην **καμπύλη απόδοσης του κατασκευαστή** και προσδιορίζουμε τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης. Η καμπύλη απόδοσης που διατίθεται για τον συλλέκτη που επιλέξαμε, αναφέρεται σε προσπίπτουσα ακτινοβολία  $800\text{W/m}^2$ , η οποία όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα επιτυγχάνεται κοντά στο ηλιακό μεσημέρι. Χωρίς μεγάλο σφάλμα μπορούμε να υπολογίσουμε τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη για αυτές τις ώρες και αυτό το αποτέλεσμα να το γενικεύσουμε.

Εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση :

$$\eta = 0.72 - 3.3 \frac{\Delta T}{G_T} \quad (9.24),$$

όπου  $\Delta T = t_i - t_a$ , που προκύπτει από τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη:

$$F_R U_L = 3.3 [\text{W/m}^2\text{K}] \text{ και } F_R (\tau\alpha) = 0.72$$

ή τη σχέση

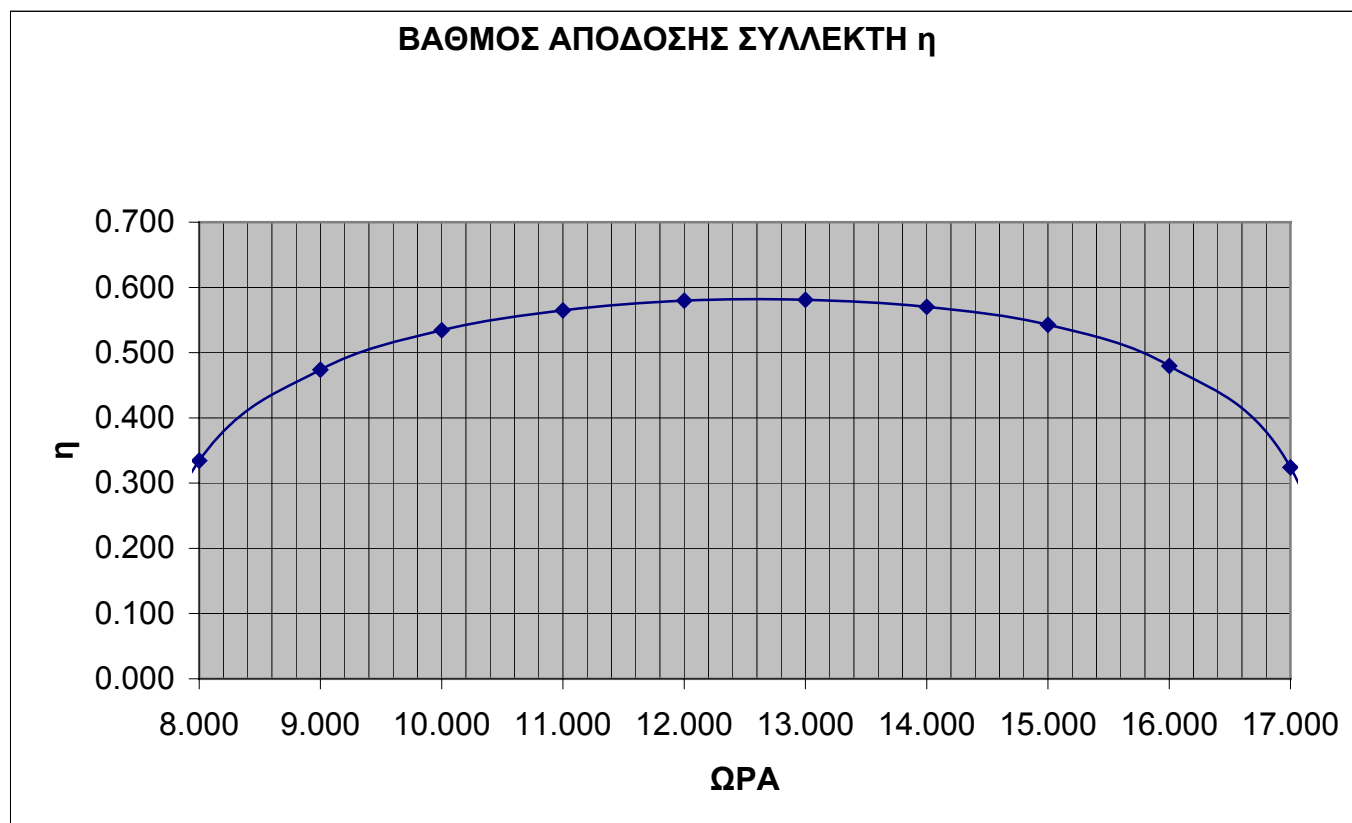
$$\eta = \frac{q_u}{G_T} \quad (9.25)$$

Και με τους τρεις παραπάνω τρόπους βρίσκουμε το ίδιο αποτέλεσμα για τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Οι δύο τελευταίες βέβαια έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Για το λόγο αυτό υπολογίζω τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη με την (9.25) και τα αποτελέσματα που παίρνω είναι:

**Πίνακας 9 – 14 : Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη.**

| ΩΡΑ   | $G_T$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $T_o$<br>[°C] | $q_u$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $\eta$ |
|-------|------------------------------|---------------|------------------------------|--------|
| 08.00 | 325.826                      | 65.028        | 108.977                      | 0.334  |
| 09.00 | 500.532                      | 70.938        | 237.092                      | 0.474  |
| 10.00 | 649.831                      | 76.021        | 347.270                      | 0.534  |
| 11.00 | 757.468                      | 79.736        | 427.808                      | 0.565  |
| 12.00 | 817.351                      | 81.858        | 473.788                      | 0.580  |
| 13.00 | 810.393                      | 81.726        | 470.923                      | 0.581  |
| 14.00 | 742.079                      | 79.523        | 423.170                      | 0.570  |
| 15.00 | 624.212                      | 75.632        | 338.843                      | 0.543  |
| 16.00 | 462.547                      | 70.237        | 221.906                      | 0.480  |
| 17.00 | 283.807                      | 64.242        | 91.960                       | 0.324  |

Του οποίου η διακύμανση απεικονίζεται στο Διάγραμμα 9.4 που ακολουθεί.



**Διάγραμμα 9.4 : Βαθμός απόδοσης συλλέκτη  $\eta$ .**

Τέλος, ένα βασικό μέγεθος που πρέπει να υπολογιστεί, είναι το πόσιμο νερό που παράγεται μέσω της διαδικασίας της αφαλάτωσης.

Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος αφαλάτωσης, το οποίο λειτουργεί με τη βοήθεια ηλιακών συλλεκτών, ενώ κάνει ανάκτηση θερμότητας από την καυτή άλμη και συνθήκες κενού επικρατούν στον θάλαμο εξάτμισης του είναι περίπου 80%.

Έτσι χρησιμοποιώντας την σχέση:  $\eta_t = \frac{\dot{m}_f h_{fg}}{\dot{Q}_u}$  (9.26) υπολογίζεται η στιγμιαία παραγωγή

πόσιμου νερού για τις ώρες ηλιοφάνειας. Ισοδύναμα η παραπάνω σχέση, γράφεται:

$$\eta = \frac{\dot{m} h_{fg}}{\dot{m}_c C_p (T_{co} - T_{ci})} = \frac{\dot{m} (3146 \cdot 10^3 - 2360 T_s)}{\dot{m}_c C_p (T_{co} - T_{ci})} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{m} = \frac{\eta \cdot \dot{Q}_u}{[3146 \cdot 10^3 - 2360 (T_s + 273)]} \quad (9.27)$$

Όπου  $T_{as}$ , η θερμοκρασία εισόδου του αλμυρού νερού στην δεξαμενή, η οποία λαμβάνεται λίγο μικρότερη της ατμοσφαιρικής, δεδομένου ότι η τροφοδοσία προθερμαίνεται στον εναλλάκτη διπλού σωλήνα.

Αντικαθιστώ, όπου:

$$\eta = 0.80$$

$$T_s = 23.5^\circ C$$

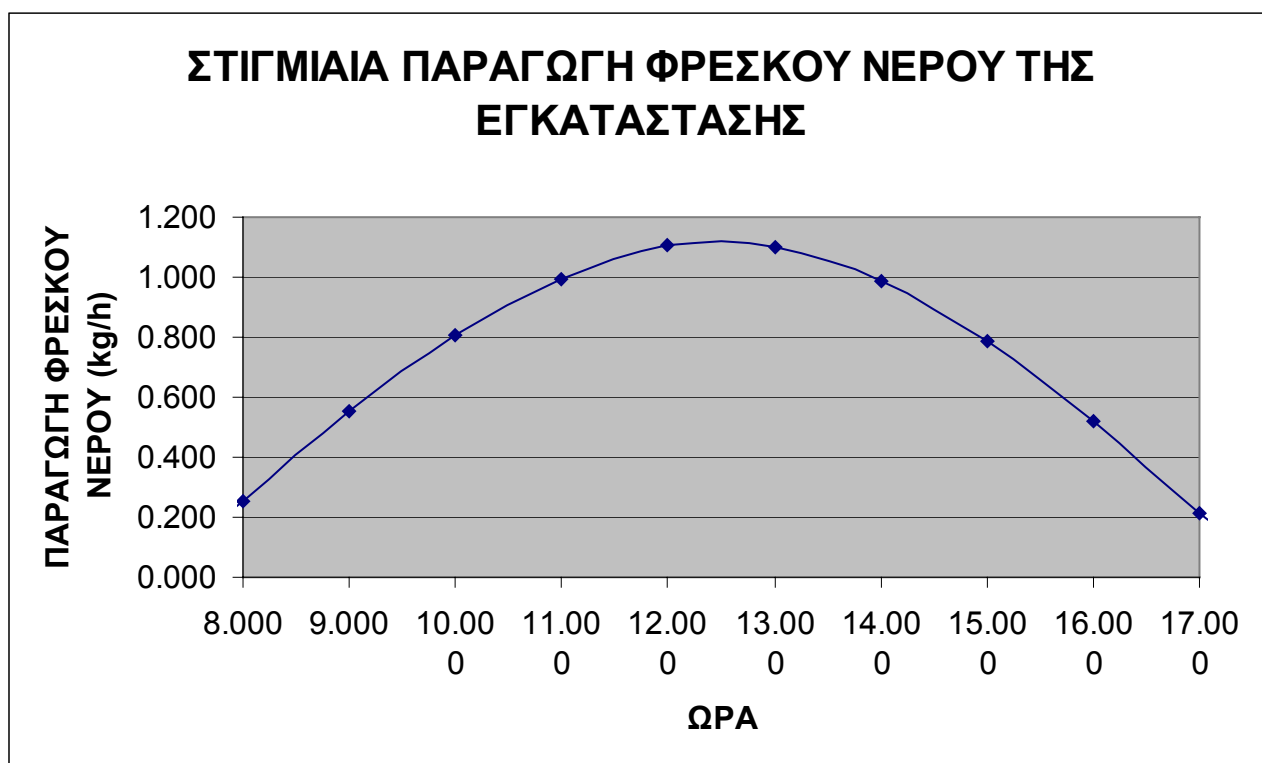
$$\dot{m}_c = 36.855 (kg / h)$$

και έτσι δημιουργείται ο Πίνακας 9 - 16:

**Πίνακας 9– 16 : Στιγμιαία παραγωγή της εγκατάστασης**

| Ωρα | Qu<br>[W] | m<br>[kg/h]  |
|-----|-----------|--------------|
| 8   | 215.775   | <b>0.254</b> |
| 9   | 469.442   | <b>0.552</b> |
| 10  | 687.595   | <b>0.809</b> |
| 11  | 847.059   | <b>0.996</b> |
| 12  | 938.101   | <b>1.103</b> |
| 13  | 932.428   | <b>1.097</b> |
| 14  | 837.876   | <b>0.985</b> |
| 15  | 670.909   | <b>0.789</b> |
| 16  | 439.375   | <b>0.517</b> |
| 17  | 182.080   | <b>0.214</b> |

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα απεικονίζονται γραφικά στο Διάγραμμα 9.6 που ακολουθεί:



**Διάγραμμα 9.6 : Στιγμιαία παραγωγή φρέσκου νερού της εγκατάστασης**

Σε μια πραγματική εγκατάσταση βέβαια, θα υπάρχουν περισσότεροι του ενός συλλέκτες, οπότε και η αντίστοιχη παραγωγή αφαλατωμένου νερού θα είναι πολύ μεγαλύτερη. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ενδεικτική και αποτελεί πρότυπο για εφαρμογές σε διαφορετικές ημέρες του έτους.

Στο Παράρτημα-2 στο τέλος της εργασίας, παρατίθενται σχετικά διαγράμματα και πίνακες για τον μήνα Φεβρουάριο, ο οποίος παρουσιάζεται να είναι και ο δυσμενέστερος στατιστικά από άποψη ηλιοφάνειας και εξωτερικών θερμοκρασιών περιβάλλοντος κατά την διάρκεια του ελληνικού χειμώνα.

Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη άποψη για την απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης και την αντίστοιχη παραγωγή αφαλατωμένου νερού κατά την διάρκεια ενός έτους, αφού μπορούμε να έχουμε δεδομένα για τις δύο ακραίες καιρικές εποχές του χρόνου.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1



**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ 1.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΑΠΟ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ 10**

**ΕΤΩΝ**

| ΠΟΛΗ  | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ | min-min | mean-min | mean   | mean-max | max-max |
|-------|-------------|---------|----------|--------|----------|---------|
| ΝΑΞΟΣ | a           | 10.729  | 14.883   | 17.652 | 20.415   | 25.224  |
|       | b           | -7.546  | -6.422   | -6.31  | -6.197   | -6.148  |
|       | f           | -57.474 | -55.245  | -57.26 | -59.443  | -60.851 |

H

μέση θερμοκρασία 24ώρου  
εξωτερικού αέρος ΤΟ,

δίνεται από τη σχέση:  $T_O = a + b \cdot \sin[360 \cdot D / 365 - f]$ ,

όπου D η ημέρα του έτους και a,b,f οι συντελεστές που δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

όπου D η ημέρα του

| DAY OF THE YEAR | min-min            | mean-min         | mean             | mean-max     | max-max          |
|-----------------|--------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|
| 1               | 4.299753311        | 9.5462435        | 12.288204        | 15.02681     | 19.805445        |
| 2               | 4.232737028        | 9.4855738        | 12.231818        | 14.97494     | 19.756273        |
| 3               | 4.167643778        | 9.4265019        | 12.177036        | 14.92469     | 19.708719        |
| 4               | 4.104492828        | 9.3690452        | 12.123875        | 14.87606     | 19.662799        |
| 5               | 4.043302873        | 9.3132207        | 12.072351        | 14.82906     | 19.618524        |
| 6               | 3.984092026        | 9.259045         | 12.022478        | 14.78372     | 19.575909        |
| 7               | 3.926877815        | 9.2065342        | 11.974272        | 14.74005     | 19.534966        |
| 8               | 3.871677176        | 9.1557037        | 11.927747        | 14.69806     | 19.495707        |
| 9               | 3.818506451        | 9.1065685        | 11.882915        | 14.65776     | 19.458143        |
| 10              | 3.767381378        | 9.0591434        | 11.839792        | 14.61917     | 19.422287        |
| 11              | 3.718317092        | 9.0134422        | 11.79839         | 14.58229     | 19.388147        |
| 12              | 3.671328117        | 8.9694785        | 11.75872         | 14.54714     | 19.355736        |
| 13              | 3.626428363        | 8.9272654        | 11.720794        | 14.51372     | 19.325061        |
| 14              | 3.58363112         | 8.8868153        | 11.684625        | 14.48205     | 19.296133        |
| 15              | 3.542949059        | 8.8481401        | 11.650221        | 14.45214     | 19.268959        |
| 16              | 3.50439422         | 8.8112515        | 11.617595        | 14.42399     | 19.243549        |
| 17              | 3.467978019        | 8.7761602        | 11.586755        | 14.39762     | 19.219908        |
| 18              | 3.433711234        | 8.7428766        | 11.55771         | 14.37302     | 19.198045        |
| 19              | 3.40160401         | 8.7114107        | 11.530469        | 14.35022     | 19.177966        |
| 20              | 3.37166585         | 8.6817716        | 11.505041        | 14.32921     | 19.159677        |
| <b>21</b>       | <b>3.343905617</b> | <b>8.6539683</b> | <b>11.481432</b> | <b>14.31</b> | <b>19.143182</b> |
| 22              | 3.318331529        | 8.6280089        | 11.459649        | 14.2926      | 19.128488        |
| 23              | 3.294951156        | 8.6039011        | 11.4397          | 14.27702     | 19.115598        |
| 24              | 3.273771419        | 8.5816521        | 11.42159         | 14.26325     | 19.104517        |
| 25              | 3.254798588        | 8.5612684        | 11.405324        | 14.2513      | 19.095246        |
| 26              | 3.238038279        | 8.542756         | 11.390907        | 14.24117     | 19.087791        |
| 27              | 3.223495454        | 8.5261205        | 11.378343        | 14.23287     | 19.082151        |
| 28              | 3.211174418        | 8.5113668        | 11.367637        | 14.22641     | 19.07833         |
| 29              | 3.201078817        | 8.4984992        | 11.358791        | 14.22177     | 19.076328        |
| 30              | 3.193211641        | 8.4875216        | 11.351808        | 14.21897     | 19.076146        |
| 31              | 3.187575218        | 8.4784371        | 11.34669         | 14.218       | 19.077783        |
| 32              | 3.184171217        | 8.4712485        | 11.343438        | 14.21887     | 19.08124         |
| 33              | 3.183000645        | 8.465958         | 11.342054        | 14.22157     | 19.086516        |
| 34              | 3.184063849        | 8.462567         | 11.342538        | 14.2261      | 19.093608        |
| 35              | 3.187360515        | 8.4610767        | 11.34489         | 14.23247     | 19.102515        |
| 36              | 3.192889666        | 8.4614873        | 11.349108        | 14.24066     | 19.113234        |

|    |             |           |           |          |           |                 |
|----|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------------|
| 37 | 3.200649665 | 8.4637989 | 11.355192 | 14.25069 | 19.125762 |                 |
| 38 | 3.210638216 | 8.4680106 | 11.363141 | 14.26254 | 19.140095 |                 |
| 39 | 3.222852361 | 8.4741214 | 11.372951 | 14.27621 | 19.15623  |                 |
| 40 | 3.237288486 | 8.4821293 | 11.384619 | 14.29169 | 19.17416  |                 |
| 41 | 3.253942316 | 8.492032  | 11.398143 | 14.30899 | 19.193881 |                 |
| 42 | 3.272808921 | 8.5038265 | 11.413519 | 14.3281  | 19.215387 |                 |
| 43 | 3.293882718 | 8.5175095 | 11.430741 | 14.34901 | 19.238672 |                 |
| 44 | 3.317157467 | 8.5330767 | 11.449804 | 14.37172 | 19.263729 |                 |
| 45 | 3.342626278 | 8.5505237 | 11.470704 | 14.39621 | 19.29055  |                 |
| 46 | 3.370281613 | 8.5698452 | 11.493433 | 14.42248 | 19.319128 |                 |
| 47 | 3.400115285 | 8.5910356 | 11.517986 | 14.45053 | 19.349453 |                 |
| 48 | 3.432118462 | 8.6140884 | 11.544354 | 14.48035 | 19.381518 |                 |
| 49 | 3.466281671 | 8.6389971 | 11.57253  | 14.51192 | 19.415312 |                 |
| 50 | 3.502594799 | 8.6657541 | 11.602506 | 14.54524 | 19.450825 |                 |
| 51 | 3.541047096 | 8.6943515 | 11.634273 | 14.5803  | 19.488048 |                 |
| 52 | 3.58162718  | 8.7247809 | 11.667821 | 14.61708 | 19.526968 | 21η ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ |
| 53 | 3.624323037 | 8.7570332 | 11.70314  | 14.65558 | 19.567575 |                 |
| 54 | 3.66912203  | 8.791099  | 11.740221 | 14.69579 | 19.609857 |                 |
| 55 | 3.716010897 | 8.8269681 | 11.779051 | 14.73768 | 19.6538   |                 |
| 56 | 3.764975757 | 8.8646299 | 11.81962  | 14.78126 | 19.699392 |                 |
| 57 | 3.816002116 | 8.9040733 | 11.861916 | 14.82651 | 19.746619 |                 |
| 58 | 3.869074869 | 8.9452866 | 11.905925 | 14.87341 | 19.795468 |                 |
| 59 | 3.924178305 | 8.9882575 | 11.951636 | 14.92195 | 19.845924 |                 |
| 60 | 3.981296113 | 9.0329735 | 11.999033 | 14.97212 | 19.897972 |                 |
| 61 | 4.040411385 | 9.0794211 | 12.048105 | 15.0239  | 19.951597 |                 |
| 62 | 4.101506621 | 9.1275868 | 12.098835 | 15.07727 | 20.006782 |                 |
| 63 | 4.164563735 | 9.1774561 | 12.151209 | 15.13223 | 20.063512 |                 |
| 64 | 4.229564062 | 9.2290145 | 12.205211 | 15.18874 | 20.121769 |                 |
| 65 | 4.29648836  | 9.2822465 | 12.260826 | 15.24681 | 20.181537 |                 |
| 66 | 4.365316818 | 9.3371365 | 12.318037 | 15.30641 | 20.242797 |                 |
| 67 | 4.436029061 | 9.3936681 | 12.376826 | 15.36751 | 20.305532 |                 |
| 68 | 4.508604157 | 9.4518248 | 12.437177 | 15.43011 | 20.369723 |                 |
| 69 | 4.583020622 | 9.5115891 | 12.499072 | 15.49419 | 20.435351 |                 |
| 70 | 4.659256428 | 9.5729436 | 12.562492 | 15.55973 | 20.502396 |                 |
| 71 | 4.737289006 | 9.6358699 | 12.627419 | 15.6267  | 20.570839 |                 |
| 72 | 4.817095259 | 9.7003494 | 12.693833 | 15.69509 | 20.64066  |                 |
| 73 | 4.89865156  | 9.7663632 | 12.761715 | 15.76487 | 20.711837 |                 |
| 74 | 4.981933768 | 9.8338916 | 12.831045 | 15.83603 | 20.78435  |                 |
| 75 | 5.06691723  | 9.9029146 | 12.901802 | 15.90855 | 20.858177 |                 |
| 76 | 5.153576788 | 9.9734118 | 12.973964 | 15.9824  | 20.933297 |                 |
| 77 | 5.24188679  | 10.045362 | 13.047512 | 16.05757 | 21.009686 |                 |
| 78 | 5.331821094 | 10.118745 | 13.122423 | 16.13402 | 21.087324 |                 |
| 79 | 5.423353077 | 10.193538 | 13.198674 | 16.21174 | 21.166185 |                 |
| 80 | 5.516455645 | 10.269719 | 13.276244 | 16.29071 | 21.246248 | 21η ΜΑΡΤΙΟΥ     |
| 81 | 5.611101236 | 10.347266 | 13.355109 | 16.37089 | 21.327489 |                 |
| 82 | 5.707261834 | 10.426155 | 13.435246 | 16.45228 | 21.409883 |                 |
| 83 | 5.804908973 | 10.506364 | 13.516632 | 16.53483 | 21.493406 |                 |
| 84 | 5.904013747 | 10.587868 | 13.599241 | 16.61854 | 21.578033 |                 |
| 85 | 6.00454682  | 10.670644 | 13.68305  | 16.70337 | 21.66374  |                 |
| 86 | 6.106478431 | 10.754667 | 13.768034 | 16.7893  | 21.7505   |                 |
| 87 | 6.209778406 | 10.839912 | 13.854168 | 16.8763  | 21.838289 |                 |
| 88 | 6.314416167 | 10.926353 | 13.941426 | 16.96435 | 21.92708  |                 |
| 89 | 6.420360739 | 11.013966 | 14.029783 | 17.05342 | 22.016847 |                 |
| 90 | 6.527580759 | 11.102724 | 14.119211 | 17.14348 | 22.107563 |                 |

|     |             |           |           |          |           |              |
|-----|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|--------------|
| 91  | 6.636044489 | 11.192602 | 14.209686 | 17.23451 | 22.199202 |              |
| 92  | 6.74571982  | 11.283571 | 14.301179 | 17.32649 | 22.291737 |              |
| 93  | 6.856574286 | 11.375606 | 14.393665 | 17.41938 | 22.385139 |              |
| 94  | 6.968575073 | 11.46868  | 14.487115 | 17.51315 | 22.479381 |              |
| 95  | 7.081689025 | 11.562764 | 14.581501 | 17.60779 | 22.574437 |              |
| 96  | 7.195882659 | 11.657831 | 14.676797 | 17.70326 | 22.670276 |              |
| 97  | 7.311122171 | 11.753853 | 14.772974 | 17.79952 | 22.766871 |              |
| 98  | 7.427373446 | 11.850801 | 14.870002 | 17.89657 | 22.864194 |              |
| 99  | 7.544602074 | 11.948646 | 14.967855 | 17.99436 | 22.962216 |              |
| 100 | 7.662773351 | 12.047361 | 15.066501 | 18.09286 | 23.060906 |              |
| 101 | 7.781852295 | 12.146914 | 15.165914 | 18.19205 | 23.160238 |              |
| 102 | 7.901803659 | 12.247278 | 15.266062 | 18.2919  | 23.26018  |              |
| 103 | 8.022591932 | 12.348422 | 15.366916 | 18.39238 | 23.360703 |              |
| 104 | 8.144181359 | 12.450316 | 15.468447 | 18.49346 | 23.461778 |              |
| 105 | 8.266535948 | 12.55293  | 15.570624 | 18.59511 | 23.563375 |              |
| 106 | 8.389619478 | 12.656234 | 15.673418 | 18.69729 | 23.665463 |              |
| 107 | 8.513395515 | 12.760197 | 15.776797 | 18.79999 | 23.768013 |              |
| 108 | 8.637827417 | 12.864789 | 15.880731 | 18.90316 | 23.870993 |              |
| 109 | 8.762878351 | 12.969978 | 15.985189 | 19.00678 | 23.974374 |              |
| 110 | 8.888511299 | 13.075733 | 16.090141 | 19.11081 | 24.078125 |              |
| 111 | 9.01468907  | 13.182023 | 16.195555 | 19.21524 | 24.182216 | 21η ΑΠΡΙΛΙΟΥ |
| 112 | 9.141374314 | 13.288817 | 16.301401 | 19.32001 | 24.286614 |              |
| 113 | 9.268529529 | 13.396083 | 16.407646 | 19.42512 | 24.39129  |              |
| 114 | 9.396117074 | 13.503789 | 16.514259 | 19.53051 | 24.496213 |              |
| 115 | 9.52409918  | 13.611903 | 16.62121  | 19.63617 | 24.601351 |              |
| 116 | 9.652437963 | 13.720393 | 16.728465 | 19.74205 | 24.706673 |              |
| 117 | 9.781095431 | 13.829228 | 16.835994 | 19.84814 | 24.812149 |              |
| 118 | 9.910033499 | 13.938375 | 16.943764 | 19.95439 | 24.917746 |              |
| 119 | 10.039214   | 14.047801 | 17.051745 | 20.06078 | 25.023434 |              |
| 120 | 10.16859869 | 14.157474 | 17.159902 | 20.16728 | 25.129182 |              |
| 121 | 10.29814927 | 14.267362 | 17.268206 | 20.27385 | 25.234957 |              |
| 122 | 10.42782739 | 14.377433 | 17.376623 | 20.38046 | 25.34073  |              |
| 123 | 10.55759467 | 14.487653 | 17.485121 | 20.48708 | 25.446467 |              |
| 124 | 10.68741268 | 14.59799  | 17.593669 | 20.59368 | 25.552139 |              |
| 125 | 10.81724301 | 14.708411 | 17.702234 | 20.70022 | 25.657714 |              |
| 126 | 10.94704721 | 14.818884 | 17.810785 | 20.80669 | 25.76316  |              |
| 127 | 11.07678687 | 14.929377 | 17.919288 | 20.91303 | 25.868447 |              |
| 128 | 11.20642358 | 15.039855 | 18.027712 | 21.01923 | 25.973543 |              |
| 129 | 11.33591896 | 15.150287 | 18.136025 | 21.12525 | 26.078417 |              |
| 130 | 11.46523467 | 15.26064  | 18.244195 | 21.23106 | 26.183038 |              |
| 131 | 11.59433245 | 15.370881 | 18.352189 | 21.33663 | 26.287375 |              |
| 132 | 11.72317407 | 15.480977 | 18.459977 | 21.44192 | 26.391398 |              |
| 133 | 11.85172139 | 15.590897 | 18.567525 | 21.54691 | 26.495075 |              |
| 134 | 11.97993636 | 15.700607 | 18.674802 | 21.65157 | 26.598376 |              |
| 135 | 12.10778103 | 15.810075 | 18.781776 | 21.75586 | 26.701269 |              |
| 136 | 12.23521755 | 15.919269 | 18.888415 | 21.85975 | 26.803726 |              |
| 137 | 12.3622082  | 16.028156 | 18.994689 | 21.96322 | 26.905715 |              |
| 138 | 12.48871539 | 16.136703 | 19.100565 | 22.06622 | 27.007206 |              |
| 139 | 12.61470166 | 16.24488  | 19.206013 | 22.16874 | 27.108169 |              |
| 140 | 12.74012972 | 16.352654 | 19.311    | 22.27074 | 27.208574 |              |
| 141 | 12.86496245 | 16.459992 | 19.415497 | 22.37219 | 27.308392 | 21η ΜΑΙΟΥ    |
| 142 | 12.98916288 | 16.566864 | 19.519471 | 22.47306 | 27.407593 |              |
| 143 | 13.11269426 | 16.673237 | 19.622893 | 22.57332 | 27.506148 |              |
| 144 | 13.23552002 | 16.77908  | 19.725731 | 22.67294 | 27.604027 |              |

|     |             |           |           |          |                        |
|-----|-------------|-----------|-----------|----------|------------------------|
| 145 | 13.35760379 | 16.884362 | 19.827955 | 22.7719  | 27.701201              |
| 146 | 13.47890944 | 16.989052 | 19.929535 | 22.87015 | 27.797642              |
| 147 | 13.59940106 | 17.093118 | 20.030441 | 22.96768 | 27.893322              |
| 148 | 13.71904298 | 17.19653  | 20.130643 | 23.06446 | 27.988211              |
| 149 | 13.83779978 | 17.299257 | 20.230111 | 23.16045 | 28.082281              |
| 150 | 13.95563632 | 17.401269 | 20.328816 | 23.25562 | 28.175506              |
| 151 | 14.0725177  | 17.502535 | 20.426728 | 23.34996 | 28.267857              |
| 152 | 14.18840932 | 17.603026 | 20.523819 | 23.44343 | 28.359307              |
| 153 | 14.30327689 | 17.702712 | 20.62006  | 23.536   | 28.449829              |
| 154 | 14.4170864  | 17.801563 | 20.715423 | 23.62764 | 28.539396              |
| 155 | 14.52980415 | 17.89955  | 20.809878 | 23.71834 | 28.627981              |
| 156 | 14.64139679 | 17.996644 | 20.903399 | 23.80806 | 28.715559              |
| 157 | 14.75183127 | 18.092816 | 20.995957 | 23.89677 | 28.802104              |
| 158 | 14.86107492 | 18.188038 | 21.087526 | 23.98445 | 28.887589              |
| 159 | 14.96909537 | 18.282282 | 21.178077 | 24.07108 | 28.971989              |
| 160 | 15.07586067 | 18.37552  | 21.267585 | 24.15662 | 29.05528               |
| 161 | 15.18133921 | 18.467724 | 21.356022 | 24.24106 | 29.137437              |
| 162 | 15.28549976 | 18.558866 | 21.443363 | 24.32436 | 29.218436              |
| 163 | 15.38831149 | 18.648921 | 21.529581 | 24.40651 | 29.298252              |
| 164 | 15.48974397 | 18.73786  | 21.614652 | 24.48747 | 29.376862              |
| 165 | 15.58976716 | 18.825659 | 21.69855  | 24.56723 | 29.454243              |
| 166 | 15.68835146 | 18.91229  | 21.78125  | 24.64576 | 29.530371              |
| 167 | 15.78546769 | 18.997729 | 21.862727 | 24.72304 | 29.605225              |
| 168 | 15.8810871  | 19.081949 | 21.942958 | 24.79904 | 29.678781              |
| 169 | 15.97518138 | 19.164927 | 22.021919 | 24.87375 | 29.751019              |
| 170 | 16.06772268 | 19.246637 | 22.099586 | 24.94713 | 29.821917              |
| 171 | 16.15868361 | 19.327056 | 22.175937 | 25.01918 | 29.891454              |
| 172 | 16.24803723 | 19.406158 | 22.250948 | 25.08986 | 29.959609 21η IOYNI OY |
| 173 | 16.3357571  | 19.483922 | 22.324598 | 25.15915 | 30.026363              |
| 174 | 16.42181726 | 19.560324 | 22.396865 | 25.22704 | 30.091694              |
| 175 | 16.50619221 | 19.635341 | 22.467727 | 25.29351 | 30.155585              |
| 176 | 16.588857   | 19.708952 | 22.537164 | 25.35853 | 30.218016              |
| 177 | 16.66978714 | 19.781134 | 22.605154 | 25.42209 | 30.278969              |
| 178 | 16.74895869 | 19.851866 | 22.671679 | 25.48417 | 30.338425              |
| 179 | 16.8263482  | 19.921127 | 22.736717 | 25.54475 | 30.396367              |
| 180 | 16.90193276 | 19.988897 | 22.80025  | 25.60381 | 30.452778              |
| 181 | 16.97569001 | 20.055155 | 22.86226  | 25.66133 | 30.507641              |
| 182 | 17.0475981  | 20.119882 | 22.922727 | 25.7173  | 30.560941              |
| 183 | 17.11763576 | 20.183059 | 22.981633 | 25.7717  | 30.61266               |
| 184 | 17.18578224 | 20.244667 | 23.038962 | 25.82451 | 30.662784              |
| 185 | 17.25201738 | 20.304688 | 23.094697 | 25.87573 | 30.711298              |
| 186 | 17.31632156 | 20.363104 | 23.14882  | 25.92532 | 30.758188              |
| 187 | 17.37867576 | 20.419898 | 23.201316 | 25.97329 | 30.80344               |
| 188 | 17.43906152 | 20.475052 | 23.252169 | 26.01961 | 30.84704               |
| 189 | 17.49746095 | 20.528552 | 23.301364 | 26.06427 | 30.888975              |
| 190 | 17.55385678 | 20.58038  | 23.348888 | 26.10726 | 30.929234              |
| 191 | 17.6082323  | 20.630521 | 23.394724 | 26.14856 | 30.967803              |
| 192 | 17.66057142 | 20.678961 | 23.438861 | 26.18817 | 31.004673              |
| 193 | 17.71085865 | 20.725686 | 23.481285 | 26.22607 | 31.039831              |
| 194 | 17.75907911 | 20.770681 | 23.521983 | 26.26224 | 31.073267              |
| 195 | 17.80521851 | 20.813933 | 23.560944 | 26.29669 | 31.104972              |
| 196 | 17.8492632  | 20.855429 | 23.598155 | 26.32939 | 31.134936              |
| 197 | 17.89120014 | 20.895157 | 23.633606 | 26.36035 | 31.163151              |
| 198 | 17.93101692 | 20.933106 | 23.667287 | 26.38954 | 31.189607              |

|     |             |           |           |          |           |               |
|-----|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|---------------|
| 199 | 17.96870175 | 20.969263 | 23.699187 | 26.41697 | 31.214297 |               |
| 200 | 18.00424347 | 21.003619 | 23.729296 | 26.44262 | 31.237214 |               |
| 201 | 18.03763157 | 21.036164 | 23.757607 | 26.46648 | 31.258351 |               |
| 202 | 18.06885615 | 21.066886 | 23.78411  | 26.48856 | 31.277702 | 21η ΙΟΥΛΙΟΥ   |
| 203 | 18.09790798 | 21.095778 | 23.808799 | 26.50883 | 31.295261 |               |
| 204 | 18.12477846 | 21.122831 | 23.831664 | 26.5273  | 31.311022 |               |
| 205 | 18.14945964 | 21.148037 | 23.8527   | 26.54397 | 31.324982 |               |
| 206 | 18.1719442  | 21.171389 | 23.871901 | 26.55881 | 31.337135 |               |
| 207 | 18.19222549 | 21.192878 | 23.889261 | 26.57184 | 31.347479 |               |
| 208 | 18.2102975  | 21.2125   | 23.904774 | 26.58305 | 31.35601  |               |
| 209 | 18.2261549  | 21.230249 | 23.918436 | 26.59243 | 31.362727 |               |
| 210 | 18.23979297 | 21.246118 | 23.930243 | 26.59998 | 31.367625 |               |
| 211 | 18.2512077  | 21.260104 | 23.940192 | 26.6057  | 31.370706 |               |
| 212 | 18.26039569 | 21.272202 | 23.948279 | 26.60959 | 31.371966 |               |
| 213 | 18.26735422 | 21.282408 | 23.954503 | 26.61165 | 31.371407 |               |
| 214 | 18.27208125 | 21.290721 | 23.95886  | 26.61187 | 31.369028 |               |
| 215 | 18.27457536 | 21.297136 | 23.961351 | 26.61025 | 31.36483  |               |
| 216 | 18.27483582 | 21.301653 | 23.961974 | 26.60681 | 31.358814 |               |
| 217 | 18.27286255 | 21.30427  | 23.960729 | 26.60153 | 31.350982 |               |
| 218 | 18.26865614 | 21.304986 | 23.957617 | 26.59441 | 31.341336 |               |
| 219 | 18.26221784 | 21.3038   | 23.952638 | 26.58547 | 31.32988  |               |
| 220 | 18.25354953 | 21.300714 | 23.945794 | 26.5747  | 31.316616 |               |
| 221 | 18.24265381 | 21.295729 | 23.937087 | 26.56211 | 31.301548 |               |
| 222 | 18.22953388 | 21.288845 | 23.926519 | 26.5477  | 31.284682 |               |
| 223 | 18.21419364 | 21.280065 | 23.914094 | 26.53148 | 31.266021 |               |
| 224 | 18.19663762 | 21.269391 | 23.899815 | 26.51344 | 31.245572 |               |
| 225 | 18.17687102 | 21.256826 | 23.883687 | 26.4936  | 31.22334  |               |
| 226 | 18.15489969 | 21.242375 | 23.865714 | 26.47196 | 31.199332 |               |
| 227 | 18.13073014 | 21.226041 | 23.845902 | 26.44852 | 31.173556 |               |
| 228 | 18.10436951 | 21.20783  | 23.824256 | 26.4233  | 31.146018 |               |
| 229 | 18.07582563 | 21.187746 | 23.800783 | 26.3963  | 31.116727 |               |
| 230 | 18.04510692 | 21.165796 | 23.77549  | 26.36753 | 31.085692 |               |
| 231 | 18.0122225  | 21.141987 | 23.748384 | 26.337   | 31.052921 |               |
| 232 | 17.97718208 | 21.116324 | 23.719473 | 26.30471 | 31.018426 |               |
| 233 | 17.93999605 | 21.088816 | 23.688767 | 26.27069 | 30.982215 | 21η ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ |
| 234 | 17.90067542 | 21.059471 | 23.656273 | 26.23492 | 30.944299 |               |
| 235 | 17.85923181 | 21.028298 | 23.622002 | 26.19744 | 30.90469  |               |
| 236 | 17.8156775  | 20.995306 | 23.585964 | 26.15824 | 30.863399 |               |
| 237 | 17.77002539 | 20.960504 | 23.548169 | 26.11735 | 30.820439 |               |
| 238 | 17.72228898 | 20.923903 | 23.508629 | 26.07476 | 30.775823 |               |
| 239 | 17.67248242 | 20.885514 | 23.467355 | 26.0305  | 30.729563 |               |
| 240 | 17.62062043 | 20.845348 | 23.42436  | 25.98458 | 30.681673 |               |
| 241 | 17.56671838 | 20.803417 | 23.379656 | 25.93701 | 30.632167 |               |
| 242 | 17.51079222 | 20.759734 | 23.333256 | 25.8878  | 30.581061 |               |
| 243 | 17.4528585  | 20.71431  | 23.285174 | 25.83698 | 30.528369 |               |
| 244 | 17.39293438 | 20.667161 | 23.235426 | 25.78455 | 30.474106 |               |
| 245 | 17.33103759 | 20.6183   | 23.184024 | 25.73053 | 30.41829  |               |
| 246 | 17.26718646 | 20.56774  | 23.130984 | 25.67493 | 30.360936 |               |
| 247 | 17.20139989 | 20.515498 | 23.076323 | 25.61778 | 30.302061 |               |
| 248 | 17.13369735 | 20.461589 | 23.020056 | 25.55909 | 30.241683 |               |
| 249 | 17.06409889 | 20.406028 | 22.9622   | 25.49888 | 30.17982  |               |
| 250 | 16.9926251  | 20.348832 | 22.902772 | 25.43716 | 30.116489 |               |
| 251 | 16.91929714 | 20.290018 | 22.84179  | 25.37396 | 30.05171  |               |
| 252 | 16.84413672 | 20.229604 | 22.779271 | 25.30928 | 29.985503 |               |



|     |             |           |           |          |           |                  |
|-----|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------------|
| 253 | 16.7671661  | 20.167607 | 22.715235 | 25.24316 | 29.917885 |                  |
| 254 | 16.68840805 | 20.104045 | 22.6497   | 25.17561 | 29.848879 |                  |
| 255 | 16.60788589 | 20.038938 | 22.582685 | 25.10665 | 29.778503 |                  |
| 256 | 16.52562345 | 19.972305 | 22.514211 | 25.0363  | 29.706779 |                  |
| 257 | 16.44164509 | 19.904165 | 22.444297 | 24.96458 | 29.633728 |                  |
| 258 | 16.35597567 | 19.834539 | 22.372965 | 24.89152 | 29.559371 |                  |
| 259 | 16.26864054 | 19.763447 | 22.300236 | 24.81713 | 29.483732 |                  |
| 260 | 16.17966556 | 19.690911 | 22.22613  | 24.74144 | 29.406831 |                  |
| 261 | 16.08907706 | 19.616951 | 22.15067  | 24.66446 | 29.328692 |                  |
| 262 | 15.99690188 | 19.54159  | 22.073879 | 24.58623 | 29.249338 |                  |
| 263 | 15.90316728 | 19.464849 | 21.995779 | 24.50677 | 29.168792 |                  |
| 264 | 15.80790101 | 19.386753 | 21.916393 | 24.42609 | 29.087079 | 21η ΣΕΙΤΤΕΜΒΡΙΟΥ |
| 265 | 15.71113129 | 19.307323 | 21.835744 | 24.34423 | 29.004222 |                  |
| 266 | 15.61288674 | 19.226583 | 21.753857 | 24.2612  | 28.920246 |                  |
| 267 | 15.51319647 | 19.144558 | 21.670756 | 24.17703 | 28.835176 |                  |
| 268 | 15.41208997 | 19.061271 | 21.586465 | 24.09175 | 28.749037 |                  |
| 269 | 15.30959717 | 18.976748 | 21.501009 | 24.00538 | 28.661854 |                  |
| 270 | 15.20574843 | 18.891012 | 21.414414 | 23.91795 | 28.573654 |                  |
| 271 | 15.10057447 | 18.80409  | 21.326706 | 23.82949 | 28.484462 |                  |
| 272 | 14.99410643 | 18.716008 | 21.237909 | 23.74001 | 28.394305 |                  |
| 273 | 14.88637583 | 18.62679  | 21.148051 | 23.64954 | 28.30321  |                  |
| 274 | 14.77741455 | 18.536465 | 21.057158 | 23.55812 | 28.211203 |                  |
| 275 | 14.66725486 | 18.445058 | 20.965257 | 23.46577 | 28.118311 |                  |
| 276 | 14.55592937 | 18.352596 | 20.872376 | 23.37252 | 28.024563 |                  |
| 277 | 14.44347102 | 18.259108 | 20.778541 | 23.27839 | 27.929986 |                  |
| 278 | 14.32991311 | 18.16462  | 20.68378  | 23.18341 | 27.834608 |                  |
| 279 | 14.21528925 | 18.06916  | 20.588122 | 23.08762 | 27.738457 |                  |
| 280 | 14.09963338 | 17.972758 | 20.491595 | 22.99103 | 27.641562 |                  |
| 281 | 13.98297972 | 17.87544  | 20.394227 | 22.89368 | 27.543951 |                  |
| 282 | 13.86536282 | 17.777237 | 20.296048 | 22.79559 | 27.445654 |                  |
| 283 | 13.7468175  | 17.678178 | 20.197085 | 22.69681 | 27.346698 |                  |
| 284 | 13.62737883 | 17.57829  | 20.09737  | 22.59734 | 27.247115 |                  |
| 285 | 13.50708218 | 17.477605 | 19.99693  | 22.49723 | 27.146932 |                  |
| 286 | 13.38596316 | 17.376152 | 19.895797 | 22.39651 | 27.046181 |                  |
| 287 | 13.26405762 | 17.273961 | 19.793999 | 22.29519 | 26.944889 |                  |
| 288 | 13.14140165 | 17.171062 | 19.691567 | 22.19332 | 26.843089 |                  |
| 289 | 13.01803156 | 17.067486 | 19.588531 | 22.09093 | 26.740809 |                  |
| 290 | 12.89398387 | 16.963263 | 19.484922 | 21.98803 | 26.63808  |                  |
| 291 | 12.7692953  | 16.858424 | 19.380771 | 21.88468 | 26.534933 |                  |
| 292 | 12.64400275 | 16.753    | 19.276108 | 21.78088 | 26.431397 |                  |
| 293 | 12.51814333 | 16.647023 | 19.170964 | 21.67669 | 26.327504 |                  |
| 294 | 12.39175428 | 16.540524 | 19.06537  | 21.57212 | 26.223284 | 21η ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ    |
| 295 | 12.26487301 | 16.433534 | 18.959358 | 21.4672  | 26.118769 |                  |
| 296 | 12.1375371  | 16.326085 | 18.852959 | 21.36198 | 26.013989 |                  |
| 297 | 12.00978423 | 16.218209 | 18.746204 | 21.25647 | 25.908975 |                  |
| 298 | 11.88165223 | 16.109938 | 18.639126 | 21.15072 | 25.803758 |                  |
| 299 | 11.75317901 | 16.001303 | 18.531755 | 21.04475 | 25.698369 |                  |
| 300 | 11.62440261 | 15.892338 | 18.424124 | 20.93859 | 25.59284  |                  |
| 301 | 11.49536116 | 15.783074 | 18.316264 | 20.83227 | 25.487202 |                  |
| 302 | 11.36609284 | 15.673543 | 18.208208 | 20.72584 | 25.381486 |                  |
| 303 | 11.23663594 | 15.563778 | 18.099987 | 20.61931 | 25.275723 |                  |
| 304 | 11.10702876 | 15.453812 | 17.991633 | 20.51272 | 25.169945 |                  |
| 305 | 10.97730968 | 15.343676 | 17.883179 | 20.4061  | 25.064183 |                  |
| 306 | 10.84751709 | 15.233405 | 17.774657 | 20.29949 | 24.958469 |                  |



|     |             |           |           |          |           |                |
|-----|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|----------------|
| 307 | 10.71768942 | 15.123029 | 17.666098 | 20.1929  | 24.852833 |                |
| 308 | 10.5878651  | 15.012583 | 17.557535 | 20.08639 | 24.747307 |                |
| 309 | 10.45808256 | 14.902098 | 17.449    | 19.97997 | 24.641921 |                |
| 310 | 10.32838021 | 14.791607 | 17.340525 | 19.87368 | 24.536709 |                |
| 311 | 10.19879645 | 14.681144 | 17.232142 | 19.76755 | 24.431699 |                |
| 312 | 10.06936965 | 14.57074  | 17.123884 | 19.66161 | 24.326925 |                |
| 313 | 9.940138114 | 14.460429 | 17.015781 | 19.5559  | 24.222415 |                |
| 314 | 9.811140096 | 14.350243 | 16.907868 | 19.45044 | 24.118203 |                |
| 315 | 9.682413783 | 14.240214 | 16.800174 | 19.34526 | 24.014317 |                |
| 316 | 9.553997283 | 14.130376 | 16.692733 | 19.2404  | 23.91079  |                |
| 317 | 9.425928608 | 14.020761 | 16.585575 | 19.13589 | 23.807651 |                |
| 318 | 9.29824567  | 13.911401 | 16.478734 | 19.03176 | 23.704932 |                |
| 319 | 9.170986265 | 13.802328 | 16.372239 | 18.92804 | 23.602662 |                |
| 320 | 9.044188066 | 13.693576 | 16.266124 | 18.82476 | 23.500873 |                |
| 321 | 8.917888607 | 13.585175 | 16.160418 | 18.72195 | 23.399593 |                |
| 322 | 8.792125275 | 13.477159 | 16.055154 | 18.61964 | 23.298854 |                |
| 323 | 8.6669353   | 13.369559 | 15.950363 | 18.51786 | 23.198684 |                |
| 324 | 8.542355739 | 13.262407 | 15.846076 | 18.41664 | 23.099114 |                |
| 325 | 8.418423471 | 13.155734 | 15.742323 | 18.31601 | 23.000173 | 21η NOEMBPIOY  |
| 326 | 8.295175183 | 13.049573 | 15.639136 | 18.21601 | 22.90189  |                |
| 327 | 8.172647359 | 12.943955 | 15.536544 | 18.11666 | 22.804295 |                |
| 328 | 8.050876269 | 12.83891  | 15.434579 | 18.01798 | 22.707415 |                |
| 329 | 7.929897961 | 12.734471 | 15.33327  | 17.92002 | 22.611281 |                |
| 330 | 7.809748246 | 12.630668 | 15.232647 | 17.82279 | 22.51592  |                |
| 331 | 7.690462692 | 12.527531 | 15.132741 | 17.72634 | 22.421361 |                |
| 332 | 7.57207661  | 12.425092 | 15.03358  | 17.63067 | 22.327632 |                |
| 333 | 7.454625043 | 12.32338  | 14.935194 | 17.53584 | 22.23476  |                |
| 334 | 7.338142761 | 12.222426 | 14.837613 | 17.44185 | 22.142773 |                |
| 335 | 7.222664245 | 12.12226  | 14.740865 | 17.34875 | 22.051698 |                |
| 336 | 7.108223679 | 12.022911 | 14.644978 | 17.25655 | 21.961562 |                |
| 337 | 6.994854939 | 11.924408 | 14.549982 | 17.16529 | 21.872391 |                |
| 338 | 6.882591586 | 11.826781 | 14.455904 | 17.07499 | 21.784213 |                |
| 339 | 6.771466851 | 11.730059 | 14.362772 | 16.98568 | 21.697053 |                |
| 340 | 6.66151363  | 11.634271 | 14.270614 | 16.89738 | 21.610938 |                |
| 341 | 6.552764471 | 11.539444 | 14.179456 | 16.81012 | 21.525891 |                |
| 342 | 6.445251566 | 11.445607 | 14.089327 | 16.72394 | 21.44194  |                |
| 343 | 6.339006742 | 11.352787 | 14.000252 | 16.63884 | 21.359108 |                |
| 344 | 6.234061449 | 11.261012 | 13.912259 | 16.55486 | 21.27742  |                |
| 345 | 6.130446753 | 11.17031  | 13.825372 | 16.47203 | 21.1969   |                |
| 346 | 6.028193327 | 11.080706 | 13.739618 | 16.39036 | 21.117573 |                |
| 347 | 5.927331439 | 10.992228 | 13.655022 | 16.30988 | 21.039461 |                |
| 348 | 5.827890947 | 10.904902 | 13.57161  | 16.23062 | 20.962588 |                |
| 349 | 5.729901287 | 10.818754 | 13.489405 | 16.1526  | 20.886976 |                |
| 350 | 5.633391466 | 10.733808 | 13.408432 | 16.07584 | 20.812648 |                |
| 351 | 5.538390054 | 10.650091 | 13.328716 | 16.00036 | 20.739626 |                |
| 352 | 5.444925173 | 10.567627 | 13.25028  | 15.92619 | 20.667931 |                |
| 353 | 5.353024489 | 10.48644  | 13.173146 | 15.85335 | 20.597586 |                |
| 354 | 5.262715209 | 10.406555 | 13.097338 | 15.78186 | 20.528609 |                |
| 355 | 5.174024065 | 10.327995 | 13.022879 | 15.71174 | 20.461023 | 21η ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ |
| 356 | 5.086977311 | 10.250783 | 12.94979  | 15.64302 | 20.394846 |                |
| 357 | 5.001600716 | 10.174943 | 12.878093 | 15.5757  | 20.330099 |                |
| 358 | 4.917919553 | 10.100496 | 12.807809 | 15.50982 | 20.266801 |                |
| 359 | 4.835958593 | 10.027465 | 12.738959 | 15.44539 | 20.20497  |                |
| 360 | 4.755742098 | 9.9558713 | 12.671563 | 15.38243 | 20.144625 |                |

|     |             |           |           |          |           |
|-----|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 361 | 4.677293814 | 9.8857361 | 12.605642 | 15.32096 | 20.085784 |
| 362 | 4.600636964 | 9.8170802 | 12.541214 | 15.261   | 20.028463 |
| 363 | 4.525794239 | 9.7499239 | 12.4783   | 15.20257 | 19.972681 |
| 364 | 4.452787795 | 9.6842871 | 12.416917 | 15.14568 | 19.918453 |
| 365 | 4.381639243 | 9.6201893 | 12.357084 | 15.09034 | 19.865796 |

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ 1.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΑΝΑ ΩΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ 21η ΙΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ  
ΑΠΟ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ 10 ΕΤΩΝ**

**21η ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ**

| Hours | tmax  | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|-------|-------|-----|---------------|
| 1     | 14.31 | 5.656 | 87  | 9.38928       |
| 2     | 14.31 | 5.656 | 92  | 9.10648       |
| 3     | 14.31 | 5.656 | 96  | 8.88024       |
| 4     | 14.31 | 5.656 | 99  | 8.71056       |
| 5     | 14.31 | 5.656 | 100 | 8.654         |
| 6     | 14.31 | 5.656 | 98  | 8.76712       |
| 7     | 14.31 | 5.656 | 93  | 9.04992       |
| 8     | 14.31 | 5.656 | 84  | 9.55896       |
| 9     | 14.31 | 5.656 | 71  | 10.29424      |
| 10    | 14.31 | 5.656 | 56  | 11.14264      |
| 11    | 14.31 | 5.656 | 39  | 12.10416      |
| 12    | 14.31 | 5.656 | 23  | 13.00912      |
| 13    | 14.31 | 5.656 | 11  | 13.68784      |
| 14    | 14.31 | 5.656 | 3   | 14.14032      |
| 15    | 14.31 | 5.656 | 0   | 14.31         |
| 16    | 14.31 | 5.656 | 3   | 14.14032      |
| 17    | 14.31 | 5.656 | 10  | 13.7444       |
| 18    | 14.31 | 5.656 | 21  | 13.12224      |
| 19    | 14.31 | 5.656 | 34  | 12.38696      |
| 20    | 14.31 | 5.656 | 47  | 11.65168      |
| 21    | 14.31 | 5.656 | 58  | 11.02952      |
| 22    | 14.31 | 5.656 | 68  | 10.46392      |
| 23    | 14.31 | 5.656 | 76  | 10.01144      |
| 24    | 14.31 | 5.656 | 82  | 9.67208       |

**21η ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ**

| Hours | tmax  | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|-------|-------|-----|---------------|
| 1     | 14.62 | 5.892 | 87  | 9.49396       |
| 2     | 14.62 | 5.892 | 92  | 9.19936       |
| 3     | 14.62 | 5.892 | 96  | 8.96368       |
| 4     | 14.62 | 5.892 | 99  | 8.78692       |
| 5     | 14.62 | 5.892 | 100 | 8.728         |
| 6     | 14.62 | 5.892 | 98  | 8.84584       |
| 7     | 14.62 | 5.892 | 93  | 9.14044       |
| 8     | 14.62 | 5.892 | 84  | 9.67072       |
| 9     | 14.62 | 5.892 | 71  | 10.43668      |
| 10    | 14.62 | 5.892 | 56  | 11.32048      |
| 11    | 14.62 | 5.892 | 39  | 12.32212      |
| 12    | 14.62 | 5.892 | 23  | 13.26484      |
| 13    | 14.62 | 5.892 | 11  | 13.97188      |
| 14    | 14.62 | 5.892 | 3   | 14.44324      |
| 15    | 14.62 | 5.892 | 0   | 14.62         |
| 16    | 14.62 | 5.892 | 3   | 14.44324      |
| 17    | 14.62 | 5.892 | 10  | 14.0308       |
| 18    | 14.62 | 5.892 | 21  | 13.38268      |
| 19    | 14.62 | 5.892 | 34  | 12.61672      |
| 20    | 14.62 | 5.892 | 47  | 11.85076      |

|    |       |       |    |          |
|----|-------|-------|----|----------|
| 21 | 14.62 | 5.892 | 58 | 11.20264 |
| 22 | 14.62 | 5.892 | 68 | 10.61344 |
| 23 | 14.62 | 5.892 | 76 | 10.14208 |
| 24 | 14.62 | 5.892 | 82 | 9.78856  |

**21η ΜΑΡΤΙΟΥ**

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 16.291 | 6.021 | 87  | 11.05273      |
| 2     | 16.291 | 6.021 | 92  | 10.75168      |
| 3     | 16.291 | 6.021 | 96  | 10.51084      |
| 4     | 16.291 | 6.021 | 99  | 10.33021      |
| 5     | 16.291 | 6.021 | 100 | 10.27         |
| 6     | 16.291 | 6.021 | 98  | 10.39042      |
| 7     | 16.291 | 6.021 | 93  | 10.69147      |
| 8     | 16.291 | 6.021 | 84  | 11.23336      |
| 9     | 16.291 | 6.021 | 71  | 12.01609      |
| 10    | 16.291 | 6.021 | 56  | 12.91924      |
| 11    | 16.291 | 6.021 | 39  | 13.94281      |
| 12    | 16.291 | 6.021 | 23  | 14.90617      |
| 13    | 16.291 | 6.021 | 11  | 15.62869      |
| 14    | 16.291 | 6.021 | 3   | 16.11037      |
| 15    | 16.291 | 6.021 | 0   | 16.291        |
| 16    | 16.291 | 6.021 | 3   | 16.11037      |
| 17    | 16.291 | 6.021 | 10  | 15.6889       |
| 18    | 16.291 | 6.021 | 21  | 15.02659      |
| 19    | 16.291 | 6.021 | 34  | 14.24386      |
| 20    | 16.291 | 6.021 | 47  | 13.46113      |
| 21    | 16.291 | 6.021 | 58  | 12.79882      |
| 22    | 16.291 | 6.021 | 68  | 12.19672      |
| 23    | 16.291 | 6.021 | 76  | 11.71504      |
| 24    | 16.291 | 6.021 | 82  | 11.35378      |

**21η ΑΠΡΙΛΙΟΥ**

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 19.215 | 6.033 | 87  | 13.96629      |
| 2     | 19.215 | 6.033 | 92  | 13.66464      |
| 3     | 19.215 | 6.033 | 96  | 13.42332      |
| 4     | 19.215 | 6.033 | 99  | 13.24233      |
| 5     | 19.215 | 6.033 | 100 | 13.182        |
| 6     | 19.215 | 6.033 | 98  | 13.30266      |
| 7     | 19.215 | 6.033 | 93  | 13.60431      |
| 8     | 19.215 | 6.033 | 84  | 14.14728      |
| 9     | 19.215 | 6.033 | 71  | 14.93157      |
| 10    | 19.215 | 6.033 | 56  | 15.83652      |
| 11    | 19.215 | 6.033 | 39  | 16.86213      |
| 12    | 19.215 | 6.033 | 23  | 17.82741      |
| 13    | 19.215 | 6.033 | 11  | 18.55137      |
| 14    | 19.215 | 6.033 | 3   | 19.03401      |
| 15    | 19.215 | 6.033 | 0   | 19.215        |
| 16    | 19.215 | 6.033 | 3   | 19.03401      |
| 17    | 19.215 | 6.033 | 10  | 18.6117       |
| 18    | 19.215 | 6.033 | 21  | 17.94807      |
| 19    | 19.215 | 6.033 | 34  | 17.16378      |
| 20    | 19.215 | 6.033 | 47  | 16.37949      |
| 21    | 19.215 | 6.033 | 58  | 15.71586      |

|    |        |       |    |          |
|----|--------|-------|----|----------|
| 22 | 19.215 | 6.033 | 68 | 15.11256 |
| 23 | 19.215 | 6.033 | 76 | 14.62992 |
| 24 | 19.215 | 6.033 | 82 | 14.26794 |

**21ηΜΑΙΟΥ**

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 22.372 | 5.912 | 87  | 17.22856      |
| 2     | 22.372 | 5.912 | 92  | 16.93296      |
| 3     | 22.372 | 5.912 | 96  | 16.69648      |
| 4     | 22.372 | 5.912 | 99  | 16.51912      |
| 5     | 22.372 | 5.912 | 100 | 16.46         |
| 6     | 22.372 | 5.912 | 98  | 16.57824      |
| 7     | 22.372 | 5.912 | 93  | 16.87384      |
| 8     | 22.372 | 5.912 | 84  | 17.40592      |
| 9     | 22.372 | 5.912 | 71  | 18.17448      |
| 10    | 22.372 | 5.912 | 56  | 19.06128      |
| 11    | 22.372 | 5.912 | 39  | 20.06632      |
| 12    | 22.372 | 5.912 | 23  | 21.01224      |
| 13    | 22.372 | 5.912 | 11  | 21.72168      |
| 14    | 22.372 | 5.912 | 3   | 22.19464      |
| 15    | 22.372 | 5.912 | 0   | 22.372        |
| 16    | 22.372 | 5.912 | 3   | 22.19464      |
| 17    | 22.372 | 5.912 | 10  | 21.7808       |
| 18    | 22.372 | 5.912 | 21  | 21.13048      |
| 19    | 22.372 | 5.912 | 34  | 20.36192      |
| 20    | 22.372 | 5.912 | 47  | 19.59336      |
| 21    | 22.372 | 5.912 | 58  | 18.94304      |
| 22    | 22.372 | 5.912 | 68  | 18.35184      |
| 23    | 22.372 | 5.912 | 76  | 17.87888      |
| 24    | 22.372 | 5.912 | 82  | 17.52416      |

**21ηΙΟΥΝΙΟΥ**

| Hours | tmax  | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|-------|-------|-----|---------------|
| 1     | 25.09 | 5.684 | 87  | 20.14492      |
| 2     | 25.09 | 5.684 | 92  | 19.86072      |
| 3     | 25.09 | 5.684 | 96  | 19.63336      |
| 4     | 25.09 | 5.684 | 99  | 19.46284      |
| 5     | 25.09 | 5.684 | 100 | 19.406        |
| 6     | 25.09 | 5.684 | 98  | 19.51968      |
| 7     | 25.09 | 5.684 | 93  | 19.80388      |
| 8     | 25.09 | 5.684 | 84  | 20.31544      |
| 9     | 25.09 | 5.684 | 71  | 21.05436      |
| 10    | 25.09 | 5.684 | 56  | 21.90696      |
| 11    | 25.09 | 5.684 | 39  | 22.87324      |
| 12    | 25.09 | 5.684 | 23  | 23.78268      |
| 13    | 25.09 | 5.684 | 11  | 24.46476      |
| 14    | 25.09 | 5.684 | 3   | 24.91948      |
| 15    | 25.09 | 5.684 | 0   | 25.09         |
| 16    | 25.09 | 5.684 | 3   | 24.91948      |
| 17    | 25.09 | 5.684 | 10  | 24.5216       |
| 18    | 25.09 | 5.684 | 21  | 23.89636      |
| 19    | 25.09 | 5.684 | 34  | 23.15744      |
| 20    | 25.09 | 5.684 | 47  | 22.41852      |

|    |       |       |    |          |
|----|-------|-------|----|----------|
| 21 | 25.09 | 5.684 | 58 | 21.79328 |
| 22 | 25.09 | 5.684 | 68 | 21.22488 |
| 23 | 25.09 | 5.684 | 76 | 20.77016 |
| 24 | 25.09 | 5.684 | 82 | 20.42912 |

**21η ΙΟΥΛΙΟΥ**

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 26.488 | 5.421 | 87  | 21.77173      |
| 2     | 26.488 | 5.421 | 92  | 21.50068      |
| 3     | 26.488 | 5.421 | 96  | 21.28384      |
| 4     | 26.488 | 5.421 | 99  | 21.12121      |
| 5     | 26.488 | 5.421 | 100 | 21.067        |
| 6     | 26.488 | 5.421 | 98  | 21.17542      |
| 7     | 26.488 | 5.421 | 93  | 21.44647      |
| 8     | 26.488 | 5.421 | 84  | 21.93436      |
| 9     | 26.488 | 5.421 | 71  | 22.63909      |
| 10    | 26.488 | 5.421 | 56  | 23.45224      |
| 11    | 26.488 | 5.421 | 39  | 24.37381      |
| 12    | 26.488 | 5.421 | 23  | 25.24117      |
| 13    | 26.488 | 5.421 | 11  | 25.89169      |
| 14    | 26.488 | 5.421 | 3   | 26.32537      |
| 15    | 26.488 | 5.421 | 0   | 26.488        |
| 16    | 26.488 | 5.421 | 3   | 26.32537      |
| 17    | 26.488 | 5.421 | 10  | 25.9459       |
| 18    | 26.488 | 5.421 | 21  | 25.34959      |
| 19    | 26.488 | 5.421 | 34  | 24.64486      |
| 20    | 26.488 | 5.421 | 47  | 23.94013      |
| 21    | 26.488 | 5.421 | 58  | 23.34382      |
| 22    | 26.488 | 5.421 | 68  | 22.80172      |
| 23    | 26.488 | 5.421 | 76  | 22.36804      |
| 24    | 26.488 | 5.421 | 82  | 22.04278      |

**21η ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ**

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 26.271 | 5.182 | 87  | 21.76266      |
| 2     | 26.271 | 5.182 | 92  | 21.50356      |
| 3     | 26.271 | 5.182 | 96  | 21.29628      |
| 4     | 26.271 | 5.182 | 99  | 21.14082      |
| 5     | 26.271 | 5.182 | 100 | 21.089        |
| 6     | 26.271 | 5.182 | 98  | 21.19264      |
| 7     | 26.271 | 5.182 | 93  | 21.45174      |
| 8     | 26.271 | 5.182 | 84  | 21.91812      |
| 9     | 26.271 | 5.182 | 71  | 22.59178      |
| 10    | 26.271 | 5.182 | 56  | 23.36908      |
| 11    | 26.271 | 5.182 | 39  | 24.25002      |
| 12    | 26.271 | 5.182 | 23  | 25.07914      |
| 13    | 26.271 | 5.182 | 11  | 25.70098      |
| 14    | 26.271 | 5.182 | 3   | 26.11554      |
| 15    | 26.271 | 5.182 | 0   | 26.271        |
| 16    | 26.271 | 5.182 | 3   | 26.11554      |
| 17    | 26.271 | 5.182 | 10  | 25.7528       |
| 18    | 26.271 | 5.182 | 21  | 25.18278      |
| 19    | 26.271 | 5.182 | 34  | 24.50912      |
| 20    | 26.271 | 5.182 | 47  | 23.83546      |



|    |        |       |    |          |
|----|--------|-------|----|----------|
| 21 | 26.271 | 5.182 | 58 | 23.26544 |
| 22 | 26.271 | 5.182 | 68 | 22.74724 |
| 23 | 26.271 | 5.182 | 76 | 22.33268 |
| 24 | 26.271 | 5.182 | 82 | 22.02176 |

### 21η ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 24.426 | 5.039 | 87  | 20.04207      |
| 2     | 24.426 | 5.039 | 92  | 19.79012      |
| 3     | 24.426 | 5.039 | 96  | 19.58856      |
| 4     | 24.426 | 5.039 | 99  | 19.43739      |
| 5     | 24.426 | 5.039 | 100 | 19.387        |
| 6     | 24.426 | 5.039 | 98  | 19.48778      |
| 7     | 24.426 | 5.039 | 93  | 19.73973      |
| 8     | 24.426 | 5.039 | 84  | 20.19324      |
| 9     | 24.426 | 5.039 | 71  | 20.84831      |
| 10    | 24.426 | 5.039 | 56  | 21.60416      |
| 11    | 24.426 | 5.039 | 39  | 22.46079      |
| 12    | 24.426 | 5.039 | 23  | 23.26703      |
| 13    | 24.426 | 5.039 | 11  | 23.87171      |
| 14    | 24.426 | 5.039 | 3   | 24.27483      |
| 15    | 24.426 | 5.039 | 0   | 24.426        |
| 16    | 24.426 | 5.039 | 3   | 24.27483      |
| 17    | 24.426 | 5.039 | 10  | 23.9221       |
| 18    | 24.426 | 5.039 | 21  | 23.36781      |
| 19    | 24.426 | 5.039 | 34  | 22.71274      |
| 20    | 24.426 | 5.039 | 47  | 22.05767      |
| 21    | 24.426 | 5.039 | 58  | 21.50338      |
| 22    | 24.426 | 5.039 | 68  | 20.99948      |
| 23    | 24.426 | 5.039 | 76  | 20.59636      |
| 24    | 24.426 | 5.039 | 82  | 20.29402      |

### 21η ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 21.572 | 5.032 | 87  | 17.19416      |
| 2     | 21.572 | 5.032 | 92  | 16.94256      |
| 3     | 21.572 | 5.032 | 96  | 16.74128      |
| 4     | 21.572 | 5.032 | 99  | 16.59032      |
| 5     | 21.572 | 5.032 | 100 | 16.54         |
| 6     | 21.572 | 5.032 | 98  | 16.64064      |
| 7     | 21.572 | 5.032 | 93  | 16.89224      |
| 8     | 21.572 | 5.032 | 84  | 17.34512      |
| 9     | 21.572 | 5.032 | 71  | 17.99928      |
| 10    | 21.572 | 5.032 | 56  | 18.75408      |
| 11    | 21.572 | 5.032 | 39  | 19.60952      |
| 12    | 21.572 | 5.032 | 23  | 20.41464      |
| 13    | 21.572 | 5.032 | 11  | 21.01848      |
| 14    | 21.572 | 5.032 | 3   | 21.42104      |
| 15    | 21.572 | 5.032 | 0   | 21.572        |
| 16    | 21.572 | 5.032 | 3   | 21.42104      |
| 17    | 21.572 | 5.032 | 10  | 21.0688       |
| 18    | 21.572 | 5.032 | 21  | 20.51528      |
| 19    | 21.572 | 5.032 | 34  | 19.86112      |
| 20    | 21.572 | 5.032 | 47  | 19.20696      |

|    |        |       |    |          |
|----|--------|-------|----|----------|
| 21 | 21.572 | 5.032 | 58 | 18.65344 |
| 22 | 21.572 | 5.032 | 68 | 18.15024 |
| 23 | 21.572 | 5.032 | 76 | 17.74768 |
| 24 | 21.572 | 5.032 | 82 | 17.44576 |

**21η NOEMBPIOY**

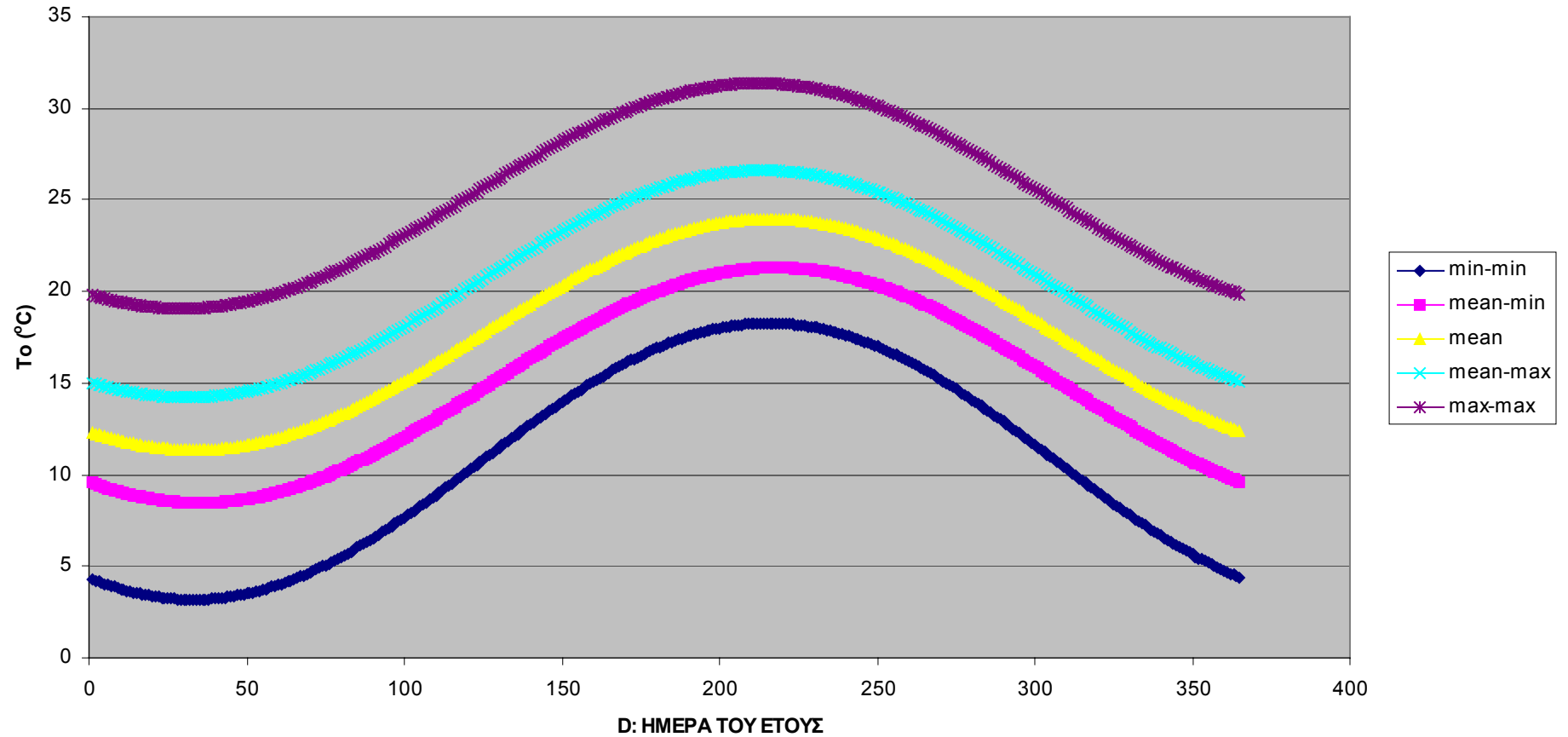
| Hours | tmax   | D.R. | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|------|-----|---------------|
| 1     | 18.316 | 5.16 | 87  | 13.8268       |
| 2     | 18.316 | 5.16 | 92  | 13.5688       |
| 3     | 18.316 | 5.16 | 96  | 13.3624       |
| 4     | 18.316 | 5.16 | 99  | 13.2076       |
| 5     | 18.316 | 5.16 | 100 | 13.156        |
| 6     | 18.316 | 5.16 | 98  | 13.2592       |
| 7     | 18.316 | 5.16 | 93  | 13.5172       |
| 8     | 18.316 | 5.16 | 84  | 13.9816       |
| 9     | 18.316 | 5.16 | 71  | 14.6524       |
| 10    | 18.316 | 5.16 | 56  | 15.4264       |
| 11    | 18.316 | 5.16 | 39  | 16.3036       |
| 12    | 18.316 | 5.16 | 23  | 17.1292       |
| 13    | 18.316 | 5.16 | 11  | 17.7484       |
| 14    | 18.316 | 5.16 | 3   | 18.1612       |
| 15    | 18.316 | 5.16 | 0   | 18.316        |
| 16    | 18.316 | 5.16 | 3   | 18.1612       |
| 17    | 18.316 | 5.16 | 10  | 17.8          |
| 18    | 18.316 | 5.16 | 21  | 17.2324       |
| 19    | 18.316 | 5.16 | 34  | 16.5616       |
| 20    | 18.316 | 5.16 | 47  | 15.8908       |
| 21    | 18.316 | 5.16 | 58  | 15.3232       |
| 22    | 18.316 | 5.16 | 68  | 14.8072       |
| 23    | 18.316 | 5.16 | 76  | 14.3944       |
| 24    | 18.316 | 5.16 | 82  | 14.0848       |

**21η ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ**

| Hours | tmax   | D.R.  | %   | to=tmax-%D.R. |
|-------|--------|-------|-----|---------------|
| 1     | 15.712 | 5.384 | 87  | 11.02792      |
| 2     | 15.712 | 5.384 | 92  | 10.75872      |
| 3     | 15.712 | 5.384 | 96  | 10.54336      |
| 4     | 15.712 | 5.384 | 99  | 10.38184      |
| 5     | 15.712 | 5.384 | 100 | 10.328        |
| 6     | 15.712 | 5.384 | 98  | 10.43568      |
| 7     | 15.712 | 5.384 | 93  | 10.70488      |
| 8     | 15.712 | 5.384 | 84  | 11.18944      |
| 9     | 15.712 | 5.384 | 71  | 11.88936      |
| 10    | 15.712 | 5.384 | 56  | 12.69696      |
| 11    | 15.712 | 5.384 | 39  | 13.61224      |
| 12    | 15.712 | 5.384 | 23  | 14.47368      |
| 13    | 15.712 | 5.384 | 11  | 15.11976      |
| 14    | 15.712 | 5.384 | 3   | 15.55048      |
| 15    | 15.712 | 5.384 | 0   | 15.712        |
| 16    | 15.712 | 5.384 | 3   | 15.55048      |
| 17    | 15.712 | 5.384 | 10  | 15.1736       |
| 18    | 15.712 | 5.384 | 21  | 14.58136      |
| 19    | 15.712 | 5.384 | 34  | 13.88144      |
| 20    | 15.712 | 5.384 | 47  | 13.18152      |

|    |        |       |    |                 |
|----|--------|-------|----|-----------------|
| 21 | 15.712 | 5.384 | 58 | <b>12.58928</b> |
| 22 | 15.712 | 5.384 | 68 | <b>12.05088</b> |
| 23 | 15.712 | 5.384 | 76 | <b>11.62016</b> |
| 24 | 15.712 | 5.384 | 82 | <b>11.29712</b> |

**ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΙ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ  
ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ**

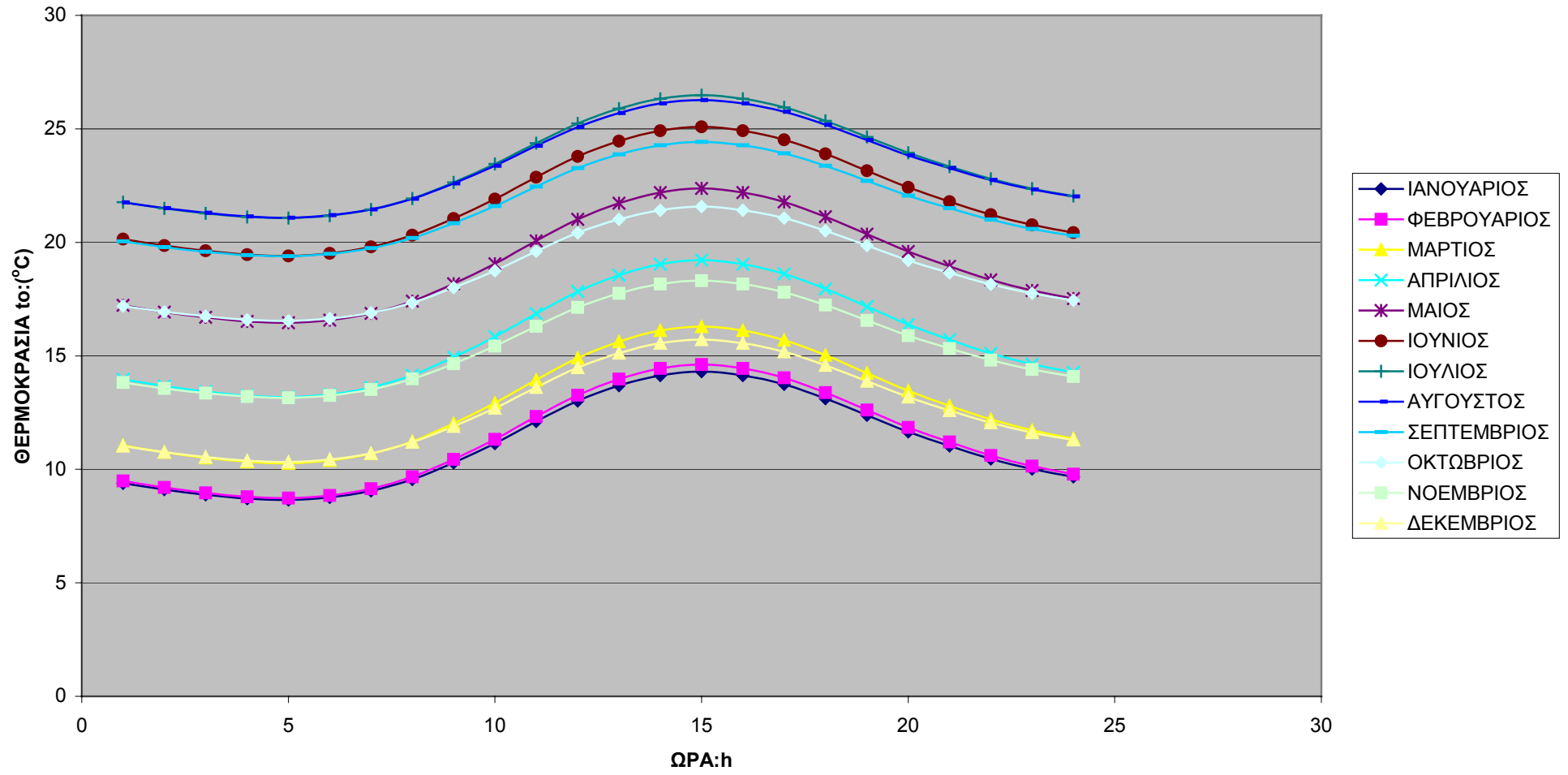


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1. ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΙ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ**

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ 1.3. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΟΣ ΑΝΑ ΩΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΤΟΥ ΜΗΝΟΣ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ**

| ΩΡΕΣ | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ  | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ    | ΙΟΥΝΙΟΣ  | ΙΟΥΛΙΟΣ  | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ |
|------|------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|
| 1    | 9.38928    | 9.49396     | 11.05273 | 13.96629 | 17.22856 | 20.14492 | 21.77173 | 21.76266  | 20.04207    | 17.19416  | 13.8268   | 11.02792   |
| 2    | 9.10648    | 9.19936     | 10.75168 | 13.66464 | 16.93296 | 19.86072 | 21.50068 | 21.50356  | 19.79012    | 16.94256  | 13.5688   | 10.75872   |
| 3    | 8.88024    | 8.96368     | 10.51084 | 13.42332 | 16.69648 | 19.63336 | 21.28384 | 21.29628  | 19.58856    | 16.74128  | 13.3624   | 10.54336   |
| 4    | 8.71056    | 8.78692     | 10.33021 | 13.24233 | 16.51912 | 19.46284 | 21.12121 | 21.14082  | 19.43739    | 16.59032  | 13.2076   | 10.38184   |
| 5    | 8.654      | 8.728       | 10.27    | 13.182   | 16.46    | 19.406   | 21.067   | 21.089    | 19.387      | 16.54     | 13.156    | 10.328     |
| 6    | 8.76712    | 8.84584     | 10.39042 | 13.30266 | 16.57824 | 19.51968 | 21.17542 | 21.19264  | 19.48778    | 16.64064  | 13.2592   | 10.43568   |
| 7    | 9.04992    | 9.14044     | 10.69147 | 13.60431 | 16.87384 | 19.80388 | 21.44647 | 21.45174  | 19.73973    | 16.89224  | 13.5172   | 10.70488   |
| 8    | 9.55896    | 9.67072     | 11.23336 | 14.14728 | 17.40592 | 20.31544 | 21.93436 | 21.91812  | 20.19324    | 17.34512  | 13.9816   | 11.18944   |
| 9    | 10.29424   | 10.43668    | 12.01609 | 14.93157 | 18.17448 | 21.05436 | 22.63909 | 22.59178  | 20.84831    | 17.99928  | 14.6524   | 11.88936   |
| 10   | 11.14264   | 11.32048    | 12.91924 | 15.83652 | 19.06128 | 21.90696 | 23.45224 | 23.36908  | 21.60416    | 18.75408  | 15.4264   | 12.69696   |
| 11   | 12.10416   | 12.32212    | 13.94281 | 16.86213 | 20.06632 | 22.87324 | 24.37381 | 24.25002  | 22.46079    | 19.60952  | 16.3036   | 13.61224   |
| 12   | 13.00912   | 13.26484    | 14.90617 | 17.82741 | 21.01224 | 23.78268 | 25.24117 | 25.07914  | 23.26703    | 20.41464  | 17.1292   | 14.47368   |
| 13   | 13.68784   | 13.97188    | 15.62869 | 18.55137 | 21.72168 | 24.46476 | 25.89169 | 25.70098  | 23.87171    | 21.01848  | 17.7484   | 15.11976   |
| 14   | 14.14032   | 14.44324    | 16.11037 | 19.03401 | 22.19464 | 24.91948 | 26.32537 | 26.11554  | 24.27483    | 21.42104  | 18.1612   | 15.55048   |
| 15   | 14.31      | 14.62       | 16.291   | 19.215   | 22.372   | 25.09    | 26.488   | 26.271    | 24.426      | 21.572    | 18.316    | 15.712     |
| 16   | 14.14032   | 14.44324    | 16.11037 | 19.03401 | 22.19464 | 24.91948 | 26.32537 | 26.11554  | 24.27483    | 21.42104  | 18.1612   | 15.55048   |
| 17   | 13.7444    | 14.0308     | 15.6889  | 18.6117  | 21.7808  | 24.5216  | 25.9459  | 25.7528   | 23.9221     | 21.0688   | 17.8      | 15.1736    |
| 18   | 13.12224   | 13.38268    | 15.02659 | 17.94807 | 21.13048 | 23.89636 | 25.34959 | 25.18278  | 23.36781    | 20.51528  | 17.2324   | 14.58136   |
| 19   | 12.38696   | 12.61672    | 14.24386 | 17.16378 | 20.36192 | 23.15744 | 24.64486 | 24.50912  | 22.71274    | 19.86112  | 16.5616   | 13.88144   |
| 20   | 11.65168   | 11.85076    | 13.46113 | 16.37949 | 19.59336 | 22.41852 | 23.94013 | 23.83546  | 22.05767    | 19.20696  | 15.8908   | 13.18152   |
| 21   | 11.02952   | 11.20264    | 12.79882 | 15.71586 | 18.94304 | 21.79328 | 23.34382 | 23.26544  | 21.50338    | 18.65344  | 15.3232   | 12.58928   |
| 22   | 10.46392   | 10.61344    | 12.19672 | 15.11256 | 18.35184 | 21.22488 | 22.80172 | 22.74724  | 20.99948    | 18.15024  | 14.8072   | 12.05088   |
| 23   | 10.01144   | 10.14208    | 11.71504 | 14.62992 | 17.87888 | 20.77016 | 22.36804 | 22.33268  | 20.59636    | 17.74768  | 14.3944   | 11.62016   |
| 24   | 9.67208    | 9.78856     | 11.35378 | 14.26794 | 17.52416 | 20.42912 | 22.04278 | 22.02176  | 20.29402    | 17.44576  | 14.0848   | 11.29712   |

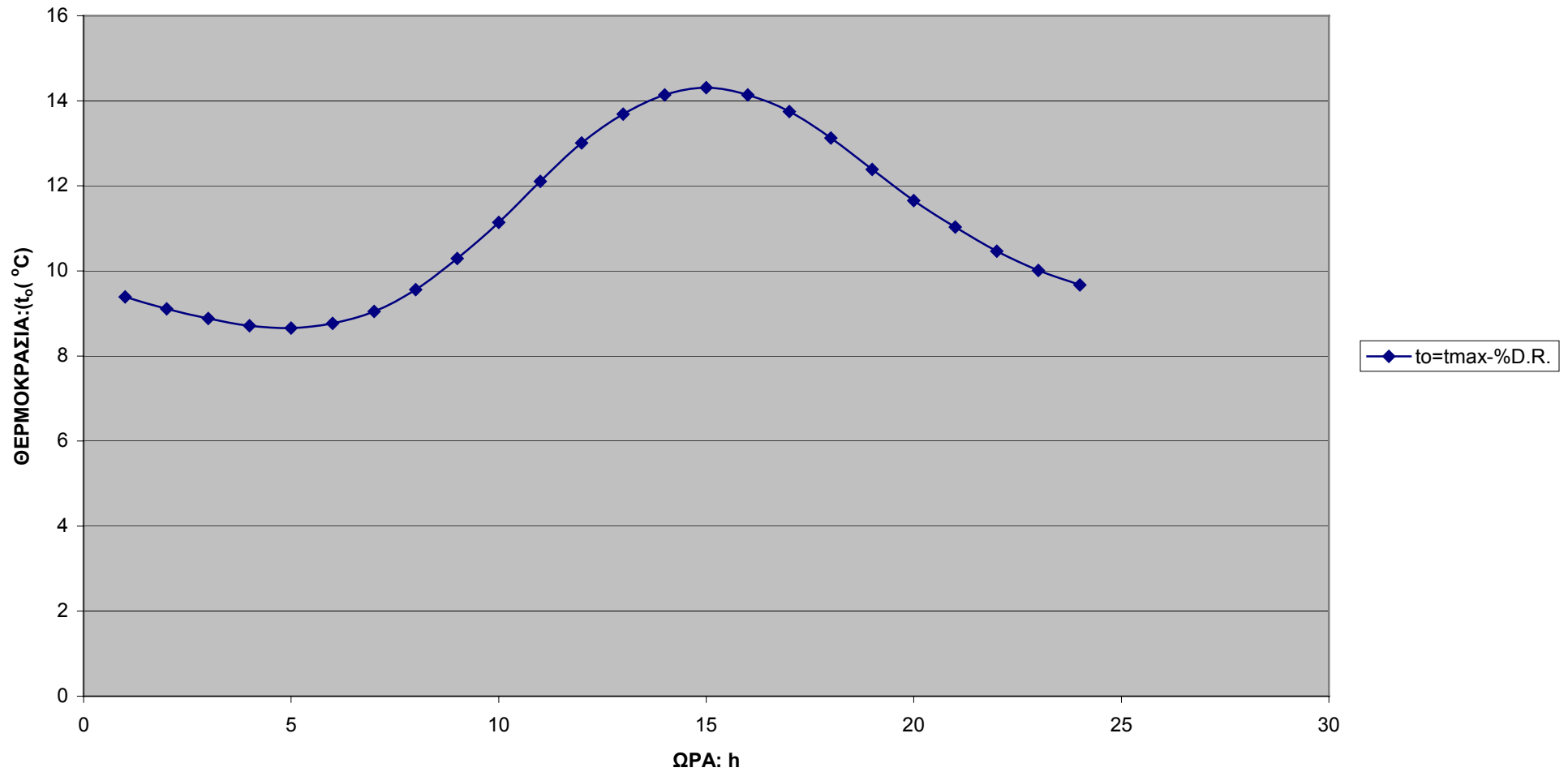
**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΗΜΕΡΑ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΟΥΛΙΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ.**

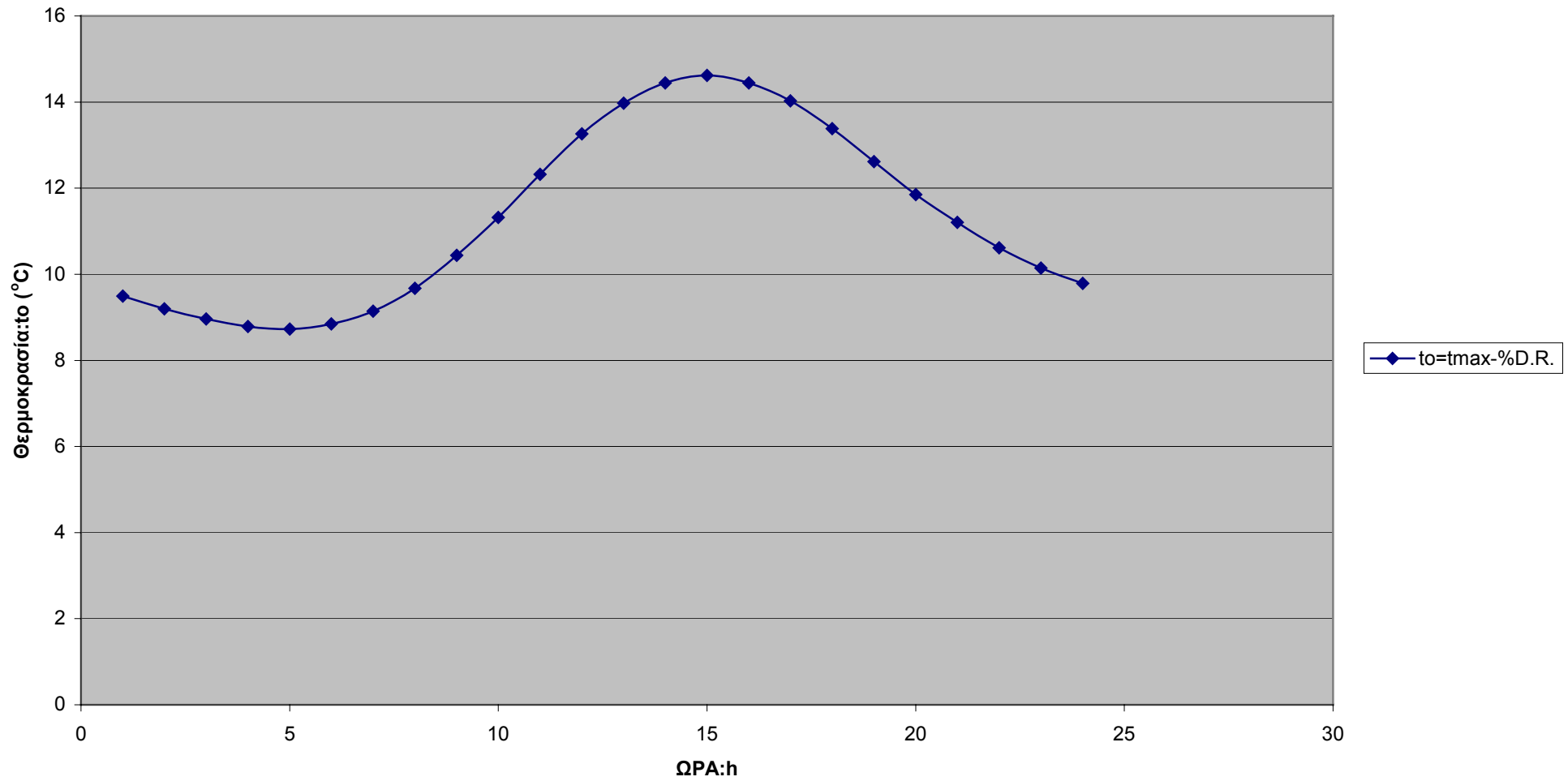


ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ



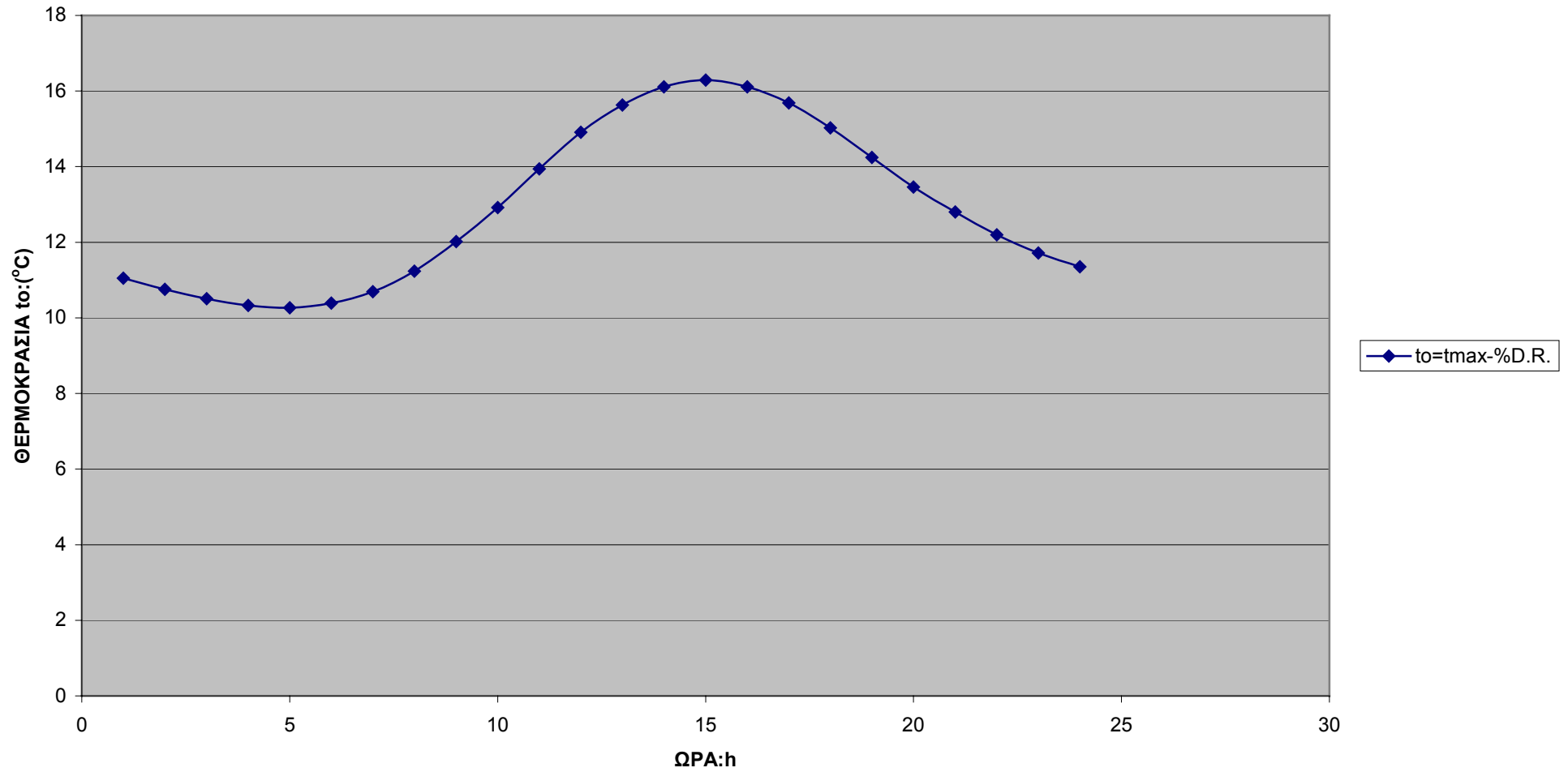
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ



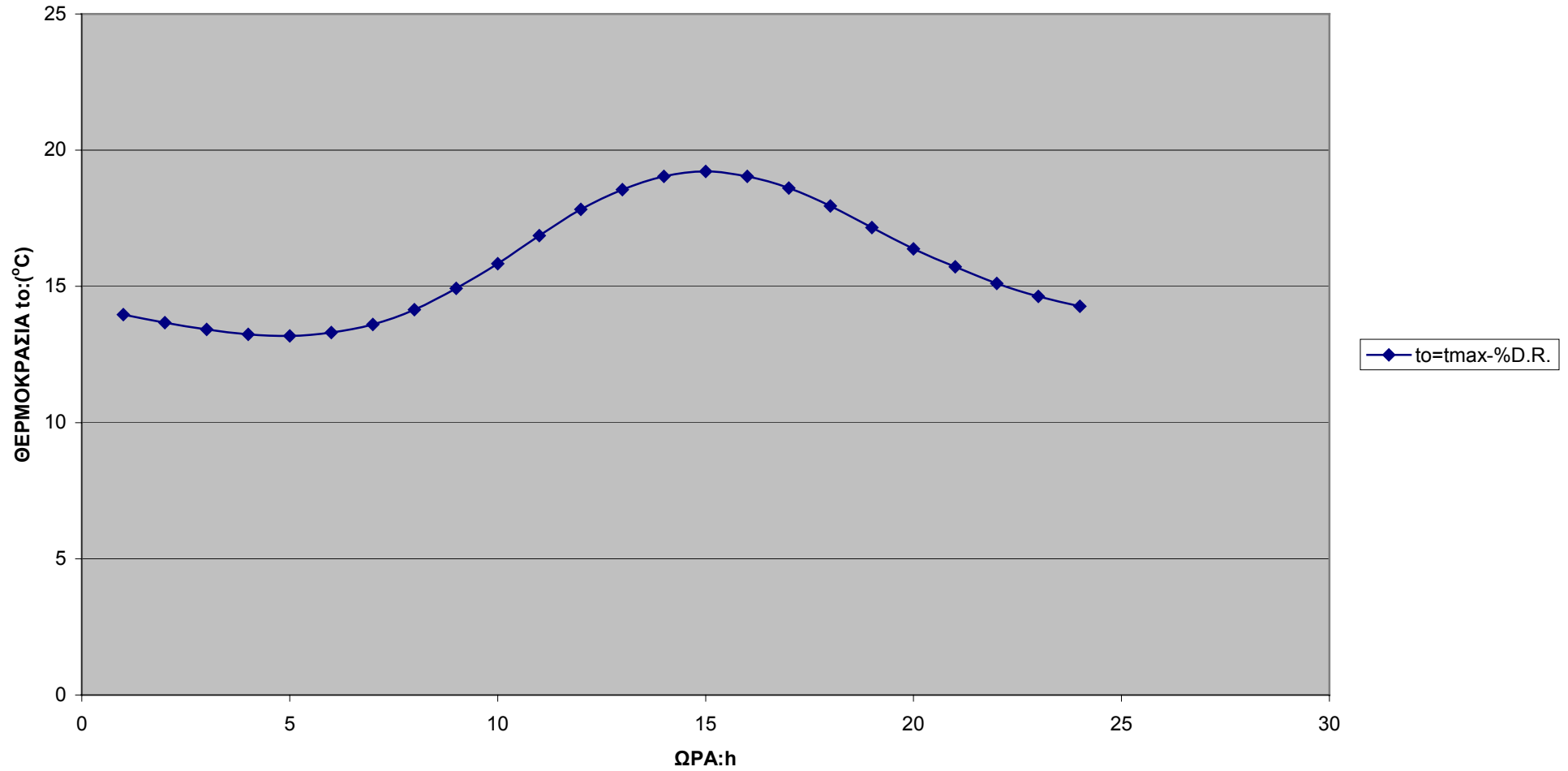
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΜΑΡΤΙΟΥ



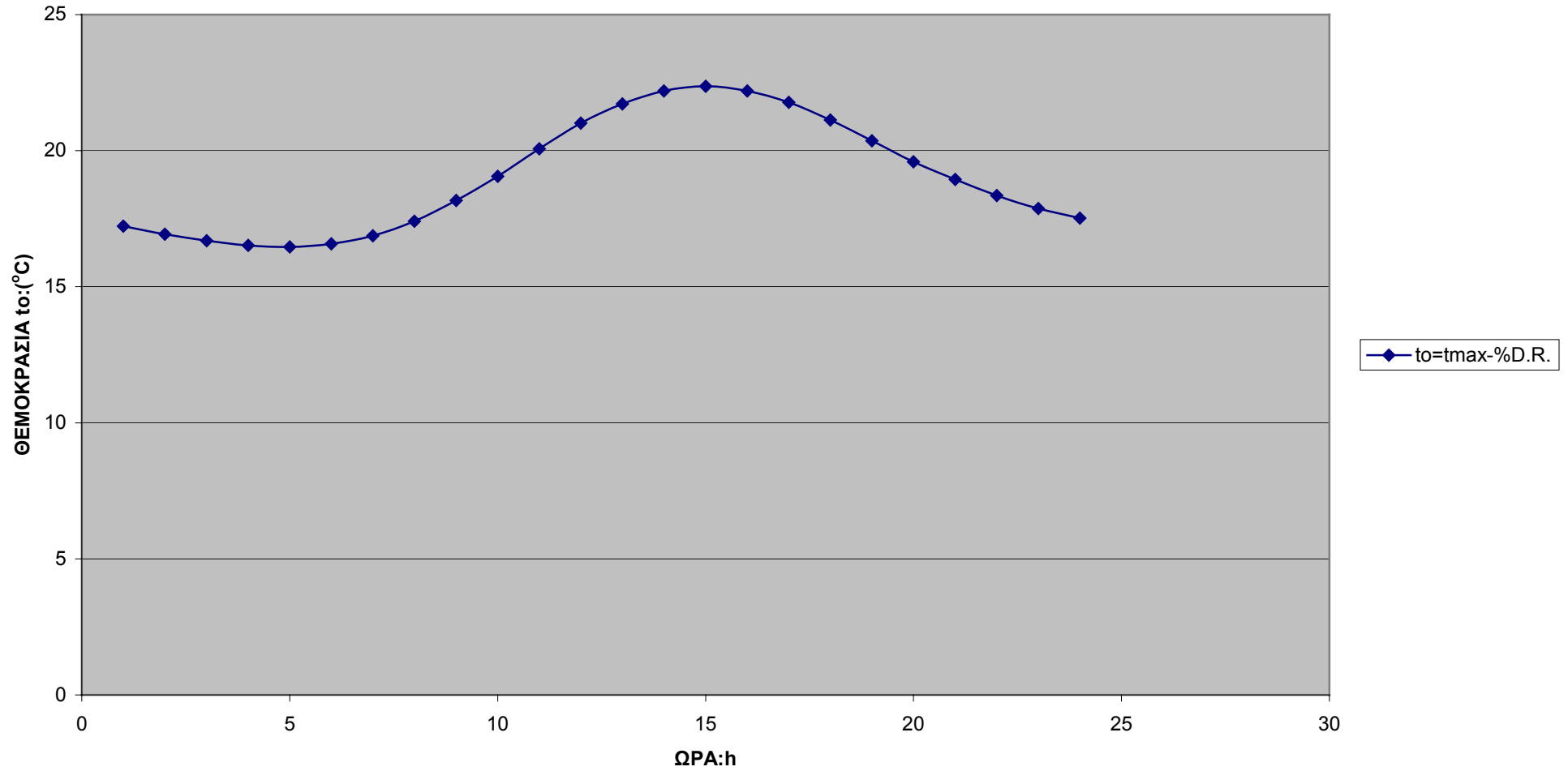
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΜΑΡΤΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΑΠΡΙΛΙΟΥ

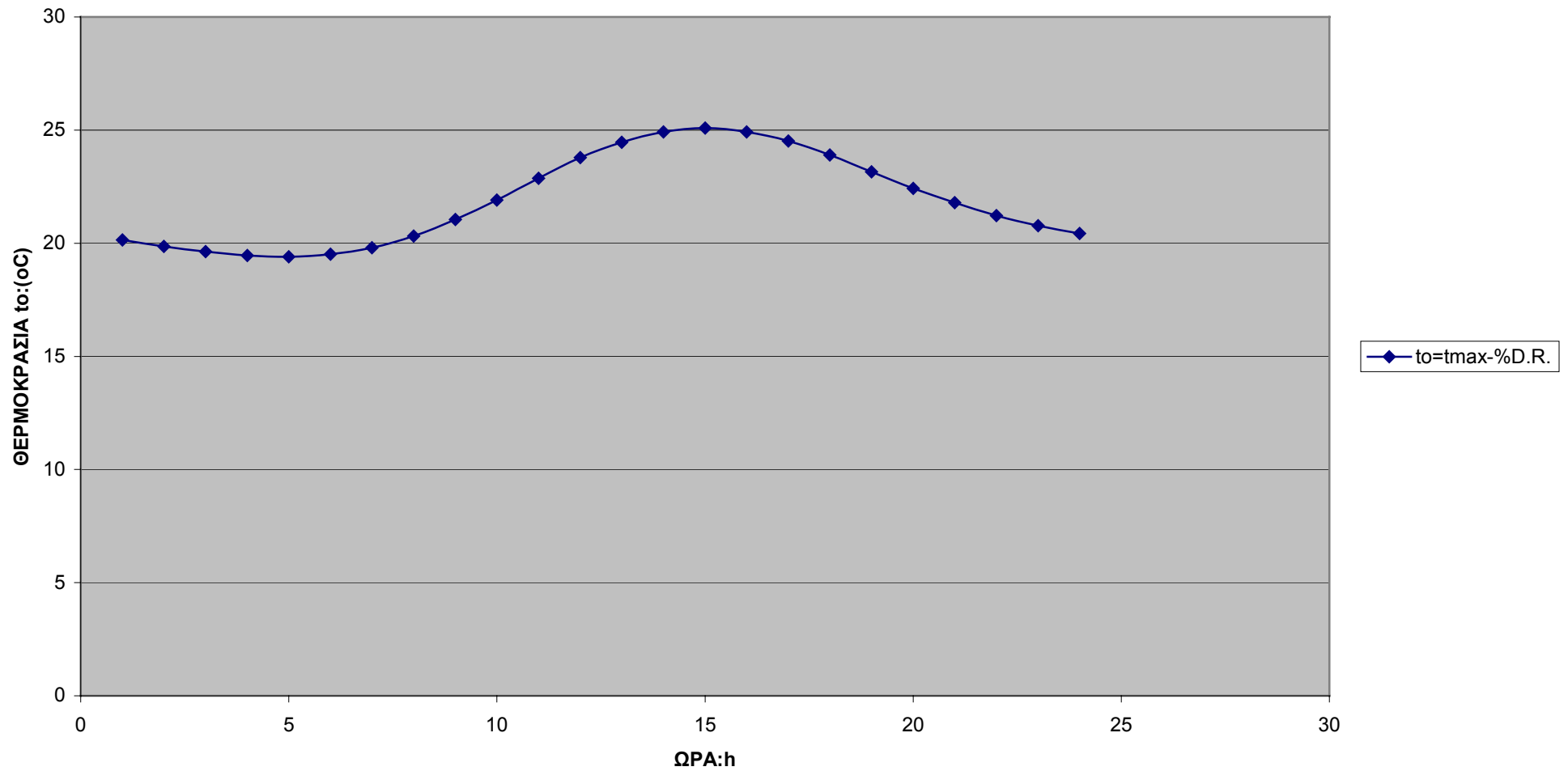


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΑΠΡΙΛΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21η ΜΑΙΟΥ



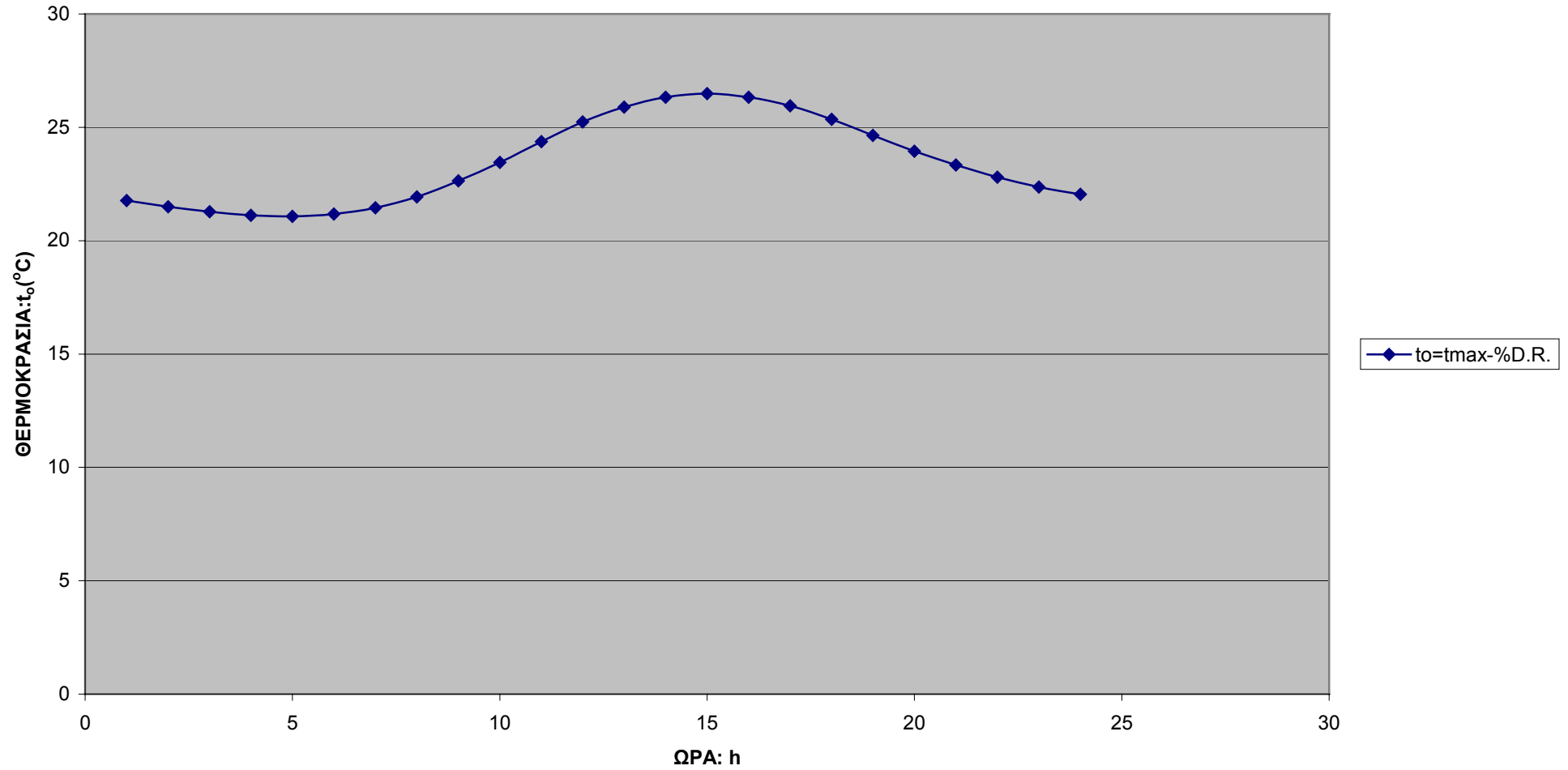
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΟΥΝΙΟΥ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΟΥΝΙΟΥ.

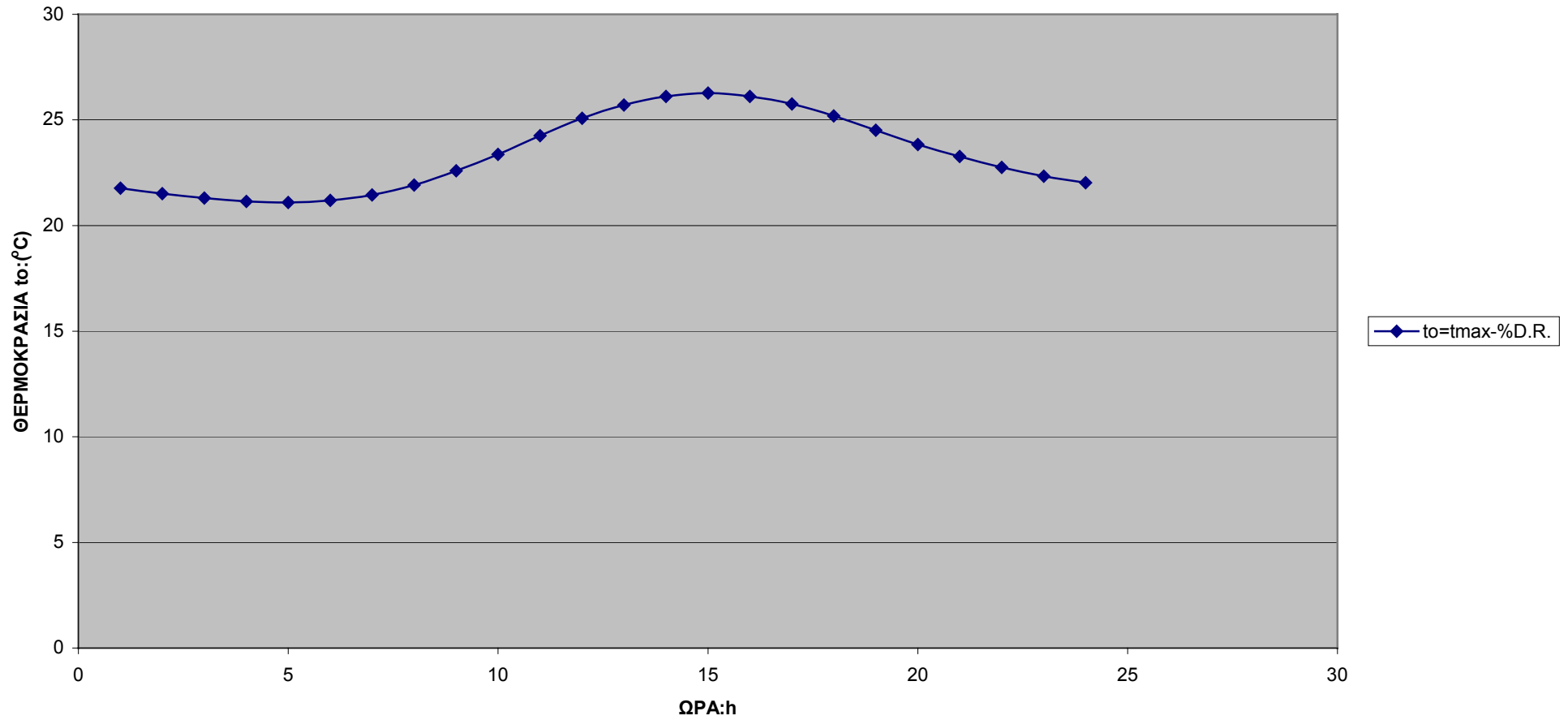


ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΟΥΛΙΟΥ



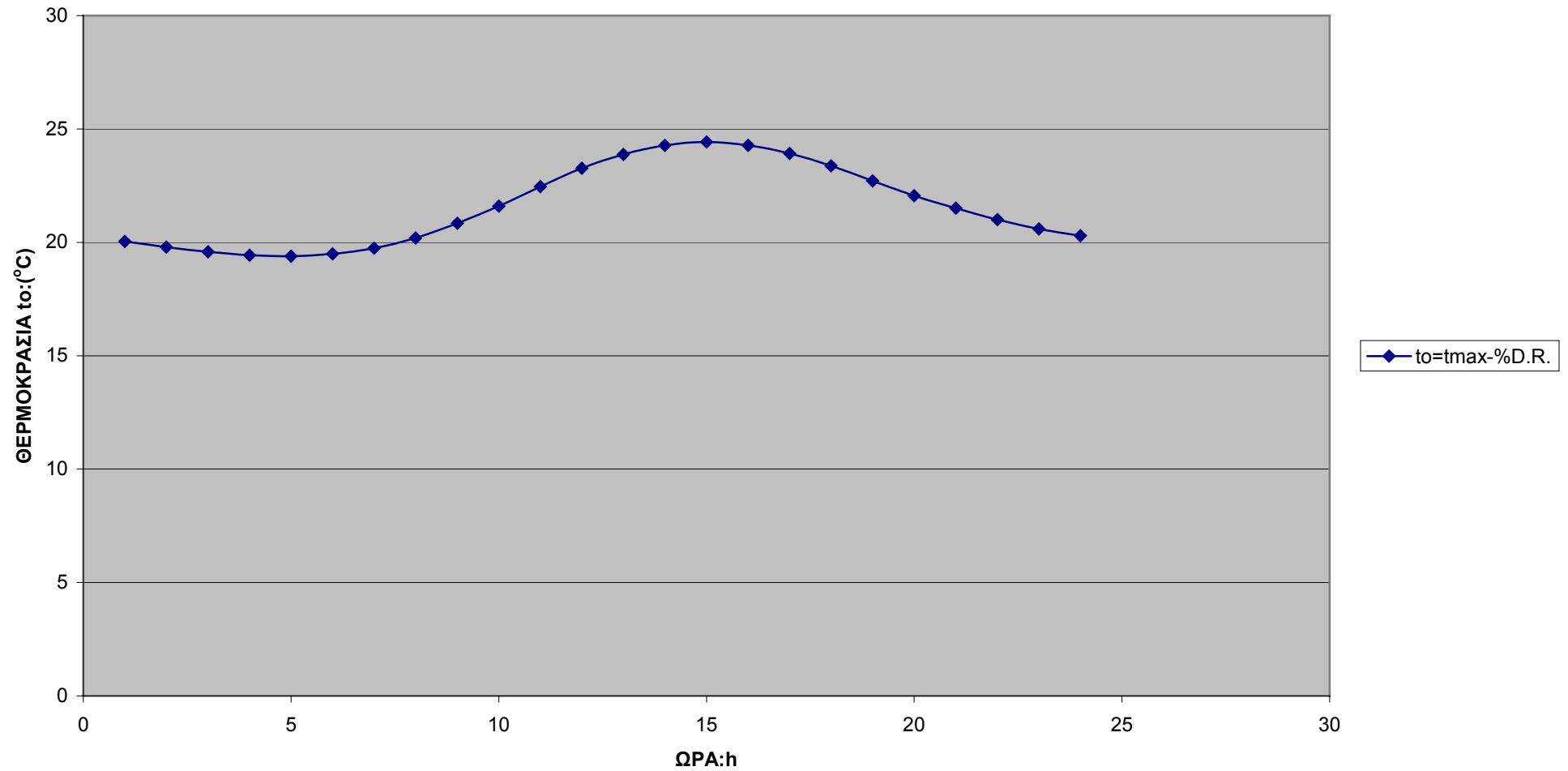
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΙΟΥΛΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ



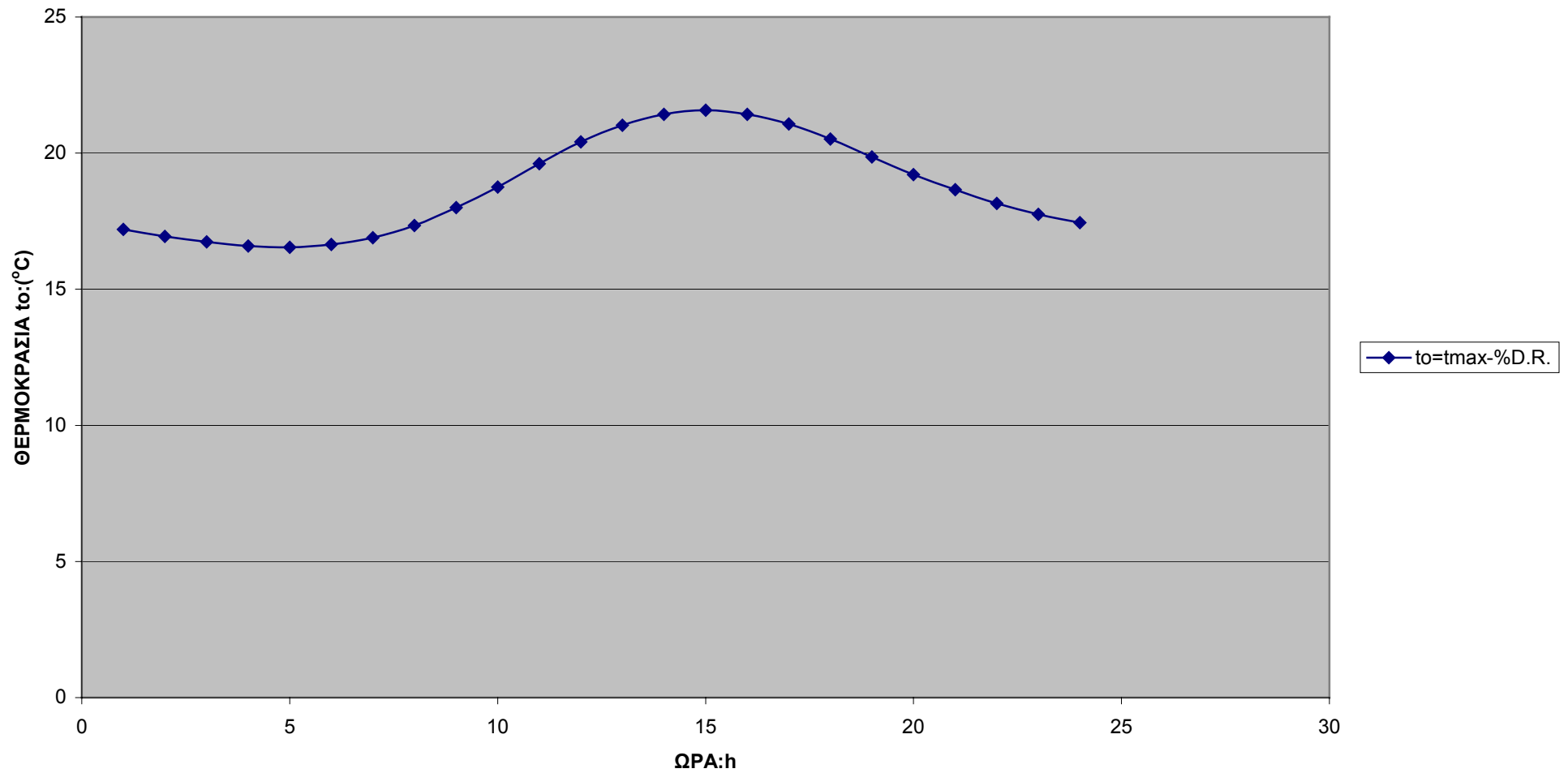
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ



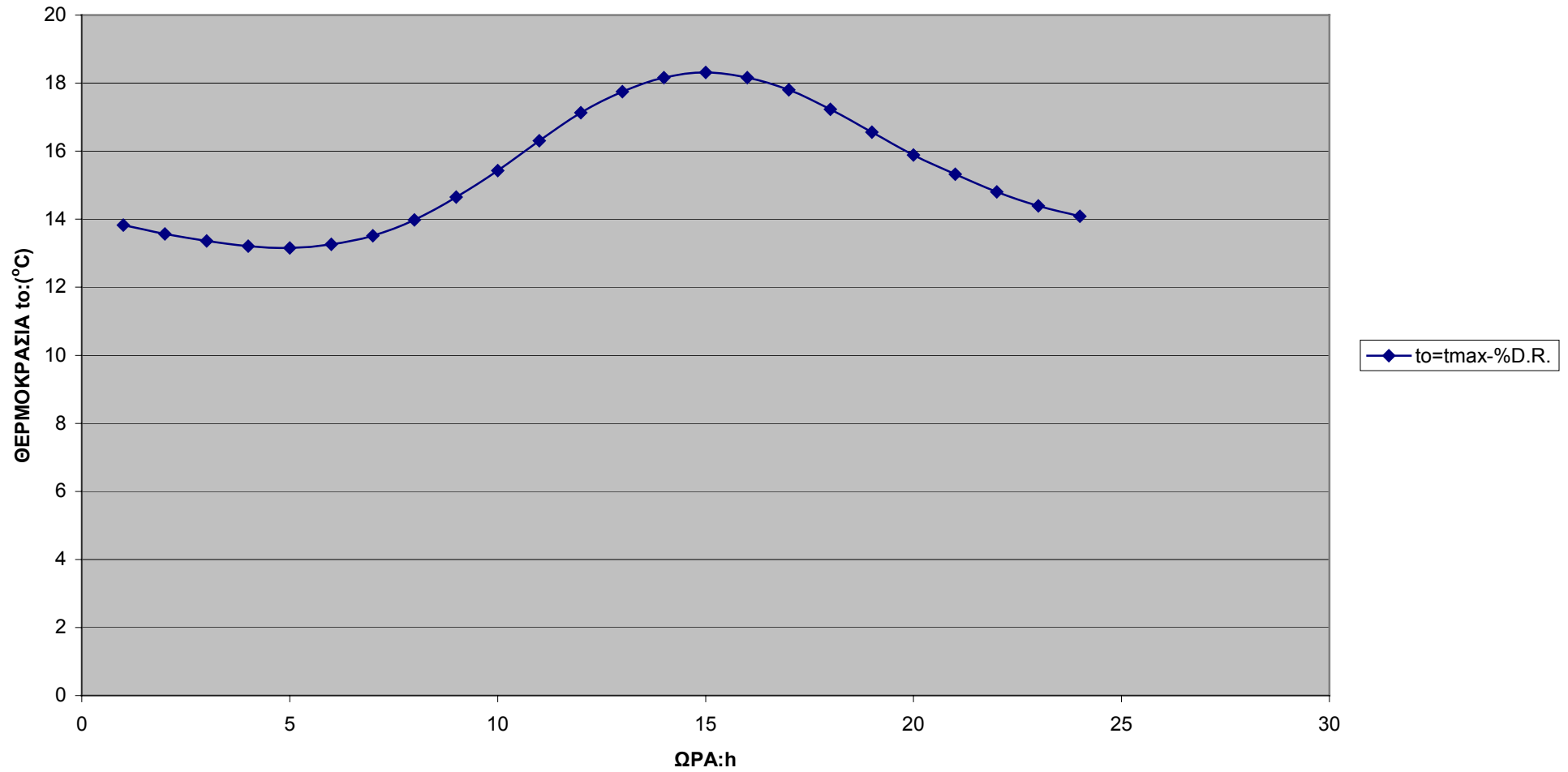
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ



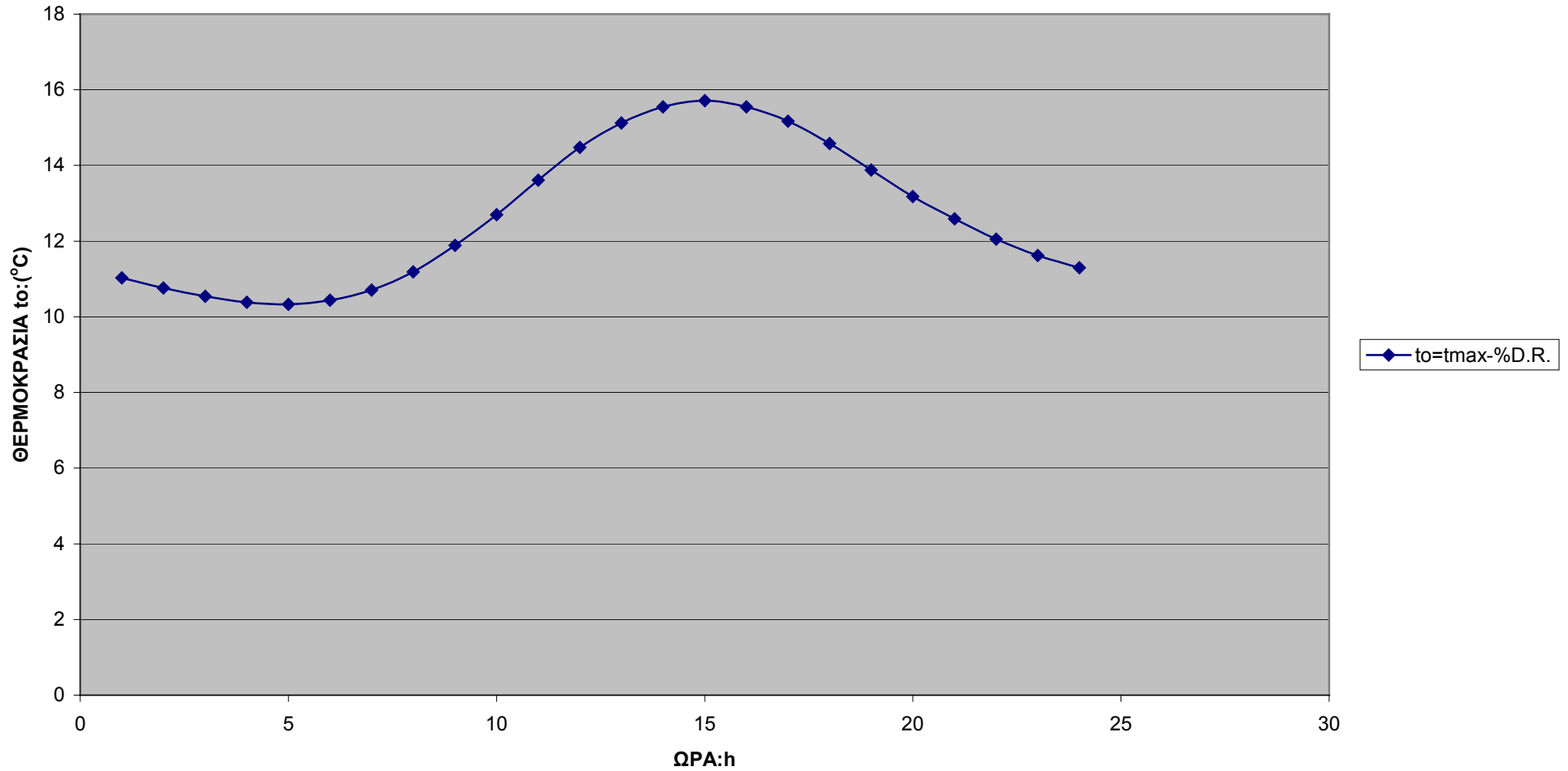
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ.

**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ ΚΑΙ ΤΗΝ 21<sup>η</sup> ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ.**





**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ 1.4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΘΗΝΑ ΑΠΟ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ 10 ΕΤΩΝ**

| ΠΟΛΗ         | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ | min-min | mean-min | mean    | mean-max | max-max |
|--------------|-------------|---------|----------|---------|----------|---------|
| <b>ΑΘΗΝΑ</b> | a           | 7.023   | 12.527   | 17.521  | 22.503   | 28.675  |
|              | b           | -9.193  | -7.993   | -9.107  | -10.241  | -10.05  |
|              | f           | -64.663 | -61.174  | -63.611 | -65.395  | -68.224 |

$$T_O = a + b * \sin[360 * D / 365 - f]$$

| DAY OF THE YEAR | min-min             | mean-min        | mean            | mean-max          | max-max           |                       |
|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 1               | -1.3499764          | 5.461183        | 9.2967437       | 13.1222793        | 19.2815467        |                       |
| 2               | -1.414034328        | 5.397942        | 9.2306668       | 13.0529818        | 19.2214668        |                       |
| 3               | -1.475594715        | 5.336811        | 9.167044        | 12.9864816        | 19.1641853        |                       |
| 4               | -1.534639337        | 5.277808        | 9.1058941       | 12.9227985        | 19.1097192        |                       |
| 5               | -1.591150717        | 5.220952        | 9.0472353       | 12.8619513        | 19.0580847        |                       |
| 6               | -1.645112125        | 5.166258        | 8.9910849       | 12.8039581        | 19.009297         |                       |
| 7               | -1.696507588        | 5.113743        | 8.9374595       | 12.748836         | 18.9633705        |                       |
| 8               | -1.745321892        | 5.063423        | 8.8863751       | 12.6966014        | 18.9203189        |                       |
| 9               | -1.791540587        | 5.015312        | 8.8378466       | 12.6472697        | 18.8801549        |                       |
| 10              | -1.83514999         | 4.969425        | 8.7918886       | 12.6008555        | 18.8428904        |                       |
| 11              | -1.876137194        | 4.925774        | 8.7485146       | 12.5573725        | 18.8085363        |                       |
| 12              | -1.914490063        | 4.884374        | 8.7077374       | 12.5168336        | 18.777103         |                       |
| 13              | -1.950197246        | 4.845237        | 8.6695691       | 12.4792509        | 18.7485997        |                       |
| 14              | -1.983248172        | 4.808373        | 8.6340211       | 12.4446353        | 18.7230347        |                       |
| 15              | -2.013633058        | 4.773794        | 8.6011037       | 12.4129973        | 18.7004158        |                       |
| 16              | -2.041342908        | 4.741511        | 8.5708269       | 12.3843462        | 18.6807495        |                       |
| 17              | -2.066369521        | 4.711531        | 8.5431995       | 12.3586903        | 18.6640418        |                       |
| 18              | -2.088705487        | 4.683866        | 8.5182297       | 12.3360374        | 18.6502975        |                       |
| 19              | -2.108344195        | 4.658522        | 8.4959249       | 12.3163942        | 18.6395208        |                       |
| 20              | -2.125279832        | 4.635508        | 8.4762918       | 12.2997664        | 18.6317147        |                       |
| <b>21</b>       | <b>-2.139507383</b> | <b>4.614829</b> | <b>8.459336</b> | <b>12.2861589</b> | <b>18.6268817</b> | <b>21η ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ</b> |
| 22              | -2.151022638        | 4.596493        | 8.4450627       | 12.2755759        | 18.6250231        |                       |
| 23              | -2.159822188        | 4.580504        | 8.4334761       | 12.2680204        | 18.6261396        |                       |
| 24              | -2.165903427        | 4.566868        | 8.4245796       | 12.2634947        | 18.6302307        |                       |
| 25              | -2.169264556        | 4.555588        | 8.4183758       | 12.2620001        | 18.6372953        |                       |
| 26              | -2.16990458         | 4.546668        | 8.4148666       | 12.263537         | 18.6473313        |                       |
| 27              | -2.167823308        | 4.54011         | 8.414053        | 12.268105         | 18.6603356        |                       |
| 28              | -2.163021358        | 4.535916        | 8.4159352       | 12.2757028        | 18.6763045        |                       |
| 29              | -2.155500151        | 4.534088        | 8.4205127       | 12.2863281        | 18.6952333        |                       |
| 30              | -2.145261913        | 4.534626        | 8.4277842       | 12.2999777        | 18.7171162        |                       |
| 31              | -2.132309675        | 4.53753         | 8.4377474       | 12.3166477        | 18.741947         |                       |
| 32              | -2.11664727         | 4.542799        | 8.4503995       | 12.336333         | 18.7697181        |                       |
| 33              | -2.098279337        | 4.550431        | 8.4657367       | 12.3590279        | 18.8004213        |                       |
| 34              | -2.077211311        | 4.560425        | 8.4837544       | 12.3847256        | 18.8340477        |                       |
| 35              | -2.053449429        | 4.572777        | 8.5044474       | 12.4134185        | 18.8705872        |                       |
| 36              | -2.027000726        | 4.587483        | 8.5278094       | 12.4450981        | 18.910029         |                       |
| 37              | -1.99787303         | 4.60454         | 8.5538336       | 12.4797552        | 18.9523614        |                       |
| 38              | -1.966074965        | 4.623942        | 8.5825123       | 12.5173792        | 18.997572         |                       |
| 39              | -1.931615943        | 4.645683        | 8.613837        | 12.5579593        | 19.0456473        |                       |
| 40              | -1.894506164        | 4.669758        | 8.6477984       | 12.6014833        | 19.096573         |                       |
| 41              | -1.854756615        | 4.696158        | 8.6843864       | 12.6479384        | 19.1503342        |                       |
| 42              | -1.812379061        | 4.724877        | 8.7235902       | 12.6973107        | 19.2069149        |                       |

|    |              |          |           |            |            |
|----|--------------|----------|-----------|------------|------------|
| 43 | -1.767386047 | 4.755905 | 8.7653983 | 12.7495858 | 19.2662984 |
| 44 | -1.719790892 | 4.789234 | 8.8097982 | 12.8047481 | 19.328467  |
| 45 | -1.669607686 | 4.824853 | 8.8567769 | 12.8627812 | 19.3934024 |
| 46 | -1.616851284 | 4.862752 | 8.9063203 | 12.9236681 | 19.4610853 |
| 47 | -1.561537302 | 4.90292  | 8.9584138 | 12.9873906 | 19.5314958 |
| 48 | -1.503682115 | 4.945344 | 9.0130421 | 13.05393   | 19.6046129 |
| 49 | -1.443302849 | 4.990014 | 9.0701888 | 13.1232665 | 19.6804151 |
| 50 | -1.380417378 | 5.036914 | 9.1298373 | 13.1953796 | 19.7588798 |
| 51 | -1.315044317 | 5.086031 | 9.1919696 | 13.270248  | 19.8399839 |
| 52 | -1.247203018 | 5.137351 | 9.2565676 | 13.3478494 | 19.9237034 |
| 53 | -1.176913563 | 5.190859 | 9.3236119 | 13.428161  | 20.0100134 |
| 54 | -1.10419676  | 5.246538 | 9.3930829 | 13.5111589 | 20.0988884 |
| 55 | -1.029074134 | 5.304372 | 9.4649599 | 13.5968186 | 20.1903022 |
| 56 | -0.951567923 | 5.364345 | 9.5392217 | 13.6851147 | 20.2842276 |
| 57 | -0.871701072 | 5.426438 | 9.6158463 | 13.7760211 | 20.3806369 |
| 58 | -0.789497221 | 5.490632 | 9.6948109 | 13.8695109 | 20.4795014 |
| 59 | -0.704980705 | 5.55691  | 9.7760923 | 13.9655563 | 20.580792  |
| 60 | -0.618176542 | 5.625251 | 9.8596663 | 14.064129  | 20.6844787 |
| 61 | -0.52911043  | 5.695635 | 9.9455083 | 14.1651998 | 20.7905307 |
| 62 | -0.437808732 | 5.768041 | 10.033593 | 14.2687388 | 20.8989167 |
| 63 | -0.344298477 | 5.842448 | 10.123894 | 14.3747153 | 21.0096046 |
| 64 | -0.248607345 | 5.918834 | 10.216384 | 14.4830979 | 21.1225616 |
| 65 | -0.150763663 | 5.997176 | 10.311037 | 14.5938546 | 21.2377543 |
| 66 | -0.050796394 | 6.07745  | 10.407824 | 14.7069526 | 21.3551485 |
| 67 | 0.051264868  | 6.159635 | 10.506717 | 14.8223583 | 21.4747096 |
| 68 | 0.155389912  | 6.243703 | 10.607686 | 14.9400377 | 21.5964022 |
| 69 | 0.261547914  | 6.329632 | 10.710702 | 15.0599559 | 21.7201901 |
| 70 | 0.369707449  | 6.417396 | 10.815734 | 15.1820774 | 21.8460368 |
| 71 | 0.4798365    | 6.506968 | 10.92275  | 15.3063661 | 21.9739051 |
| 72 | 0.591902466  | 6.598322 | 11.03172  | 15.432785  | 22.103757  |
| 73 | 0.705872174  | 6.691431 | 11.142611 | 15.561297  | 22.2355541 |
| 74 | 0.821711886  | 6.786268 | 11.25539  | 15.6918638 | 22.3692575 |
| 75 | 0.93938731   | 6.882804 | 11.370024 | 15.8244469 | 22.5048274 |
| 76 | 1.058863613  | 6.981011 | 11.486478 | 15.9590069 | 22.6422239 |
| 77 | 1.180105427  | 7.080859 | 11.604719 | 16.0955041 | 22.7814062 |
| 78 | 1.303076862  | 7.18232  | 11.724711 | 16.2338981 | 22.9223332 |
| 79 | 1.427741515  | 7.285363 | 11.846419 | 16.3741479 | 23.064963  |
| 80 | 1.554062483  | 7.389957 | 11.969807 | 16.5162119 | 23.2092536 |
| 81 | 1.682002374  | 7.496072 | 12.094838 | 16.6600481 | 23.3551621 |
| 82 | 1.811523312  | 7.603676 | 12.221476 | 16.805614  | 23.5026454 |
| 83 | 1.942586959  | 7.712738 | 12.349682 | 16.9528664 | 23.6516598 |
| 84 | 2.075154515  | 7.823225 | 12.479419 | 17.1017618 | 23.8021613 |
| 85 | 2.209186739  | 7.935105 | 12.610648 | 17.2522561 | 23.9541052 |
| 86 | 2.344643953  | 8.048343 | 12.743331 | 17.4043047 | 24.1074466 |
| 87 | 2.481486061  | 8.162908 | 12.877428 | 17.5578626 | 24.26214   |
| 88 | 2.619672553  | 8.278764 | 13.0129   | 17.7128844 | 24.4181398 |
| 89 | 2.759162523  | 8.395878 | 13.149706 | 17.8693242 | 24.5753997 |
| 90 | 2.899914679  | 8.514214 | 13.287806 | 18.0271356 | 24.7338732 |
| 91 | 3.041887356  | 8.633739 | 13.42716  | 18.186272  | 24.8935133 |
| 92 | 3.185038528  | 8.754416 | 13.567725 | 18.3466862 | 25.0542729 |
| 93 | 3.329325817  | 8.87621  | 13.709461 | 18.5083308 | 25.2161042 |
| 94 | 3.474706512  | 8.999085 | 13.852325 | 18.6711579 | 25.3789595 |
| 95 | 3.621137577  | 9.123003 | 13.996274 | 18.8351193 | 25.5427904 |
| 96 | 3.768575666  | 9.24793  | 14.141268 | 19.0001664 | 25.7075486 |

21η ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ

21η ΜΑΡΤΙΟΥ

|     |             |          |           |            |            |
|-----|-------------|----------|-----------|------------|------------|
| 97  | 3.916977133 | 9.373827 | 14.287261 | 19.1662505 | 25.8731852 |
| 98  | 4.066298049 | 9.500658 | 14.434212 | 19.3333223 | 26.0396511 |
| 99  | 4.216494212 | 9.628384 | 14.582077 | 19.5013325 | 26.2068972 |
| 100 | 4.36752116  | 9.756969 | 14.730812 | 19.6702311 | 26.3748739 |
| 101 | 4.519334185 | 9.886374 | 14.880372 | 19.8399684 | 26.5435315 |
| 102 | 4.67188835  | 10.01656 | 15.030715 | 20.0104939 | 26.7128201 |
| 103 | 4.825138493 | 10.14749 | 15.181794 | 20.1817573 | 26.8826895 |
| 104 | 4.979039249 | 10.27912 | 15.333566 | 20.3537078 | 27.0530894 |
| 105 | 5.133545062 | 10.41142 | 15.485986 | 20.5262946 | 27.2239695 |
| 106 | 5.288610193 | 10.54435 | 15.639008 | 20.6994665 | 27.3952791 |
| 107 | 5.444188741 | 10.67786 | 15.792587 | 20.8731723 | 27.5669676 |
| 108 | 5.60023465  | 10.81192 | 15.946677 | 21.0473605 | 27.738984  |
| 109 | 5.756701727 | 10.94649 | 16.101234 | 21.2219797 | 27.9112775 |
| 110 | 5.913543656 | 11.08152 | 16.256211 | 21.396978  | 28.0837971 |
| 111 | 6.070714008 | 11.21699 | 16.411562 | 21.5723038 | 28.2564918 |
| 112 | 6.228166256 | 11.35284 | 16.567242 | 21.7479051 | 28.4293102 |
| 113 | 6.385853792 | 11.48903 | 16.723204 | 21.9237299 | 28.6022015 |
| 114 | 6.543729937 | 11.62554 | 16.879402 | 22.0997261 | 28.7751143 |
| 115 | 6.701747956 | 11.76231 | 17.035791 | 22.2758418 | 28.9479974 |
| 116 | 6.859861073 | 11.89931 | 17.192323 | 22.4520247 | 29.1207997 |
| 117 | 7.018022482 | 12.0365  | 17.348952 | 22.6282227 | 29.2934701 |
| 118 | 7.176185364 | 12.17383 | 17.505632 | 22.8043836 | 29.4659574 |
| 119 | 7.334302901 | 12.31126 | 17.662316 | 22.9804553 | 29.6382105 |
| 120 | 7.492328285 | 12.44876 | 17.818959 | 23.1563856 | 29.8101785 |
| 121 | 7.650214738 | 12.58628 | 17.975514 | 23.3321226 | 29.9818105 |
| 122 | 7.807915522 | 12.72379 | 18.131934 | 23.5076141 | 30.1530556 |
| 123 | 7.965383954 | 12.86123 | 18.288173 | 23.6828082 | 30.3238632 |
| 124 | 8.122573421 | 12.99858 | 18.444185 | 23.8576531 | 30.4941827 |
| 125 | 8.279437391 | 13.13579 | 18.599924 | 24.032097  | 30.6639637 |
| 126 | 8.435929428 | 13.27281 | 18.755343 | 24.2060882 | 30.8331559 |
| 127 | 8.592003209 | 13.40962 | 18.910397 | 24.3795753 | 31.0017092 |
| 128 | 8.747612531 | 13.54616 | 19.06504  | 24.5525068 | 31.1695738 |
| 129 | 8.902711331 | 13.68241 | 19.219226 | 24.7248317 | 31.3367    |
| 130 | 9.057253697 | 13.81831 | 19.372909 | 24.8964988 | 31.5030382 |
| 131 | 9.211193881 | 13.95383 | 19.526043 | 25.0674575 | 31.6685392 |
| 132 | 9.364486312 | 14.08892 | 19.678585 | 25.237657  | 31.8331541 |
| 133 | 9.517085615 | 14.22356 | 19.830487 | 25.407047  | 31.9968342 |
| 134 | 9.668946615 | 14.35769 | 19.981706 | 25.5755773 | 32.1595309 |
| 135 | 9.820024358 | 14.49128 | 20.132197 | 25.7431981 | 32.3211961 |
| 136 | 9.970274123 | 14.62429 | 20.281914 | 25.9098597 | 32.4817819 |
| 137 | 10.11965143 | 14.75668 | 20.430814 | 26.0755128 | 32.6412409 |
| 138 | 10.26811207 | 14.88841 | 20.578853 | 26.2401083 | 32.7995258 |
| 139 | 10.41561208 | 15.01943 | 20.725987 | 26.4035976 | 32.9565897 |
| 140 | 10.56210781 | 15.14973 | 20.872172 | 26.5659323 | 33.1123862 |
| 141 | 10.70755588 | 15.27924 | 21.017364 | 26.7270642 | 33.2668691 |
| 142 | 10.85191325 | 15.40794 | 21.161522 | 26.8869457 | 33.4199927 |
| 143 | 10.99513718 | 15.53579 | 21.304603 | 27.0455295 | 33.5717117 |
| 144 | 11.13718528 | 15.66274 | 21.446563 | 27.2027686 | 33.7219812 |
| 145 | 11.27801548 | 15.78877 | 21.587361 | 27.3586164 | 33.8707567 |
| 146 | 11.41758612 | 15.91383 | 21.726955 | 27.5130269 | 34.0179941 |
| 147 | 11.55585586 | 16.03789 | 21.865305 | 27.6659544 | 34.1636499 |
| 148 | 11.69278378 | 16.16091 | 22.002368 | 27.8173534 | 34.3076809 |
| 149 | 11.82832934 | 16.28286 | 22.138105 | 27.9671793 | 34.4500445 |
| 150 | 11.96245243 | 16.40369 | 22.272475 | 28.1153877 | 34.5906986 |

21η ΑΠΡΗΛΙΟΥ

21η ΜΑΪΟΥ

|     |             |          |           |            |            |
|-----|-------------|----------|-----------|------------|------------|
| 151 | 12.09511333 | 16.52338 | 22.405438 | 28.2619348 | 34.7296015 |
| 152 | 12.22627278 | 16.64188 | 22.536956 | 28.406777  | 34.8667121 |
| 153 | 12.35589195 | 16.75917 | 22.666989 | 28.5498716 | 35.0019899 |
| 154 | 12.48393247 | 16.8752  | 22.795498 | 28.6911762 | 35.1353947 |
| 155 | 12.61035644 | 16.98994 | 22.922446 | 28.830649  | 35.2668871 |
| 156 | 12.73512644 | 17.10336 | 23.047795 | 28.9682486 | 35.3964282 |
| 157 | 12.85820552 | 17.21543 | 23.171508 | 29.1039344 | 35.5239796 |
| 158 | 12.97955726 | 17.32611 | 23.293549 | 29.2376662 | 35.6495035 |
| 159 | 13.09914573 | 17.43537 | 23.41388  | 29.3694044 | 35.7729629 |
| 160 | 13.21693553 | 17.54318 | 23.532467 | 29.49911   | 35.894321  |
| 161 | 13.3328918  | 17.6495  | 23.649275 | 29.6267445 | 36.0135422 |
| 162 | 13.4469802  | 17.75431 | 23.764269 | 29.7522703 | 36.1305909 |
| 163 | 13.55916697 | 17.85757 | 23.877414 | 29.8756502 | 36.2454327 |
| 164 | 13.6694189  | 17.95925 | 23.988678 | 29.9968476 | 36.3580334 |
| 165 | 13.77770334 | 18.05932 | 24.098027 | 30.1158267 | 36.4683598 |
| 166 | 13.88398825 | 18.15776 | 24.205429 | 30.2325522 | 36.5763792 |
| 167 | 13.98824216 | 18.25452 | 24.310853 | 30.3469896 | 36.6820596 |
| 168 | 14.09043421 | 18.3496  | 24.414266 | 30.459105  | 36.7853698 |
| 169 | 14.19053415 | 18.44295 | 24.515639 | 30.5688652 | 36.8862791 |
| 170 | 14.28851235 | 18.53454 | 24.614942 | 30.6762378 | 36.9847577 |
| 171 | 14.38433981 | 18.62436 | 24.712144 | 30.7811909 | 37.0807764 |
| 172 | 14.47798815 | 18.71238 | 24.807218 | 30.8836935 | 37.1743069 |
| 173 | 14.56942965 | 18.79856 | 24.900135 | 30.9837152 | 37.2653214 |
| 174 | 14.65863725 | 18.88289 | 24.990868 | 31.0812265 | 37.3537929 |
| 175 | 14.74558454 | 18.96533 | 25.079389 | 31.1761984 | 37.4396954 |
| 176 | 14.83024579 | 19.04587 | 25.165673 | 31.2686029 | 37.5230033 |
| 177 | 14.91259592 | 19.12448 | 25.249694 | 31.3584125 | 37.603692  |
| 178 | 14.99261056 | 19.20114 | 25.331427 | 31.4456008 | 37.6817377 |
| 179 | 15.07026603 | 19.27582 | 25.410848 | 31.5301419 | 37.7571171 |
| 180 | 15.14553934 | 19.3485  | 25.487933 | 31.6120107 | 37.8298081 |
| 181 | 15.21840821 | 19.41917 | 25.56266  | 31.6911831 | 37.899789  |
| 182 | 15.28885106 | 19.48779 | 25.635007 | 31.7676356 | 37.9670392 |
| 183 | 15.35684704 | 19.55435 | 25.704951 | 31.8413456 | 38.0315388 |
| 184 | 15.42237603 | 19.61884 | 25.772473 | 31.9122912 | 38.0932686 |
| 185 | 15.48541862 | 19.68122 | 25.837553 | 31.9804515 | 38.1522104 |
| 186 | 15.54595616 | 19.74149 | 25.90017  | 32.0458062 | 38.2083468 |
| 187 | 15.60397072 | 19.79962 | 25.960307 | 32.1083361 | 38.2616611 |
| 188 | 15.65944514 | 19.85559 | 26.017946 | 32.1680226 | 38.3121375 |
| 189 | 15.71236298 | 19.9094  | 26.07307  | 32.224848  | 38.3597612 |
| 190 | 15.76270859 | 19.96102 | 26.125662 | 32.2787955 | 38.4045179 |
| 191 | 15.81046705 | 20.01045 | 26.175706 | 32.3298493 | 38.4463945 |
| 192 | 15.85562424 | 20.05765 | 26.223189 | 32.377994  | 38.4853786 |
| 193 | 15.89816679 | 20.10263 | 26.268096 | 32.4232156 | 38.5214585 |
| 194 | 15.9380821  | 20.14537 | 26.310414 | 32.4655005 | 38.5546238 |
| 195 | 15.97535835 | 20.18585 | 26.350129 | 32.5048364 | 38.5848644 |
| 196 | 16.00998452 | 20.22406 | 26.387231 | 32.5412115 | 38.6121715 |
| 197 | 16.04195035 | 20.25999 | 26.421709 | 32.574615  | 38.636537  |
| 198 | 16.07124638 | 20.29364 | 26.453551 | 32.6050372 | 38.6579537 |
| 199 | 16.09786393 | 20.32498 | 26.48275  | 32.6324689 | 38.6764152 |
| 200 | 16.12179513 | 20.35402 | 26.509295 | 32.6569021 | 38.6919161 |
| 201 | 16.1430329  | 20.38074 | 26.53318  | 32.6783295 | 38.7044517 |
| 202 | 16.16157094 | 20.40514 | 26.554397 | 32.6967448 | 38.7140184 |
| 203 | 16.17740378 | 20.4272  | 26.57294  | 32.7121426 | 38.7206134 |
| 204 | 16.19052671 | 20.44692 | 26.588803 | 32.7245182 | 38.7242347 |

21η IOYNIOY

21η IOYAI OY

|     |             |          |           |            |            |
|-----|-------------|----------|-----------|------------|------------|
| 205 | 16.20093586 | 20.46431 | 26.601983 | 32.7338681 | 38.7248811 |
| 206 | 16.20862815 | 20.47934 | 26.612474 | 32.7401894 | 38.7225526 |
| 207 | 16.2136013  | 20.49201 | 26.620273 | 32.7434802 | 38.7172498 |
| 208 | 16.21585383 | 20.50233 | 26.625379 | 32.7437397 | 38.7089743 |
| 209 | 16.21538509 | 20.51029 | 26.62779  | 32.7409677 | 38.6977285 |
| 210 | 16.2121952  | 20.51588 | 26.627506 | 32.735165  | 38.6835157 |
| 211 | 16.20628512 | 20.51911 | 26.624525 | 32.7263334 | 38.6663403 |
| 212 | 16.19765659 | 20.51998 | 26.61885  | 32.7144755 | 38.6462071 |
| 213 | 16.18631216 | 20.51848 | 26.610481 | 32.6995947 | 38.6231223 |
| 214 | 16.1722552  | 20.51461 | 26.599422 | 32.6816956 | 38.5970927 |
| 215 | 16.15548987 | 20.50838 | 26.585675 | 32.6607833 | 38.5681259 |
| 216 | 16.13602113 | 20.49978 | 26.569246 | 32.6368641 | 38.5362305 |
| 217 | 16.11385474 | 20.48883 | 26.550137 | 32.6099451 | 38.501416  |
| 218 | 16.08899726 | 20.47552 | 26.528356 | 32.5800342 | 38.4636926 |
| 219 | 16.06145606 | 20.45985 | 26.503908 | 32.5471403 | 38.4230716 |
| 220 | 16.03123928 | 20.44184 | 26.476802 | 32.5112731 | 38.379565  |
| 221 | 15.99835587 | 20.42148 | 26.447044 | 32.4724433 | 38.3331856 |
| 222 | 15.96281556 | 20.39879 | 26.414644 | 32.4306622 | 38.2839471 |
| 223 | 15.92462889 | 20.37377 | 26.379611 | 32.3859424 | 38.2318642 |
| 224 | 15.88380713 | 20.34642 | 26.341956 | 32.3382971 | 38.1769523 |
| 225 | 15.8403624  | 20.31676 | 26.301689 | 32.2877402 | 38.1192276 |
| 226 | 15.79430753 | 20.28479 | 26.258824 | 32.2342869 | 38.0587072 |
| 227 | 15.74565617 | 20.25053 | 26.213372 | 32.1779529 | 37.9954091 |
| 228 | 15.69442273 | 20.21398 | 26.165346 | 32.1187549 | 37.9293519 |
| 229 | 15.64062235 | 20.17516 | 26.114762 | 32.0567105 | 37.8605552 |
| 230 | 15.58427098 | 20.13407 | 26.061634 | 31.9918379 | 37.7890394 |
| 231 | 15.52538529 | 20.09073 | 26.005978 | 31.9241565 | 37.7148256 |
| 232 | 15.46398271 | 20.04515 | 25.947809 | 31.8536862 | 37.6379359 |
| 233 | 15.40008142 | 19.99734 | 25.887147 | 31.7804479 | 37.5583929 |
| 234 | 15.33370034 | 19.94732 | 25.824008 | 31.7044632 | 37.4762203 |
| 235 | 15.26485912 | 19.89511 | 25.758411 | 31.6257548 | 37.3914423 |
| 236 | 15.19357813 | 19.84072 | 25.690375 | 31.5443458 | 37.3040841 |
| 237 | 15.11987847 | 19.78416 | 25.619921 | 31.4602604 | 37.2141715 |
| 238 | 15.04378197 | 19.72545 | 25.54707  | 31.3735234 | 37.1217311 |
| 239 | 14.96531115 | 19.66461 | 25.471843 | 31.2841606 | 37.0267903 |
| 240 | 14.88448923 | 19.60166 | 25.394262 | 31.1921984 | 36.9293772 |
| 241 | 14.80134015 | 19.53661 | 25.314351 | 31.0976639 | 36.8295206 |
| 242 | 14.71588851 | 19.46949 | 25.232132 | 31.0005853 | 36.7272501 |
| 243 | 14.62815961 | 19.40032 | 25.147631 | 30.9009912 | 36.622596  |
| 244 | 14.53817943 | 19.32911 | 25.060872 | 30.7989112 | 36.5155892 |
| 245 | 14.44597459 | 19.25588 | 24.971882 | 30.6943753 | 36.4062614 |
| 246 | 14.35157239 | 19.18067 | 24.880685 | 30.5874147 | 36.294645  |
| 247 | 14.25500079 | 19.10348 | 24.787311 | 30.4780609 | 36.180773  |
| 248 | 14.15628835 | 19.02435 | 24.691785 | 30.3663463 | 36.0646792 |
| 249 | 14.05546431 | 18.94329 | 24.594136 | 30.2523039 | 35.9463979 |
| 250 | 13.95255852 | 18.86034 | 24.494394 | 30.1359677 | 35.825964  |
| 251 | 13.84760142 | 18.77551 | 24.392587 | 30.0173719 | 35.7034134 |
| 252 | 13.7406241  | 18.68883 | 24.288746 | 29.8965516 | 35.5787822 |
| 253 | 13.63165822 | 18.60033 | 24.182902 | 29.7735428 | 35.4521073 |
| 254 | 13.52073604 | 18.51002 | 24.075086 | 29.6483817 | 35.3234262 |
| 255 | 13.40789039 | 18.41795 | 23.965329 | 29.5211054 | 35.1927771 |
| 256 | 13.29315467 | 18.32414 | 23.853665 | 29.3917516 | 35.0601986 |
| 257 | 13.17656286 | 18.2286  | 23.740126 | 29.2603586 | 34.9257299 |
| 258 | 13.05814946 | 18.13138 | 23.624747 | 29.1269653 | 34.7894109 |

2η ΑΥΤΟΥΣΤΟΥ

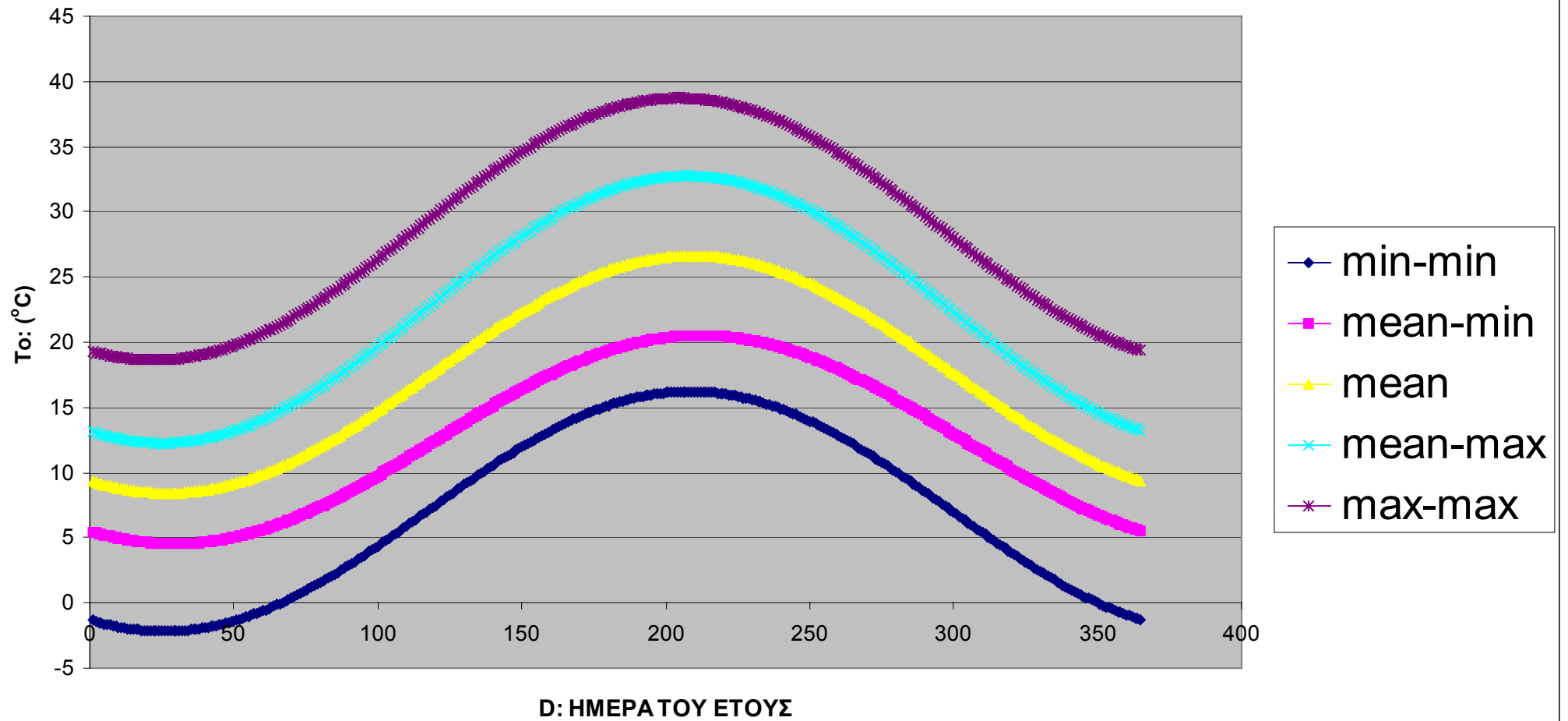


|     |             |          |           |            |            |                |
|-----|-------------|----------|-----------|------------|------------|----------------|
| 259 | 12.93794953 | 18.0325  | 23.50756  | 28.9916111 | 34.6512818 |                |
| 260 | 12.81599865 | 17.932   | 23.388602 | 28.8543362 | 34.5113837 |                |
| 261 | 12.69233292 | 17.82989 | 23.267906 | 28.7151812 | 34.3697579 |                |
| 262 | 12.56698895 | 17.72621 | 23.145509 | 28.5741872 | 34.2264463 |                |
| 263 | 12.44000383 | 17.62099 | 23.021447 | 28.431396  | 34.0814913 |                |
| 264 | 12.31141517 | 17.51426 | 22.895757 | 28.2868498 | 33.9349359 | 2η ΣΕΙΤΕΜΒΡΙΟΥ |
| 265 | 12.18126103 | 17.40606 | 22.768476 | 28.1405916 | 33.7868235 |                |
| 266 | 12.04957993 | 17.29642 | 22.639642 | 27.9926645 | 33.6371979 |                |
| 267 | 11.91641086 | 17.18536 | 22.509292 | 27.8431123 | 33.4861033 |                |
| 268 | 11.78179323 | 17.07292 | 22.377466 | 27.6919793 | 33.3335846 |                |
| 269 | 11.6457669  | 16.95914 | 22.244202 | 27.5393103 | 33.1796868 |                |
| 270 | 11.50837213 | 16.84404 | 22.10954  | 27.3851505 | 33.0244555 |                |
| 271 | 11.3696496  | 16.72767 | 21.973519 | 27.2295454 | 32.8679367 |                |
| 272 | 11.22964037 | 16.61005 | 21.836181 | 27.0725411 | 32.7101767 |                |
| 273 | 11.08838588 | 16.49123 | 21.697565 | 26.9141842 | 32.5512222 |                |
| 274 | 10.94592795 | 16.37123 | 21.557713 | 26.7545215 | 32.3911203 |                |
| 275 | 10.80230875 | 16.25009 | 21.416666 | 26.5936002 | 32.2299183 |                |
| 276 | 10.6575708  | 16.12786 | 21.274466 | 26.4314681 | 32.067664  |                |
| 277 | 10.51175694 | 16.00455 | 21.131154 | 26.268173  | 31.9044054 |                |
| 278 | 10.36491033 | 15.88022 | 20.986774 | 26.1037633 | 31.7401908 |                |
| 279 | 10.21707444 | 15.75489 | 20.841368 | 25.9382878 | 31.5750688 |                |
| 280 | 10.06829304 | 15.62861 | 20.694979 | 25.7717953 | 31.4090884 |                |
| 281 | 9.918610169 | 15.50141 | 20.547651 | 25.6043352 | 31.2422986 |                |
| 282 | 9.768070135 | 15.37333 | 20.399426 | 25.435957  | 31.0747488 |                |
| 283 | 9.616717503 | 15.2444  | 20.25035  | 25.2667106 | 30.9064887 |                |
| 284 | 9.464597075 | 15.11468 | 20.100465 | 25.0966461 | 30.737568  |                |
| 285 | 9.311753882 | 14.98418 | 19.949817 | 24.9258139 | 30.5680367 |                |
| 286 | 9.15823317  | 14.85296 | 19.79845  | 24.7542644 | 30.3979451 |                |
| 287 | 9.004080383 | 14.72105 | 19.646409 | 24.5820485 | 30.2273434 |                |
| 288 | 8.849341155 | 14.58849 | 19.493738 | 24.4092172 | 30.0562822 |                |
| 289 | 8.694061291 | 14.45532 | 19.340484 | 24.2358215 | 29.8848121 |                |
| 290 | 8.538286757 | 14.32158 | 19.186691 | 24.061913  | 29.7129839 |                |
| 291 | 8.382063666 | 14.18731 | 19.032405 | 23.8875429 | 29.5408484 |                |
| 292 | 8.225438263 | 14.05255 | 18.877671 | 23.712763  | 29.3684566 |                |
| 293 | 8.068456914 | 13.91733 | 18.722536 | 23.537625  | 29.1958595 |                |
| 294 | 7.911166086 | 13.78171 | 18.567046 | 23.3621807 | 29.0231083 | 2η ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ   |
| 295 | 7.753612343 | 13.64571 | 18.411245 | 23.1864821 | 28.850254  |                |
| 296 | 7.595842323 | 13.50938 | 18.255181 | 23.0105811 | 28.6773478 |                |
| 297 | 7.43790273  | 13.37276 | 18.0989   | 22.8345299 | 28.5044409 |                |
| 298 | 7.279840316 | 13.23589 | 17.942448 | 22.6583806 | 28.3315845 |                |
| 299 | 7.121701873 | 13.09881 | 17.785871 | 22.4821852 | 28.1588298 |                |
| 300 | 6.963534211 | 12.96157 | 17.629215 | 22.3059961 | 27.9862279 |                |
| 301 | 6.805384153 | 12.82419 | 17.472528 | 22.1298652 | 27.8138298 |                |
| 302 | 6.647298514 | 12.68672 | 17.315854 | 21.9538448 | 27.6416867 |                |
| 303 | 6.48932409  | 12.54921 | 17.159242 | 21.777987  | 27.4698495 |                |
| 304 | 6.331507645 | 12.41169 | 17.002737 | 21.6023437 | 27.298369  |                |
| 305 | 6.173895897 | 12.2742  | 16.846385 | 21.4269671 | 27.127296  |                |
| 306 | 6.016535502 | 12.13679 | 16.690232 | 21.2519091 | 26.9566812 |                |
| 307 | 5.859473042 | 11.9995  | 16.534326 | 21.0772213 | 26.786575  |                |
| 308 | 5.70275501  | 11.86236 | 16.378712 | 20.9029556 | 26.6170279 |                |
| 309 | 5.546427799 | 11.72542 | 16.223436 | 20.7291636 | 26.4480899 |                |
| 310 | 5.390537685 | 11.58871 | 16.068544 | 20.5558967 | 26.2798112 |                |
| 311 | 5.235130814 | 11.45229 | 15.914082 | 20.3832061 | 26.1122415 |                |
| 312 | 5.08025319  | 11.31618 | 15.760095 | 20.2111431 | 25.9454304 |                |

|     |              |          |           |            |            |                |
|-----|--------------|----------|-----------|------------|------------|----------------|
| 313 | 4.92595066   | 11.18043 | 15.60663  | 20.0397585 | 25.7794273 |                |
| 314 | 4.772268902  | 11.04508 | 15.453732 | 19.8691031 | 25.6142814 |                |
| 315 | 4.619253408  | 10.91016 | 15.301445 | 19.6992273 | 25.4500415 |                |
| 316 | 4.466949474  | 10.77573 | 15.149816 | 19.5301816 | 25.2867563 |                |
| 317 | 4.315402185  | 10.64181 | 14.998889 | 19.3620158 | 25.1244741 |                |
| 318 | 4.164656402  | 10.50845 | 14.848708 | 19.1947799 | 24.9632429 |                |
| 319 | 4.01475675   | 10.37569 | 14.699318 | 19.0285232 | 24.8031105 |                |
| 320 | 3.865747602  | 10.24357 | 14.550763 | 18.8632951 | 24.6441242 |                |
| 321 | 3.717673067  | 10.11212 | 14.403088 | 18.6991444 | 24.4863311 |                |
| 322 | 3.570576979  | 9.98139  | 14.256336 | 18.5361197 | 24.329778  |                |
| 323 | 3.424502882  | 9.85141  | 14.11055  | 18.3742693 | 24.1745112 |                |
| 324 | 3.279494016  | 9.722223 | 13.965773 | 18.2136411 | 24.0205766 |                |
| 325 | 3.135593308  | 9.593866 | 13.822049 | 18.0542826 | 23.8680198 | 21η NOEMBPIOY  |
| 326 | 2.992843354  | 9.466377 | 13.679421 | 17.8962411 | 23.716886  |                |
| 327 | 2.851286412  | 9.339795 | 13.537929 | 17.7395632 | 23.5672199 |                |
| 328 | 2.710964386  | 9.214155 | 13.397616 | 17.5842955 | 23.4190657 |                |
| 329 | 2.571918814  | 9.089497 | 13.258524 | 17.4304837 | 23.2724675 |                |
| 330 | 2.434190857  | 8.965856 | 13.120694 | 17.2781736 | 23.1274685 |                |
| 331 | 2.297821284  | 8.843269 | 12.984166 | 17.1274101 | 22.9841118 |                |
| 332 | 2.162850465  | 8.721773 | 12.848981 | 16.9782379 | 22.8424396 |                |
| 333 | 2.029318353  | 8.601403 | 12.715179 | 16.8307011 | 22.702494  |                |
| 334 | 1.897264476  | 8.482195 | 12.5828   | 16.6848435 | 22.5643164 |                |
| 335 | 1.766727926  | 8.364185 | 12.451883 | 16.5407081 | 22.4279477 |                |
| 336 | 1.637747345  | 8.247406 | 12.322466 | 16.3983377 | 22.2934282 |                |
| 337 | 1.510360912  | 8.131895 | 12.194589 | 16.2577745 | 22.1607978 |                |
| 338 | 1.384606337  | 8.017685 | 12.068287 | 16.1190599 | 22.0300958 |                |
| 339 | 1.260520847  | 7.904809 | 11.9436   | 15.9822351 | 21.9013608 |                |
| 340 | 1.138141173  | 7.793302 | 11.820565 | 15.8473407 | 21.7746309 |                |
| 341 | 1.017503542  | 7.683196 | 11.699216 | 15.7144164 | 21.6499437 |                |
| 342 | 0.898643665  | 7.574524 | 11.579591 | 15.5835017 | 21.5273361 |                |
| 343 | 0.781596728  | 7.467318 | 11.461725 | 15.4546353 | 21.4068443 |                |
| 344 | 0.666397378  | 7.36161  | 11.345652 | 15.3278554 | 21.288504  |                |
| 345 | 0.553079718  | 7.25743  | 11.231407 | 15.2031995 | 21.1723504 |                |
| 346 | 0.441677291  | 7.154811 | 11.119024 | 15.0807044 | 21.0584176 |                |
| 347 | 0.332223076  | 7.053782 | 11.008537 | 14.9604066 | 20.9467395 |                |
| 348 | 0.224749472  | 6.954373 | 10.899977 | 14.8423414 | 20.8373492 |                |
| 349 | 0.119288295  | 6.856614 | 10.793377 | 14.7265441 | 20.7302789 |                |
| 350 | 0.015870764  | 6.760534 | 10.688769 | 14.6130487 | 20.6255605 |                |
| 351 | -0.085472509 | 6.66616  | 10.586183 | 14.5018889 | 20.5232249 |                |
| 352 | -0.184711524 | 6.573521 | 10.48565  | 14.3930976 | 20.4233023 |                |
| 353 | -0.281816902 | 6.482645 | 10.387199 | 14.286707  | 20.3258225 |                |
| 354 | -0.3767599   | 6.393558 | 10.290861 | 14.1827486 | 20.2308142 |                |
| 355 | -0.469512412 | 6.306286 | 10.196662 | 14.0812531 | 20.1383055 | 21η ΔEKEMBPIOY |
| 356 | -0.560046981 | 6.220856 | 10.104632 | 13.9822507 | 20.0483239 |                |
| 357 | -0.648336807 | 6.137293 | 10.014797 | 13.8857706 | 19.960896  |                |
| 358 | -0.734355755 | 6.055621 | 9.9271845 | 13.7918414 | 19.8760476 |                |
| 359 | -0.818078361 | 5.975865 | 9.8418196 | 13.7004909 | 19.7938039 |                |
| 360 | -0.899479842 | 5.898048 | 9.758728  | 13.6117461 | 19.7141892 |                |
| 361 | -0.9785361   | 5.822194 | 9.6779341 | 13.5256333 | 19.6372271 |                |
| 362 | -1.055223734 | 5.748324 | 9.5994619 | 13.442178  | 19.5629404 |                |
| 363 | -1.129520042 | 5.676461 | 9.5233347 | 13.3614049 | 19.491351  |                |
| 364 | -1.201403031 | 5.606626 | 9.4495749 | 13.2833379 | 19.4224802 |                |
| 365 | -1.270851422 | 5.538839 | 9.3782045 | 13.2080002 | 19.3563484 |                |



ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΘΗΝΑ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14. ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΘΗΝΑ.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-2

### 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Οι μετρήσεις γίνονται για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, δηλαδή για:  $D=31+21=52^{\eta}$  ημέρα.

Πίνακας - 17 : Στιγμαία άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για κάθε ώρα.

| Time t<br>[hrs] | $M_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $A_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $P_t$<br>[°] | $G_b$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| 08.00           | 0.057                         | 0.068                         | 87.31        | 0.017                         |
| 09.00           | 0.119                         | 0.104                         | 87.94        | 0.057                         |
| 10.00           | 0.191                         | 0.129                         | 88.31        | 0.113                         |
| 11.00           | 0.258                         | 0.153                         | 89.35        | 0.164                         |
| 12.00           | 0.319                         | -0.181                        | -88.88       | 0.203                         |
| 13.00           | 0.342                         | -0.194                        | -89.18       | 0.218                         |
| 14.00           | 0.325                         | 0.183                         | 87.21        | 0.218                         |
| 15.00           | 0.269                         | 0.166                         | 86.22        | 0.174                         |
| 16.00           | 0.183                         | 0.147                         | 82.10        | 0.108                         |
| 17.00           | 0.078                         | 0.131                         | 79.85        | 0.015                         |

Πίνακας - 18 : Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για κάθε ώρα.

| Time t<br>[hrs] | $m_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $a_t$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $p_t$<br>[°] | $G_d$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| 08.00           | 0.134                         | 0.127                         | 82.45        | 0.068                         |
| 09.00           | 0.208                         | 0.1333                        | 83.94        | 0.136                         |
| 10.00           | 0.261                         | 0.129                         | 85.60        | 0.188                         |
| 11.00           | 0.283                         | 0.117                         | 86.05        | 0.216                         |
| 12.00           | 0.271                         | 0.095                         | 82.71        | 0.221                         |
| 13.00           | 0.243                         | 0.081                         | 81.95        | 0.202                         |
| 14.00           | 0.210                         | 0.083                         | 87.23        | 0.161                         |
| 15.00           | 0.176                         | 0.087                         | 89.53        | 0.122                         |
| 16.00           | 0.141                         | -0.085                        | -88.19       | 0.086                         |
| 17.00           | 0.104                         | -0.079                        | -88.97       | 0.053                         |

Πίνακας - 19: Γωνία πρόσπτωσης της άμεσου ακτινοβολίας για κάθε ώρα

| Ώρα   | $\omega$ | $\cos\omega$ | $\cos\theta$ | $\cos\theta_z$ |
|-------|----------|--------------|--------------|----------------|
| 08.00 | -60      | 0.500        | 0.491        | 0.509          |
| 09.00 | -45      | 0.707        | 0.694        | 0.671          |
| 10.00 | -30      | 0.866        | 0.850        | 0.795          |
| 11.00 | -15      | 0.966        | 0.948        | 0.873          |
| 12.00 | 0        | 1.000        | 0.981        | 0.900          |
| 13.00 | 15       | 0.966        | 0.948        | 0.873          |
| 14.00 | 30       | 0.866        | 0.850        | 0.795          |
| 15.00 | 45       | 0.707        | 0.694        | 0.671          |
| 16.00 | 60       | 0.500        | 0.491        | 0.509          |
| 17.00 | 75       | 0.259        | 0.255        | 0.320          |

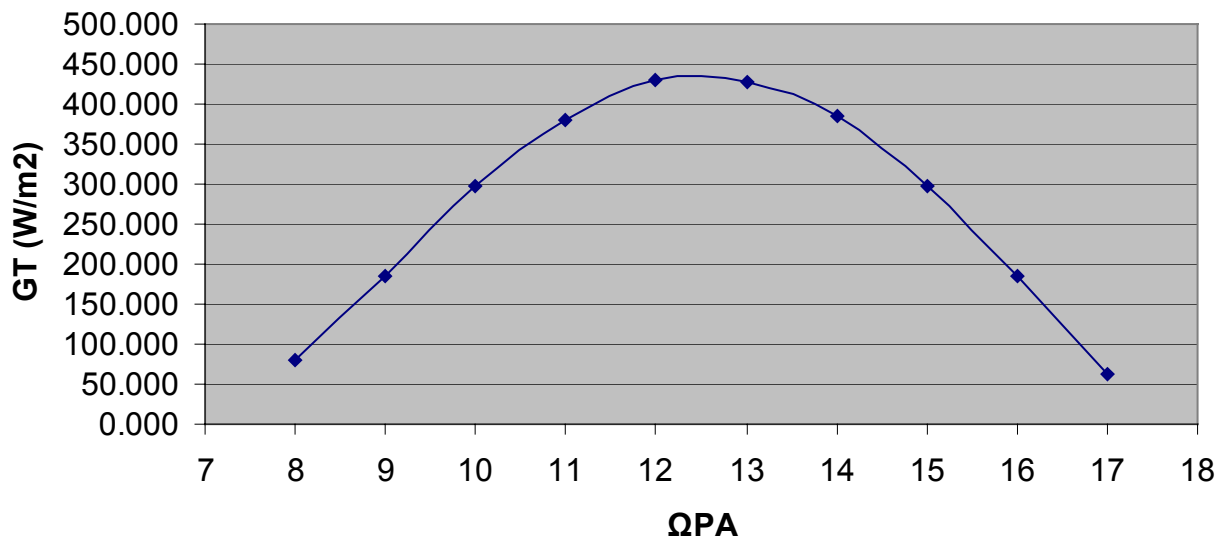
Πίνακας - 20 : Λόγος  $R_b$  συναρτήσει των γωνιών  $\theta, \theta_z$

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 08.00 | 0.491 | 0.509 | 0.965 |
| 09.00 | 0.694 | 0.671 | 1.034 |
| 10.00 | 0.850 | 0.795 | 1.069 |
| 11.00 | 0.948 | 0.873 | 1.085 |
| 12.00 | 0.981 | 0.900 | 1.090 |
| 13.00 | 0.948 | 0.873 | 1.085 |
| 14.00 | 0.850 | 0.795 | 1.069 |
| 15.00 | 0.694 | 0.671 | 1.034 |
| 16.00 | 0.491 | 0.509 | 0.965 |
| 17.00 | 0.255 | 0.320 | 0.795 |

Πίνακας - 21 : Στιγμαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$ .

| Ώρα   | $G_b$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $G_d$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $R_b$ | $G_T$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------------|
| 08.00 | 0.017                         | 0.068                         | 0.965 | <b>0.080</b>                  |
| 09.00 | 0.057                         | 0.136                         | 1.034 | <b>0.185</b>                  |
| 10.00 | 0.113                         | 0.188                         | 1.069 | <b>0.297</b>                  |
| 11.00 | 0.164                         | 0.216                         | 1.085 | <b>0.380</b>                  |
| 12.00 | 0.203                         | 0.221                         | 1.090 | <b>0.429</b>                  |
| 13.00 | 0.218                         | 0.202                         | 1.085 | <b>0.427</b>                  |
| 14.00 | 0.218                         | 0.161                         | 1.069 | <b>0.385</b>                  |
| 15.00 | 0.174                         | 0.122                         | 1.034 | <b>0.296</b>                  |
| 16.00 | 0.108                         | 0.086                         | 0.965 | <b>0.185</b>                  |
| 17.00 | 0.015                         | 0.053                         | 0.795 | <b>0.062</b>                  |

## ΜΕΤΑΒΟΛΗ Gt ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΡΑΣ (21η Φεβρουαρίου)



Διάγραμμα 7: Μεταβολή της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας G<sub>t</sub>

Πίνακας - 22: Θερμοκρασία περιβάλλοντος για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου και για κάθε ώρα

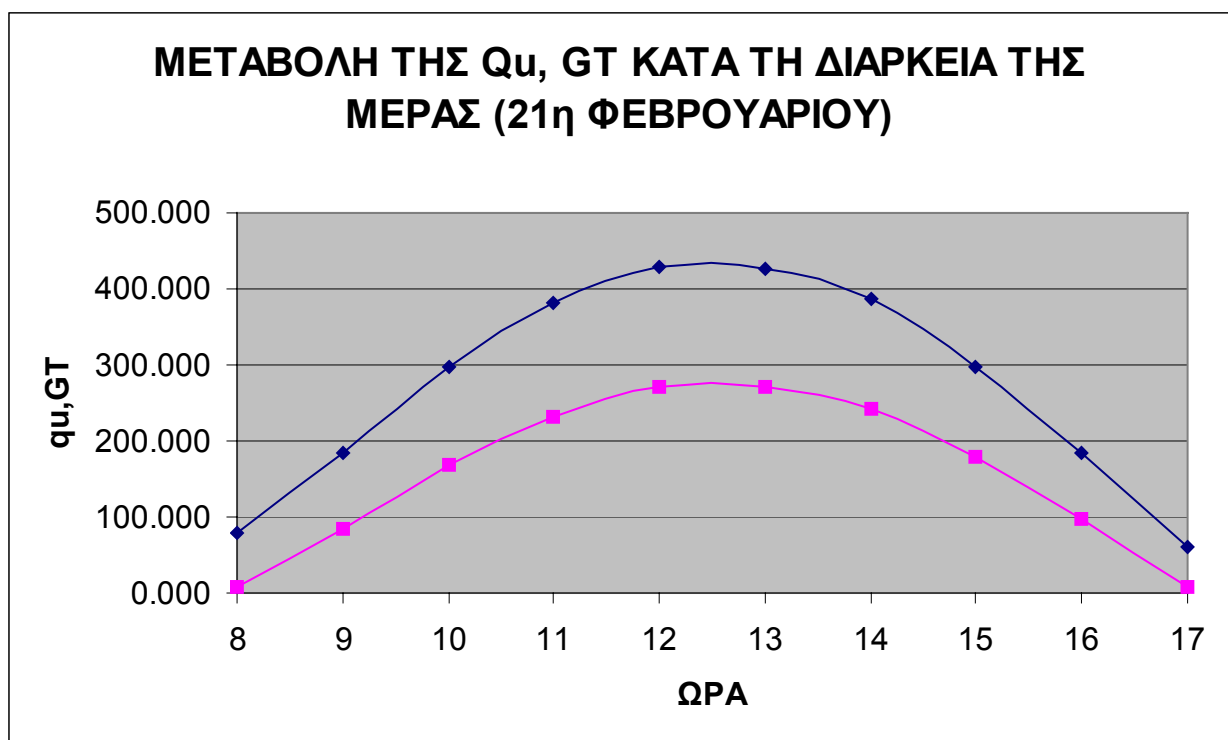
| ΩΡΑ   | T <sub>a</sub> |
|-------|----------------|
| 08.00 | 9.671          |
| 09.00 | 10.437         |
| 10.00 | 11.320         |
| 11.00 | 12.322         |
| 12.00 | 13.265         |
| 13.00 | 13.972         |
| 14.00 | 14.443         |
| 15.00 | 14.620         |
| 16.00 | 14.443         |
| 17.00 | 14.031         |

Απ' όπου προκύπτει ότι :  $\bar{T}_a = 10.165^\circ\text{C}$ . Άρα δέχομαι  $T_i = 25^\circ\text{C}$ .

Εφαρμόζοντας την σχέση (7.15), προκύπτει ο Πίνακας - 13, που ακολουθεί:

Πίνακας - 23 : Ωφέλιμη ισχύς συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

| ΩΡΑ   | $G_T$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $Q_u$<br>[W] | $q_u$<br>[W/m <sup>2</sup> ] |
|-------|------------------------------|--------------|------------------------------|
| 08.00 | 79.620                       | 13.347       | 6.741                        |
| 09.00 | 185.353                      | 169.085      | 85.396                       |
| 10.00 | 296.896                      | 333.870      | 168.621                      |
| 11.00 | 380.334                      | 459.366      | 232.003                      |
| 12.00 | 429.532                      | 535.664      | 270.537                      |
| 13.00 | 427.452                      | 537.318      | 271.373                      |
| 14.00 | 385.989                      | 481.287      | 243.074                      |
| 15.00 | 296.343                      | 354.644      | 179.113                      |
| 16.00 | 185.215                      | 195.063      | 98.517                       |
| 17.00 | 61.696                       | 16.282       | 8.223                        |



Διάγραμμα 8: Μεταβολή της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας  $G_T$  και της ωφέλιμης ισχύος  $q_u$  για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου.

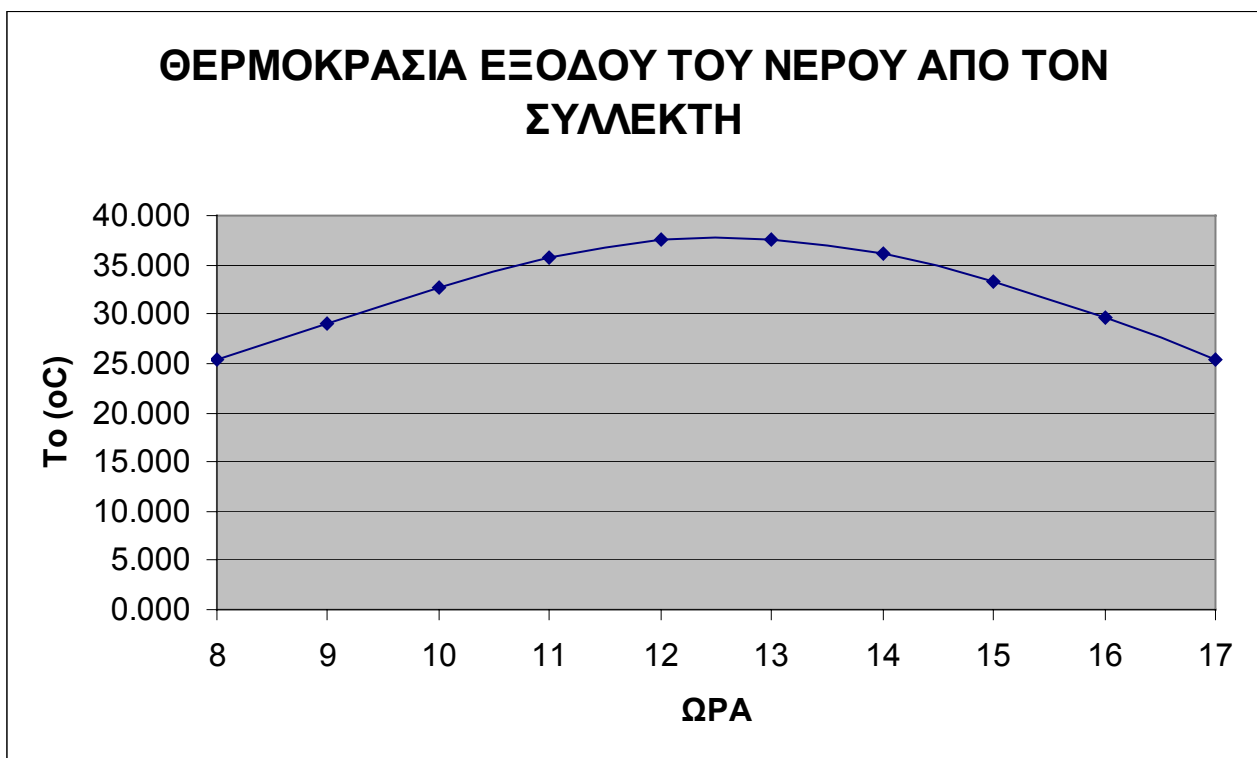
Με βάση στοιχεία της βιβλιογραφίας για μια εγκατάσταση παρόμοια με την εξεταζόμενη, η κατάσταση αναφοράς στον ατμοποιητή θα είναι:

Περιεκτικότητα άλατος: 3-5%  
Πυκνότητα 1025kg/m<sup>3</sup>

Πίνακας - 24 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον ατμοποιητή, συλλέκτη.

| ΩΡΑ   | q <sub>υ</sub><br>[W/m <sup>2</sup> ] | T <sub>ο</sub><br>[°C] |
|-------|---------------------------------------|------------------------|
| 08.00 | 6.741                                 | 25.311                 |
| 09.00 | 85.396                                | 28.940                 |
| 10.00 | 168.621                               | 32.779                 |
| 11.00 | 232.003                               | 35.703                 |
| 12.00 | 270.537                               | 37.481                 |
| 13.00 | 271.373                               | 37.520                 |
| 14.00 | 243.074                               | 36.214                 |
| 15.00 | 179.113                               | 33.263                 |
| 16.00 | 98.517                                | 29.545                 |
| 17.00 | 8.223                                 | 25.379                 |

Έτσι προκύπτει το Διάγραμμα 9 όπως φαίνεται στην συνέχεια.



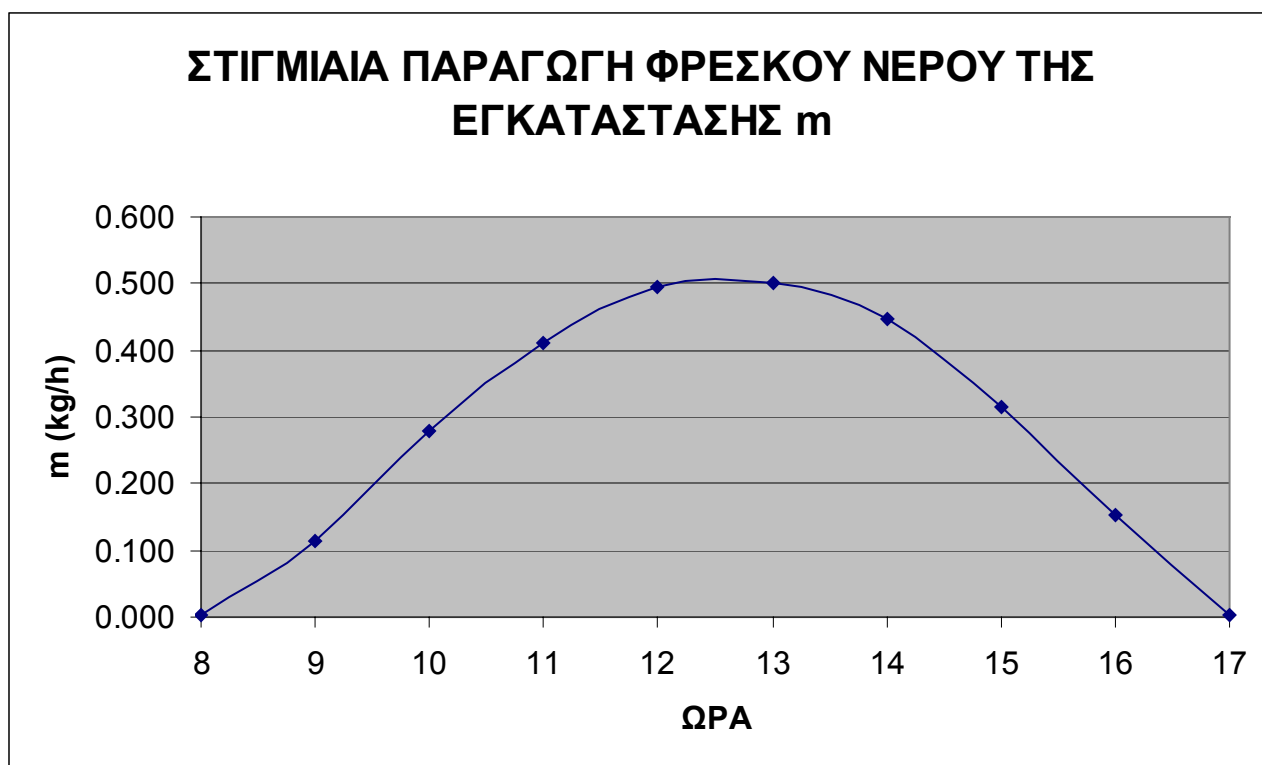
Διάγραμμα 9: Θερμοκρασία νερού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη (21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου)



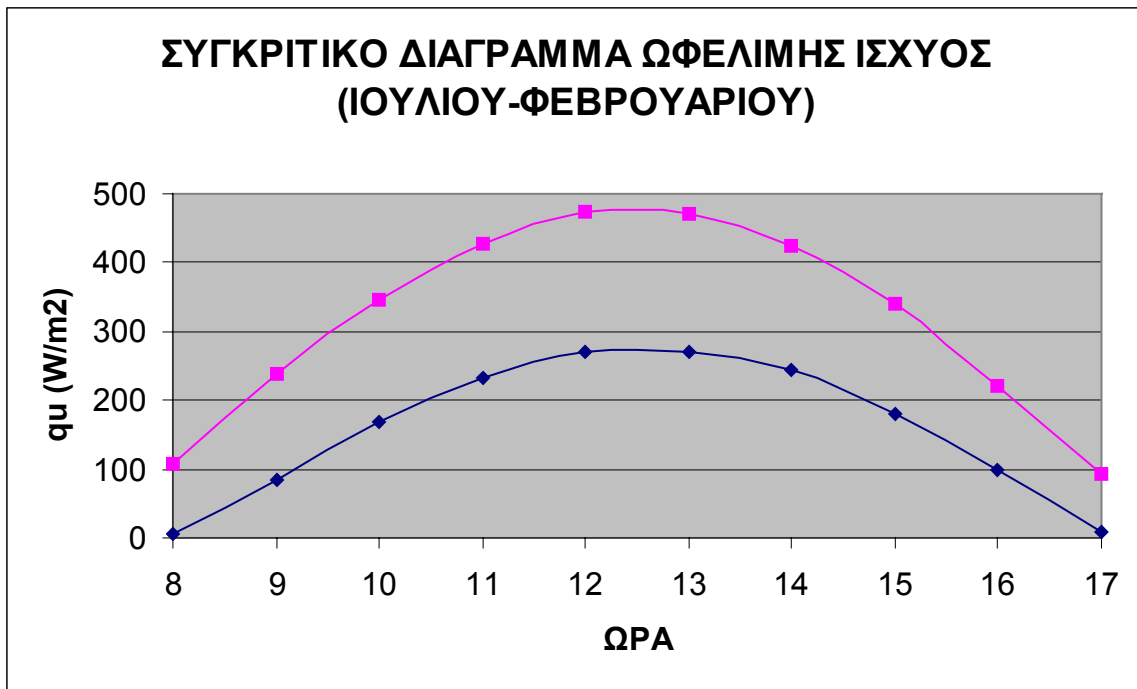
Πίνακας - 25: Στιγμαία παραγωγή της εγκατάστασης

| Ωρα | Q <sub>u</sub><br>[W] | T <sub>co</sub> -T <sub>ci</sub><br>[°C] | m<br>[kg/h] |
|-----|-----------------------|--|-------------|
| 8   | 169.085               | 0.311                                    | 0.002       |
| 9   | 333.870               | 3.940                                    | 0.115       |
| 10  | 459.366               | 7.779                                    | 0.279       |
| 11  | 535.664               | 10.703                                   | 0.412       |
| 12  | 537.318               | 12.481                                   | 0.496       |
| 13  | 481.287               | 12.520                                   | 0.502       |
| 14  | 354.644               | 11.214                                   | 0.446       |
| 15  | 195.063               | 8.263                                    | 0.315       |
| 16  | 16.282                | 4.545                                    | 0.153       |
| 17  | 13.347                | 0.379                                    | 0.003       |

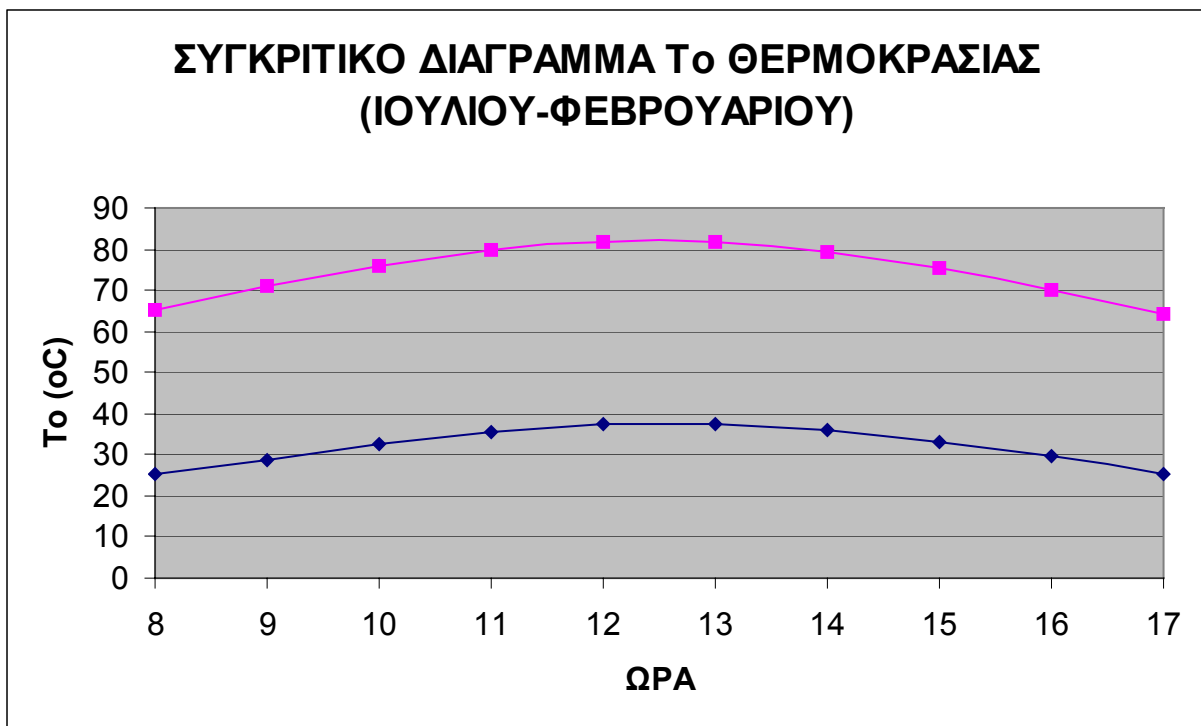
Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα απεικονίζονται γραφικά στο **Διάγραμμα 10** που ακολουθεί:



Διάγραμμα 10 : Στιγμαία παραγωγή φρέσκου νερού της εγκατάστασης

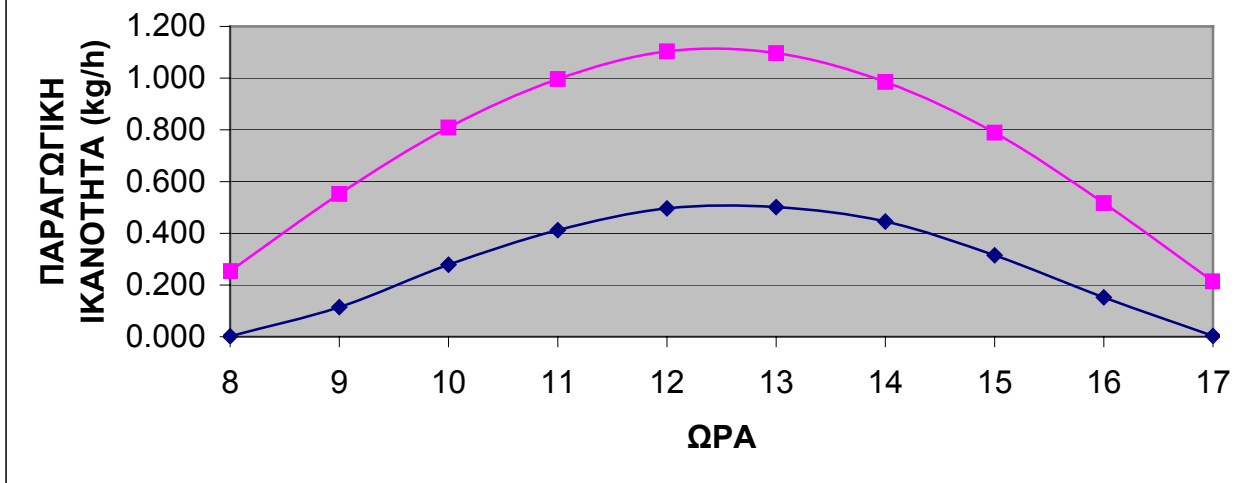


Διάγραμμα 11 : Συγκριτικό διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος



Διάγραμμα 12 : Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας T<sub>0</sub>

### ΣΥΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΙΟΥΛΙΟΥ-ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ)



Διάγραμμα 13 : Συγκριτικό διάγραμμα παραγωγικής ικανότητας εγκατάστασης

## 10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους μήνες Ιούλιο και Φεβρουάριο, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Κατ'άρχην παρατηρούμε ότι η στιγμιαία άμεση και στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, είναι κατά πολύ μικρότερη τον μήνα Φεβρουάριο απ' ότι τον μήνα Ιούλιο, κάτι που ήταν αναμενόμενο.
2. Παρατηρούμε ότι ο λόγος  $R_b$  κατά τον Φεβρουάριο έχει μεγαλύτερες τιμές και αυτό συμβαίνει γιατί τον χειμώνα ο ήλιος βρίσκεται χαμηλότερα στον ουρανό.
3. Η στιγμιαία ολική ακτινοβολία, επίσης είναι μικρότερη κατά τον μήνα Φεβρουάριο.
4. Παρατηρούμε ότι η στιγμιαία ολική ακτινοβολία και στις δύο περιπτώσεις παίρνει τις μέγιστες τιμές της κατά τις 12.00-13.00, ενώ τις πρώτες πρωινές ώρες καθώς και τις απογευματινές, όπου η ηλιοφάνεια είναι περιορισμένη, μειώνεται ραγδαία.
5. Η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος για τον μήνα Ιούλιο είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 14 βαθμούς Κελσίου απ' ότι τον Φεβρουάριο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ωφέλιμη ισχύς  $q_u$  να είναι σχεδόν διπλάσια τον Ιούλιο. Κορυφώνεται κατά τις μεσημεριανές ώρες 14.00-15.00, όπου η θερμοκρασία φτάνει τις μέγιστες τιμές για κάθε μέρα.
6. Φυσικά και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι η ολική στιγμιαία ακτινοβολία για τις αντίστοιχες ώρες της ημέρας, ξεπερνάει κατά πολύ την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού καμία μηχανή-συσκευή δεν δύναται να έχει βαθμό απόδοσης ίσο ή μεγαλύτερο της μονάδας, αφού πάντα θα υφίσταται απώλειες.
7. Ωστόσο, είναι ευκρινές ότι κατά τον μήνα Φεβρουάριο, η απόκλιση αυτή είναι ευκρινέστερη, αφού ο ηλιακός συλλέκτης αποδίδει λιγότερο λόγω της μειωμένης ηλιοφάνειας και των χαμηλών εξωτερικών θερμοκρασιών.
8. Η θερμοκρασία εξόδου από το συλλέκτη είναι επίσης κατά πολύ μικρότερη κατά τον μήνα Φεβρουάριο και είναι κατά κάποιον τρόπο ανάλογη της εκάστοτε εξωτερικής θερμοκρασίας για κάθε ώρα.
9. Η μέγιστη παραγωγή φρέσκου νερού της εγκατάστασης συμβαίνει κατά τις μεσημεριανές ώρες και στις δύο περιπτώσεις. Τον Ιούλιο παρατηρούμε σχεδόν τριπλάσια παραγωγή. Αυτό είναι από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του ηλιακού συλλέκτη, αφού τις ώρες αιχμής έχει την βέλτιστη απόδοση.
10. Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη για τον Ιούλιο, παρατηρούμε ότι ξεκινάει από χαμηλές τιμές στις 08.00, διατηρεί μια ανοδική πορεία κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυμαίνεται από το 43% ως το 62%. Μετά τις 15.00, έχουμε πτώση του βαθμού απόδοσης.
11. Ο βαθμός απόδοσης και για τους δύο μήνες έχει σχετικά υψηλές τιμές. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη έχει γίνει κατ'επίκληση και έχει θεωρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας.
12. Τα αποτελέσματα, για τον συγκεκριμένο συλλέκτη, είναι ακριβέστερα για ολική ακτινοβολία ίση με  $800 \text{ W/m}^2$ , δηλαδή αυτή που δίνει η στιγμιαία καμπύλη απόδοσης του κατασκευαστή. Δηλαδή για τις ώρες 12.00-13.00, όπου αυτή επιτυγχάνεται.
13. Χρησιμοποιώντας περισσότερους συλλέκτες, θα έχουμε σίγουρα καλύτερα αποτελέσματα.
14. Από το παράρτημα 3 και από τα συγκριτικά διαγράμματα παραγωγής φρέσκου νερού της εγκατάστασης, παρατηρούμε ότι κατ'άρχην τον Ιούλιο έχουμε τριπλάσια παραγωγή φρέσκου νερού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Περίληψη από ομιλία του κ. Γιάννη Τρυπαναγνωστόπουλου, Λέκτορα Φυσικής.
2. M. L. Davis, D. A. Cornell, Introduction to Environmental Engineering, McGraw-Hill Book Co, Second Edition, New York, 1991.
3. J. Dragun, A. C. Kuffner, R. W. Schneiter, A chemical engineer's guide to groundwater contamination. Transport and transformation of organic chemicals, Chemical Engineering, Vol. 91, No. 24, November 26, 1984.
4. R. W. Schneiter, J. Dragun, T. G. Eler, Groundwater contamination, Remedial action, Chemical Engineering, Vol. 91, No. 24, November 26, 1984.
5. «Theoretical and experimental analysis of water desalination system using low grade solar heat», Saleh Al Kharabsheh, University of Florida 2003.
6. P. M. Kohn, No watering-down seen for U.S. effluent laws, Chemical Engineering, Vol 84, No 17, August 15, 1977.
7. W. Pryblek, Texas wasteway proves cleanup tide is turning, Chemical Engineering, Vol., 84, No 17, August 15, 1977.
8. J. I. Steevens, C. I. Kusik, The effects of water-pollution control on energy consumption, Chemical Engineering, Vol. 84, No 17, August 15, 1977.
9. S. Kalogirou, Survey of solar desalination systems and system selection, Energy, Vol. 22, No. 1, pp. 69-81, 1997.
10. Ε. Δεληγιάννη, Β.Μπελεσιώτης, Αρχές Διεργασιών Αφαλάτωσης, Αθήνα, 1995.
11. Ε. Δεληγιάννη, Β. Μπελεσιώτης «ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ-ΑΡΧΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ», Αθήνα 1995
12. «Γεωμορφολογική και περιβαλλοντική μελέτη της Νάξου με την χρήση μεθόδων τηλεανίχνευσης και G.I.S.@
13. «ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ», Κωνσταντίνου Βορόπουλου, Αθήνα-Μάιος 2002
14. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ, Ε. Δεληγιάννης, Β. Μπελεσιώτης, Αθήνα 1995
15. «ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ», Παλιεράκης Γεώργιος, Αθήνα 2007
16. ΗΛΙΟΤΕΧΝΙΚΗ, Hans Rau,Μετάφραση:Νεόφυτος Παπαδόπουλος
17. ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ, Κίμωνος Αντωνόπουλου ,Καθηγητου Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004
18. ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Κίμωνος Αντωνόπουλου ,Καθηγητου Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004
19. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ, Αλέξανδρος Αλεξιάκης, εκδόσεις Μιχάλη Σιδέρη
20. SOLAR ENERGY,FUNDAMENTALS,DESIGN,MODELLING AND APPLICATIONS, G.N. Tiwari, India 2002

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

1. <http://www.lboro.ac.uk/wedc/papers/23/groupd/rahman.pdf>
2. [http://www.publish.csiro.au/?act=view\\_file&file\\_id=EC134p4.pdf](http://www.publish.csiro.au/?act=view_file&file_id=EC134p4.pdf)
3. <http://www.rise.org.au/info/Tech/lowtemp/desal.html>
4. <http://www.inhabitat.com/2008/06/18/charles-patons-teatro-del-agua/#comment-85587>
5. [http://www.apctt.org/publication/pdf/nce\\_aug01\\_sun.pdf](http://www.apctt.org/publication/pdf/nce_aug01_sun.pdf)